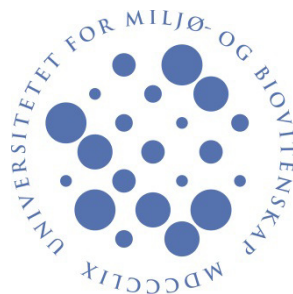
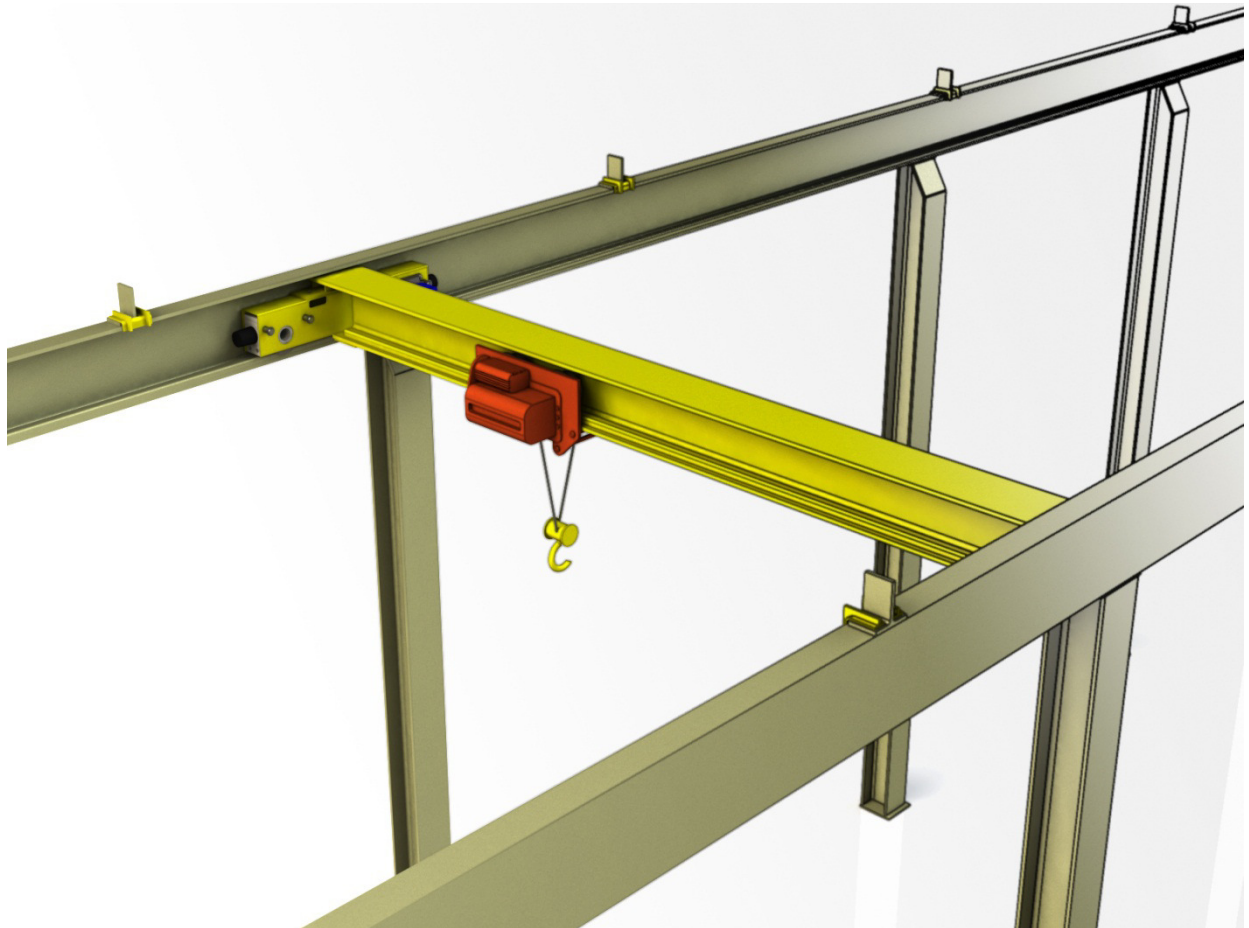


UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



TI TONNS LØPEKRAN FOR VERKSTED VED UMB

av Fredrik Hauge



Gradsoppgave
Maskin- prosess og produktutvikling
IMT/UMB, 2012

I. FORORD

Denne prosjektrapporten omhandler utviklingen av en løpekran for det mekaniske verkstedet ved Universitetet for Miljø- og Biovitenskap. Prosjektoppgaven er utarbeidet som en avsluttende del av masterprogrammet Maskin, Prosess- og Produktutvikling ved Institutt for Matematiske realfag og Teknologi. Prosjektet er gjennomført i vårsemesteret 2012.

Oppgaven omfatter utviklingen, dimensjoneringen og dokumenteringen av en ti tonns løpekran som skal overta for en eldre to tonns løpekran.

Motivasjonen for valget av oppgaven var hovedsakelig å få prøvd meg selv i mye av det jeg har lært i løpet av fem år med maskiningeniørutdanning. Oppgaven innebar mye dimensjonering og design av stålkonstruksjoner, men det var også nødvendig med en strukturert og analyserende arbeidsmetode, noe det har vært stort fokus på i produktutviklingsdelen av utdanningen.

Det som skiller dette prosjektet fra tidligere skoleprosjekter jeg har hatt, er idéen om at løpekranen muligens skal utvikles videre og faktisk bygges. Dette bevisstgjorde og forsterket ansvaret som følger det å dimensjonere en lastbærende konstruksjon, samtidig som det skulle være fokus på funksjon, produksjonsvennlighet og økonomi.

Undertegnende har lite erfaring, annet enn igjennom utdannelsen, med verkstedarbeid og tilhørende maskiner eller kraner. Det var derfor nødvendig å sette seg inn i hva som inngår i en løpekran, både ved å se på den eksisterende løpekranen, og ved å se på kataloger med andre løpekraner. Dette gjenspeiler en realistisk arbeidsmetode der en ikke bare hopper rett inn i en problemstilling, men også ser på, og vurderer andre produkter eller løsninger. Prosjektarbeidet har fungert som en god forberedelse til arbeidslivet, og den har vært en test i blant annet selvstendighet, planlegging og problemløsning.

Til slutt ønsker jeg å takke hovedveileder og førsteamanuensis Geir Terjesen for veiledning, utlån av litteratur og relevante eksempler. Jeg ønsker også å takke senioringeniør Egil Stemsrud for tips og rettleiding innenfor dimensjonering, og verkstedsjef Bjørn Brenna for hjelp til estimat av kostnader, samt råd om produksjons- og monteringsprosess.

Ås, 14. Mai 2012

Fredrik Hauge

II. SAMMENDRAG

Målsettingen med prosjektet var å utvikle en løsning for en ti tonns løpekran, tilpasset den gjeldende maskinhallen på det mekaniske verkstedet ved Universitetet for Miljø- og Biovitenskap.

Det ble tidlig valgt å fokusere hovedsakelig på den strukturelle delen av løpekranen, og andre elementer er kun omtalt i den grad det er nødvendig for å kunne dimensjonere strukturelementene. Denne begrensningen ble satt for å redusere arbeidsmengden til et overkommelig nivå, og for å rette fokus mot den delen som har størst betydning for hele utformingen.

Verkstedhallens utforming, samt ønsker fra de verkstedansatte ble utgangspunktet for løpekranens kravspesifikasjoner. Ved selve utformingen av hovedstrukturen ble det sett på en toppkjørende løsning, en underhengende løsning og en utforming lik den eksisterende løpekranen der kranbruens bruvogner kjører inni et kanalstål. Sistnevnte løsning ble vurdert som den mest passende og ble utgangspunkt for den videre utformingen.

Det ble også nødvendig å sette begrensninger til løpekatten og dens kjøremaskineri for å kunne begynne dimensjoneringen av løpekranstrukturen.

Dimensjoneringen er hovedsakelig gjort etter NS 5514 som omfatter beregninger av stålkonstruksjoner for kraner og løfteutstyr. Ved utmatting- og levetidsberegninger er standarden DNV-RP-C203 brukt, og denne omfatter egentlig utmattingsdesign for offshore strukturer, men den var også meget brukbar i dette tilfellet.

Beregninger som ble gjort på de mest kritiske komponentene er verifisert og studert nærmere i FEM-analyser. I tillegg til å fungere som en verifikasjon for beregningene, synliggjorde også FEM-analysene uheldige utforminger, samt endringer som burde gjøres.

Alle viktige komponenter i løpekranstrukturen er gjort rede for enten med illustrasjoner, konstruksjonstegninger eller henvisning til komponenter som må kjøpes inn. Det er også gjort rede for valg av materiale, samt en framstillings- og monteringsprosess. Et kostnadsestimat for materiale og produksjon av løpekranen er utarbeidet, og denne kostnaden er sammenliknet med prisen på en lignende løpekran fra en norsk leverandør.

Den ferdige konstruksjonen består av en løpekran med et spenn på ca. 3,8 meter, en 15 meter lang kranbane, en maksimal løftehøyde på ca. 4,7 meter og en kapasitet på ti tonn. Kanalstålet, som er støttet av søyler, fungerer som kranbane der kranbruas bruvogner kjører på kanalstålets nederste flens. Kranbrua består av en H-bjelke der en løpekatt skal henge under på bjelkens nederste flens.

Konstruksjonen er tilpasset den gjeldende maskinhallen, og den vil være til minimal hindring for hallens tilkomstmuligheter.

III. ABSTRACT

The main goal of this project was to develop a solution for a ten ton crane, designed to fit the applicable mechanical workshop at the Norwegian University of Life Sciences.

It was decided early in the process to focus mainly on the structural part of the crane, and other elements are only discussed to the extent it was necessary to be able to dimension the structural elements. This limitation was set to reduce the project workload to a manageable level, and to direct the focus to the parts that has the greatest impact on the whole design.

The dimensions and details of the workshop, together with wishes from the workshops employees, is what the crane requirement specifications was based on. During the fundamental design there was considered to have an overhead travelling crane, an under hung traveling crane or a design like on the current crane where the crane bridge end trucks runs inside a channel profiled beam. The latter one was considered as the most suitable solution and became the starting point for the continued design.

It was also necessary to set restrictions to the hoist and trolley so that it could be possible to start the dimensioning of the crane structure.

The design calculations are mainly done according to NS 5514 which covers the design of steel structures for cranes and lifting equipment. The standard DNV-RP-C203 is used regarding fatigue and lifespan calculations, and although this standard originally covers the fatigue design of offshore structures, it was also very useful in this case.

Calculations conducted on the most critical components are verified and studied further in FEM-analyzes. In addition to function as a verification for the calculations, the FEM-analyzes also revealed unfortunate design details and appropriate changes that should be conducted.

Every important structural component is accounted for through illustrations, technical drawings or referrals to components that has to be bought. It is also accounted for the choice of materials, and a manufacturing- and assembly process. A cost estimate for material- and production cost is made, and this is compared to the cost of an almost similar crane from a Norwegian vendor.

The result consists of a travelling crane with a span of approximately 3.8 meters, a 15 meter long runway, a maximum lifting height of about 4.7 meters, and a load capacity of ten metric tons. The channel steel, which is supported by columns, function as the runway where the end trucks runs on the lower flange. The crane bridge consists of a single girder with an H-profile, and where the trolley is under hung and runs on the girder's lower flanges.

The construction is designed to fit the applicable space, and it will be of minimal obstruction for the workshop workers and/or equipment.

INNHALDSFORTEGNELSE

1. INNLEDNING	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Problemstillinger	4
1.3 Målsettinger og begrensninger	4
1.4 Kvalitetssikring.....	5
1.4.1 Gjeldende lover, forskrifter og standarder	5
1.4.2 Rapport	6
1.4.3 Produkt	6
1.5 Arbeidsmetoder og verktøy	7
1.6 Symboler.....	7
2. BESKRIVELSER	9
2.1 Kravspesifikasjoner	9
2.2 Utgangspunkt.....	9
2.3 Konseptdrøfting	11
2.3.1 Funksjonsanalyse	11
2.3.2 Kranbanen	12
2.3.3 Kranbrua.....	15
2.3.4 Valg strukturell utforming.....	16
2.3.5 Løpekatt og heisemaskineri.....	16
2.4 Formgivning og design	18
2.4.1 Opplagring av kranbane	18
2.4.2 Designelementer ved bruvognen	20
2.4.3 Designelementer ved kranbrua.....	22
2.4.4 Kjøremaskineri	23
2.4.5 Kranskiner	24
2.4.6 Hastigheter	24
2.4.7 Endestopp	25
3. GRUNNLAGSBEREGNINGER	26
3.1 Klasse- og gruppeinndeling	26
3.1.1 Klassifisering av den strukturelle gruppen.....	26
3.2 Statiske krefter, momenter, sikkerhet mot flyt og nedbøyning	27
3.2.1 Lasttilfeller	27
3.2.2 Klimatiske laster.....	28
3.2.3 Tillatte spenninger og deformasjoner i kranstrukturen	28
3.3 Dimensjonering	30
3.3.1 Kranbruas drager	30
3.3.2 Bruvognas bjelke.....	35
3.3.3 Forbindelse imellom kranbrua og bruvognen	38
3.3.4 Dimensjonering av kranbanebjelkene	42
3.3.5 Sjekk av utkragerbjelkenes kapasitet	48

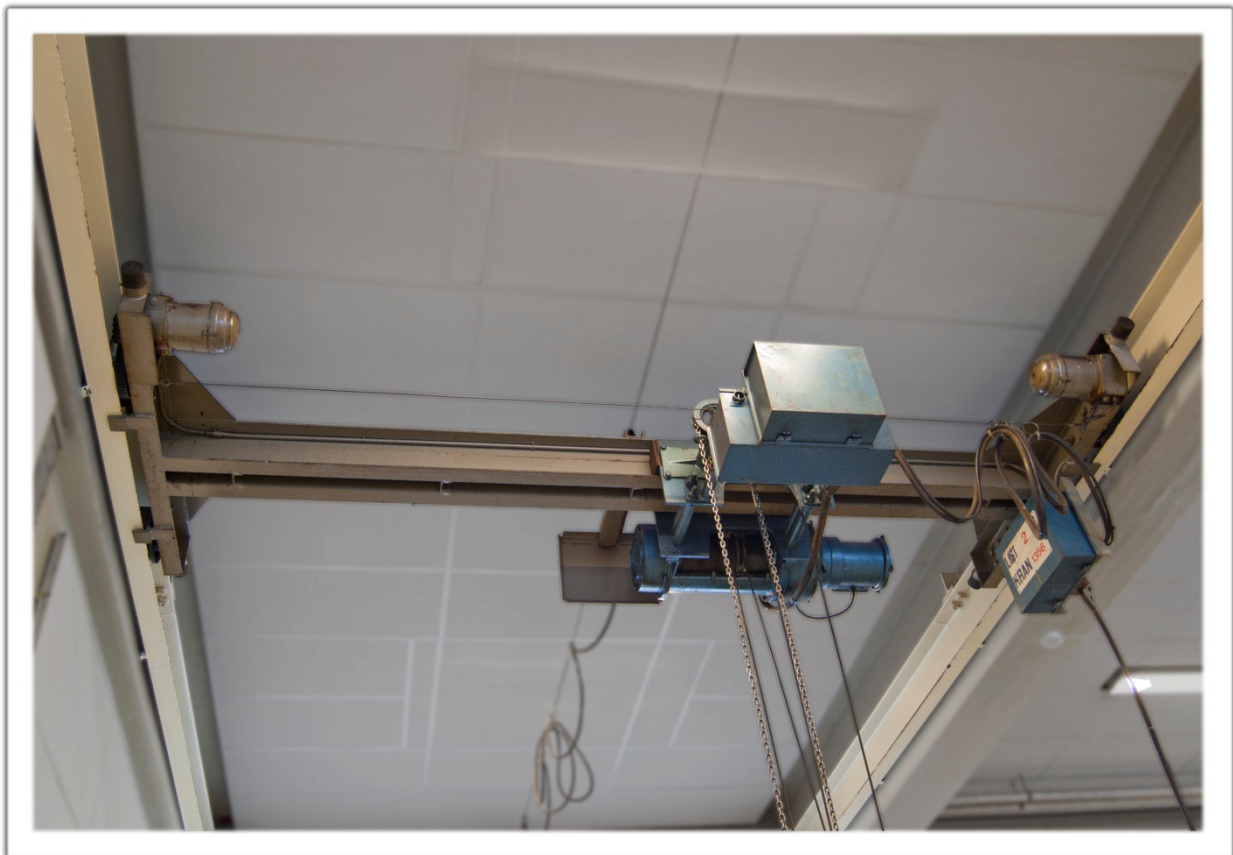
3.3.6	Dimensjonering av kranbanens søyler	51
3.3.7	Dimensjonering av opplagerplate.....	52
3.3.8	Nødvendig effekt på kranbruas kjøremotor	54
3.4	Dynamiske belastninger og sikkerhet mot utmatting	55
3.4.1	Dynamisk belastning av kranbrudrageren.....	55
3.4.2	Utmatting i sveiser	57
3.5	Knekking og vipping	60
3.5.1	Kontroll mot knekking av strukturbærende søyler.....	60
3.5.2	Kontroll mot vipping i kranbrudrageren	62
3.5.3	Kontroll mot vipping i kranbanebjelkens lengste spenn	63
4.	ELEMENT- OG LØSNINGSVALG	65
4.1	Komponenter	65
4.1.1	Komponenter som må tilvirkes	65
4.1.2	Innkjøpte komponenter	70
4.2	Hovedelementer.....	72
4.2.1	Kranbanen	72
4.2.2	Kranbrua.....	73
4.2.3	Bruvogn.....	73
5.	STRUKTUROPTIMERING	74
5.1	Strukturspanninger.....	74
5.1.1	Verifikasjon av kranbrudragerens dimensjonering	74
5.1.2	FEM-analyse av kranbrua	77
5.1.3	Verifikasjon av bruvognas dimensjonering.....	81
5.1.4	FEM-analyse av bruvognen	84
5.1.5	FEM-analyse av kranbanebjelken	87
5.1.6	FEM-analyse av opplagerplaten.....	92
5.2	Materialvalg.....	94
5.3	Bearbeiding og utforming.....	95
5.3.1	Overflatebehandling	95
5.3.2	Framstilling- og monteringsprosess	95
6.	LØSNINGSPRESENTASJON	99
6.1	Visualisering.....	99
6.2	Merking, inspeksjonsintervall og viktige dimensjoner.....	104
6.3	Material- og produksjonskostnader	105
6.4	Forbedringer	106
7.	KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	107
7.1	Anbefalinger	107
7.2	Videre arbeid	107
8.	REFERANSER.....	108
9.	VEDLEGG	110

1. INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Denne mastergradsoppgaven går ut på å dimensjonere og dokumentere en ti tonns løpekran for det mekaniske verkstedet ved Universitetet for Miljø- og Biovitenskap (UMB). Bakgrunnen for oppgaven er at en eksisterende løpekran begynner å bli gammel og klar for utskiftning. Den er ikke fullstendig automatisert, og i tillegg er det et behov for å øke løpekranens kapasitet slik at verkstedet skal kunne ta større oppdrag. Dette er en fin mulighet til å benytte seg av instituttets ingeniørstudenter i stedet for å kjøpe inn et ferdig opplegg fra en leverandør. Planen er å legge grunnlaget for den nye løpekranen med denne oppgaven, for så å fullføre produktet igjennom andre mastergradsoppgaver der det tas for seg gjenstående elementer som for eksempel automasjon og elektronikk. Løpekranen som skal byttes ut befinner seg på verkstedfløy 2 i TF-kvartalet, og den har en kapasitet på to tonn.

En løpekran (også kalt traverskran) er et løftemaskineri der lasten kan flyttes både vertikalt og horisontalt. Den består hovedsakelig av en kranbane som går parallelt med verkstedets lengderetning, en kranbru som spenner på tvers av kranbanen, og en løpekatt som kan bevege seg langs kranbrua. Det er på løpekatten at selve heisemaskineriet befinner seg. Denne krantypen er veldig vanlig på verksteder, og den gjør det mulig å flytte tungt utstyr og materiale på en effektiv måte.



Figur 1: *Bilde av løpekranen som skal byttes ut. Hele kranbrua og løpekatten vises, samt deler av kranbanen på hver side. Løpekranen har en lastekapasitet på to tonn. Merk kjettingen som henger fra løpekatten. Dette er den manuelle betjeningen for å forflytte løpekatten langs brua.*

1.2 Problemstillinger

Hvordan skal løpekranen utformes på en økonomisk gunstig og sikker måte?

- Hvilke forskrifter, sikkerhetsbestemmelser og standarder er relevante?
- Kan den nye løpekranen benytte seg av eksisterende konstruksjonselementer benyttet av den gamle løpekranen?
- Hvordan skal løpekranens komponenter utformes for å unngå problemer ved montering?

1.3 Målsettinger og begrensninger

Hovedmål:

Dimensjonere og dokumentere en ti tonns løpekrane tilpasset den gjeldende maskinhallen på det mekaniske verkstedet ved UMB. Det skal legges vekt på løpekranens struktur, og denne skal ha en god sikkerhet som er innenfor nasjonale forskrifter og sikkerhetsbestemmelser. Konstruksjonen skal ha gode tekniske løsninger.

Delmål:

1. Fastslå funksjons- og utformingskrav.
2. Gjøre rede for gjeldende forskrifter, sikkerhetsbestemmelser og standarder.
3. Dimensjonere viktige konstruksjonselementer og forbindelser.
4. Tilpasse konstruksjonen til maskinhallens mål og utforming.
5. Velge materialer og standardkomponenter.
6. Gjøre en utmattingsberegning og estimere løpekranens levetid.
7. Utforme et ferdig konstruksjonsforslag.
8. Lage prisliste på alle komponenter.

Begrensninger:

- På grunn av begrenset tid og kompetanse vil det ikke gås inn på automasjon og elektronikk.
- Oppgaven tar for seg den strukturelle delen av løpekranen. Det vil si at det som omhandler kjøre- og heisemaskineriet ikke vil bli omtalt i noen større grad enn det som er nødvendig for å kunne dimensjonere strukturen. Heller ikke løpekattens struktur blir dimensjonert da denne er sterkt avhengig av detaljer rundt heisemaskineriet. Denne begrensningen settes for at oppgaven ikke skal bli for omfattende.
- Det vil ikke bli gått inn på sikkerhetsbestemmelser når det gjelder opplæring og bruk av løpekranen.

1.4 Kvalitetssikring

1.4.1 Gjeldende lover, forskrifter og standarder

Videre følger en oversikt over de viktigste lover som berører utvikling, produksjon og bruk av løpekrane:

Produktansvarsloven

- Loven gjelder det erstatningsansvar en produsent har for skade som voldes av produkt framstilt eller satt i omsetning som ledd i hans yrke, ervervsvirksomhet eller dermed likestilt virksomhet. ⁽⁹⁾

Produktkontrollloven

- Denne lov kommer til anvendelse på produksjon, herunder utprøving, innførsel, omsetning, bruk og annen behandling av produkt og forbrukertjenester. ⁽¹⁰⁾

Arbeidsmiljøloven

- Lovens formål er å sikre et arbeidsmiljø som gir grunnlag for en helsefremmende og meningsfylt arbeidssituasjon, som gir full trygghet mot fysiske og psykiske skadevirkninger, og med en velferdsmessig standard som til enhver tid er i samsvar med den teknologiske og sosiale utvikling i samfunnet. ⁽¹¹⁾

De to sistnevnte er i dette tilfellet de viktigste lovene da deres maskinforskrift og brukerskrift stiller krav til utforming, funksjon og bruk av tekniske innretninger. ^(1, side 104) Maskinforskriftens virkeområde er blant annet ved konstruksjon og bygging av maskiner, utskiftbart utstyr, sikkerhetskomponenter, løfteredskap, kjettinger, tau og stropper. ⁽¹²⁾

Siden forskriftene inneholder for det meste generelle krav og beskrivelser, støtter de seg på tekniske standarder. Videre følger en oversikt over noen relevante standarder som berører løpekrane:

NS 5510	- Kraner og løfteutstyr - Radiostyring – Sikkerhetsregler
NS 5512	- Kraner og løfteutstyr - Ståltau – Dimensjonering
NS 5514	- Kraner og løfteutstyr - Stålkonstruksjoner – Beregninger
NS 5515	- Kraner og løfteutstyr - Maskineri – Beregninger
NS-EN 14492-2:2006+A1:2009	- Kraner - Motordrevne vinsjer og taljer - Del 2: Motordrevne taljer
NS-EN 15011:2011	- Kraner - Bro-/travers- og portalkraner
NS-EN 1090-2:2008+A1:2011	- Utførelse av stålkonstruksjoner og aluminiumkonstruksjoner Del 2: Tekniske krav til stålkonstruksjoner
NS-EN 1993-6:2007+NA:2010	- Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner – Del 6: kranbaner

I denne oppgaven blir hovedsakelig NS 5514 ⁽³⁾ brukt da den omfatter det meste av oppgavens innhold. I tillegg er mye informasjon hentet fra boka "Løfte- og transportmaskiner" ⁽⁴⁾ som igjen baserer seg blant annet på denne standarden.

Det kunne vært mer relevant å ta i bruk en nyere standard som Eurokode 3 og dens beregningsprinsipper ved dimensjoneringen av kranstrukturen, men siden NS 5514 var tilgjengelig, og lå til grunn for en rekke regneeksempler, ble det valgt å forholde seg til denne. Det å blande inn prinsippene og faktorene fra det mer moderne Eurokode 3 kunne ha blitt rotete, og det ble derfor valgt å holde seg helt borte fra dette.

Standarden NS 5514 har et eget opplegg for utmattingsberegninger der den angir tillatte spenninger for diverse ståltyper og klassifiseringer av forbindelser etter deres kjerveffekt. Men standarden legger også vekt på at kontroll mot utmatting er et komplisert problem, og at det anbefales spesialbøker på området. ^(3, side 30) Velger derfor ikke å basere utmattingsberegningene på denne standarden, men tar også i bruk standarden DNV-RP-C203 "Fatigue Design of Offshore Structures" ⁽⁶⁾ da denne har gode beregningsmuligheter i seg.

1.4.2 Rapport

Rapporten er språkvasket, og referanser, tabellnummerering, figurnummer, formelnummer og sidetall er dobbeltsjekkert. Rapportstrukturen er basert på utdelt mal. Utregninger er kontrollert to ganger, og de viktigste beregningene er verifisert ved bruk av dataprogrammer. Alle symboler er gjort rede for.

1.4.3 Produkt

Kravspesifikasjonene er diskutert med veileder. Sikkerhetsfaktorer og tillatte verdier er begrunnet og tatt fra diverse standarder. FEM-analyser er kontrollert mot håndberegninger. Forslåtte innkjøpte materialer har de nødvendige godkjenninger/sertifikater eller merking. Produktet skal testes før den settes i bruk. Det er også gjort rede for en nødvendig sikkerhetskontroll av produktet.

1.5 Arbeidsmetoder og verktøy

Prosjektstyring og planlegging:

Det er utarbeidet en prosjektplan med dataprogrammet Microsoft Project 2010, og denne er også brukt for å skape en oversikt i prosjektets oppgaver. Her er det satt fire milepæler som har til hensikt å sikre en viss framgang i prosjektet. Denne planen er vedlagt som vedlegg D.

Målinger:

Det er en målsetting at løpekranen skal tilpasses den gjeldende maskinhallens mål og utforming. Verkstedet kunne her bistå med en ventilasjonstegning av bygget. ⁽⁸⁾ Denne ga noen viktige mål som ellers ville vært vanskelig å måle for hånd. Målinger er også gjort manuelt med meterstokk.

Analyse- og simuleringsprogrammer:

Simuleringsprogrammet ANSYS er brukt til FEM-analyse og verifikasjon av håndberegning. Her er Ansys Mechanical APDL (Classic) brukt ved verifikasjon av grove modeller, mens Ansys Workbench er brukt ved mer detaljerte modeller.

3D-modellering og teknisk tegning:

3D-modeller og tekniske tegninger er laget med CAD-programmet SolidWorks. Noen visualiseringer er også gjort med 3D-grafikkprogrammet Autodesk 3ds Max.

Bilde- og tekstbehandling:

Bildebehandlingsprogrammet Adobe Photoshop er brukt for å klargjøre bilder til rapporten. Microsoft Word er brukt til tekstbehandling.

1.6 Symboler

Tabell 1: Symboler og enheter som er brukt i oppgaven.

Symbol	Betydning	Enhet
m	Masse.	kg
F	Kraft.	N
F_a	Aksialkraft.	N
F_k	Knekklast.	N
V	Skjærkraft.	N
P	Hjulkraft.	N
Q	Jevnt fordelt last.	N
S_G	Last fra egenvekt.	N
S_L	Last fra nyttelast.	N
S_H	Last fra horisontale bevegelser.	N
M_b	Bøyemoment.	Nm
q	Jevnt fordelt last per lengde.	N/m
σ	Spenning generelt.	MPa
σ_b	Bøyenspenning.	MPa
σ_a	Tillatt spenning.	MPa
σ_E	Flytegrense.	MPa

σ_R	Strekkefasthet.	MPa
σ_w	Spenning i sveis.	MPa
σ_T	Spenning på grunn av termisk utvidelse.	MPa
τ	Skjærspenning generelt.	MPa
τ_a	Tillatt skjærspenning.	MPa
τ_1	Parallell skjærspenning.	MPa
σ_{jf}	Jevnførende spenning.	MPa
E	Elastisitetsmodul.	MPa
p	Trykk.	MPa
l	Lengde.	mm
L_k	Knekk lengde.	mm
t	Tykkelse.	mm
f	Nedbøyning.	mm
D	Ytterdiameter.	mm
d	Innerdiameter.	mm
r	Radius.	mm
c	Hjulavstand i kjøreretning.	mm
e	Arm for rullende friksjon.	mm
i	Treghetsradius.	mm
A	Tverrsnitt.	mm ²
A_s	Spenningsareal.	mm ²
W	Tverrsnittsmodul.	mm ³
S	Statisk moment.	mm ³
I	Annet arealmoment.	mm ⁴
V_L	Løftehastighet.	m/s
V_K	Kjørehastighet.	m/s
g	Gravitasjonskonstant.	m/s ²
T	Temperatur.	K
α	Termisk lengdeutvidelseskoeffisient.	K ⁻¹
N_e	Effekt.	W
X	Levetid.	År
M	Tilleggsfaktor for stålkonstruksjoner.	-
n	Knekk sikkerhetsfaktor.	-
n_L	Dynamisk prøvefaktor.	-
ρ_1	Overlastfaktor for dynamisk prøving.	-
ρ_2	Overlastfaktor for statisk prøving.	-
N_i	Sykler.	-
n_i	Antall løft.	-
ψ	Dynamisk faktor.	-
ζ	Eksperimentelt bestemt faktor for utregning av dynamisk faktor.	-
λ	Slankhetsforhold.	-
a	Konstant i utmattingskurver.	-
μ	Friksjonskoeffisient.	-
η	Virkningsgrad for kjøremaskineri.	-

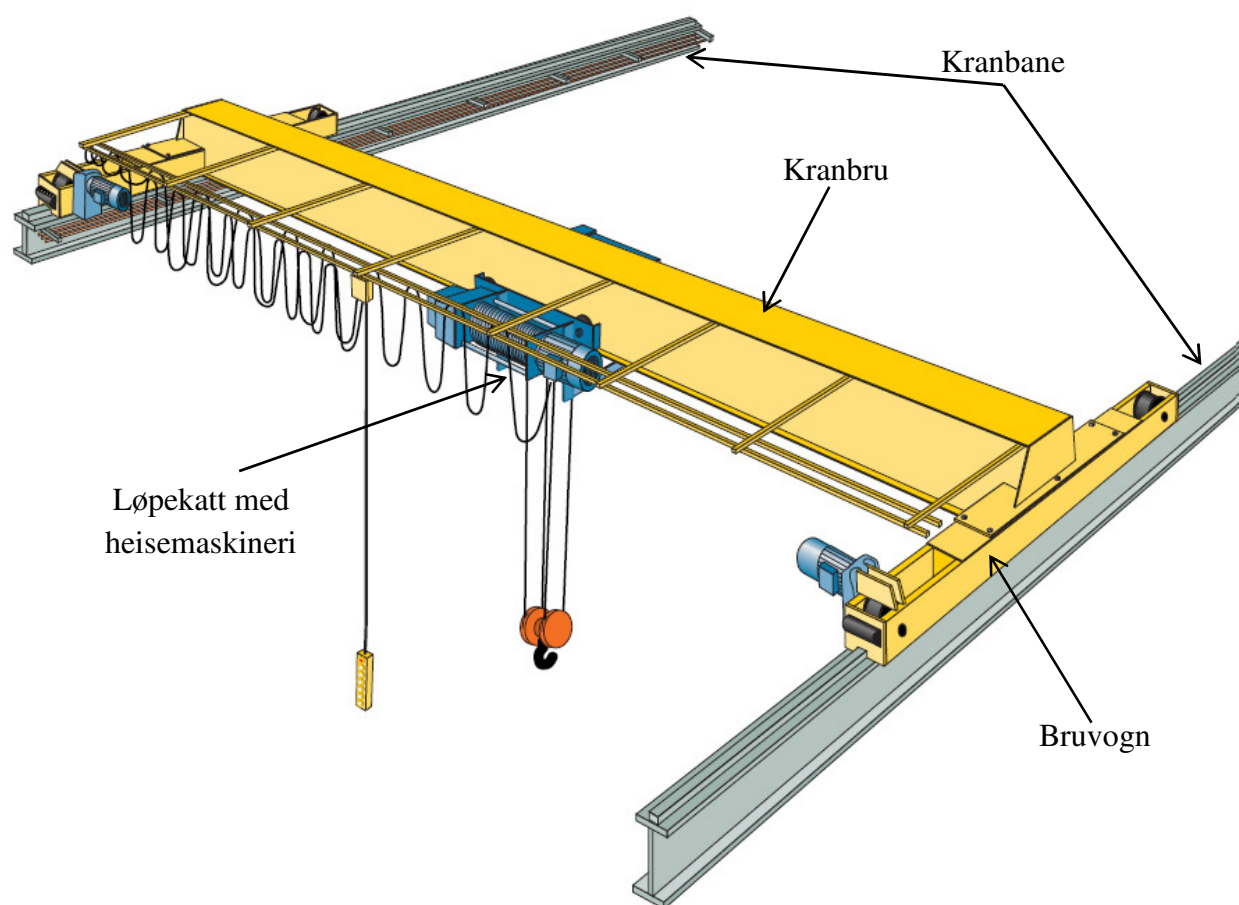
2. BESKRIVELSER

2.1 Kravspesifikasjoner

- Løpekranen skal tilfredsstille nasjonale krav til stålstrukturer. I praksis innebærer dette at den skal tåle de belastninger den kan bli utsatt for. I tillegg skal den utformes slik at ingen skal kunne komme til skade ved bruk av løpekranen.
- Løpekranen skal ha en kapasitet på 10 tonn.
- Løpekranen skal testes dynamisk med 12,5 tonn før bruk.
- Løpekranen skal testes statisk med 14 tonn før bruk.
- Kranbanen skal være 15 meter lang, og spennet bør utnytte mest mulig av hallens bredde som er 4 meter.
- Løpekranen bør benytte seg av verkstedhallens tilgjengelige takhøyde som er 5,08 meter.
- Løpekranen bør være helautomatisk.

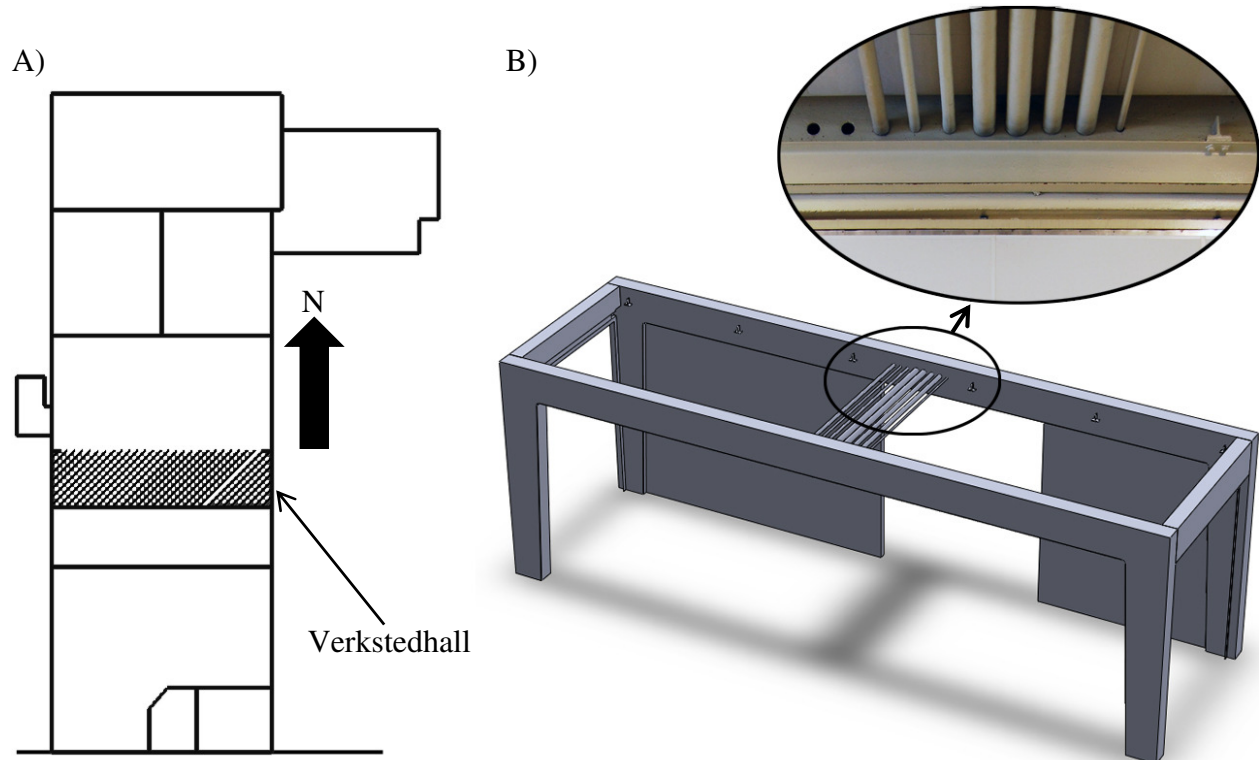
2.2 Utgangspunkt

Viktige betegnelser:



Figur 2: Illustrasjon av en toppkjørende løpekrane med én kranbrudrager. Figuren viser et eksempel på en vanlig løpekrane og betegnelser på dens hovedkomponenter. ^(21, side.1)

Beskrivelse av verkstedhallen:



Figur 3: Figur A viser en romoversikt av verkstedfløy 2 sett ovenfra. Det skraverte området markerer den gjeldende verkstedhallen. Figur B viser en enkel 3D-modell av hallen sett fra nordvest, sammen med et utsnitt av den sørlige kranbanen og hindringer som må tas hensyn til. Disse hindringene består av utkragerbjelker samt rør som krysser verkstedhallen. Dører, tak og golv er ikke inkludert i denne 3D-modellen.

Det er bestemt at kranbanens lengde ikke skal overstige 15 meter. Det vil da være en god nok avstand mellom kranbanen og hallens kortvegger samtidig som at hele hallens lengde vil bli utnyttet.

Takhøyden er i utgangspunktet 5,48 meter høyt, men begrenses av rør som krysser hallen på tvers. Den tilgjengelige takhøyden settes til 5,08 meter for å sikre at løpekransen ikke kolliderer med rørene.

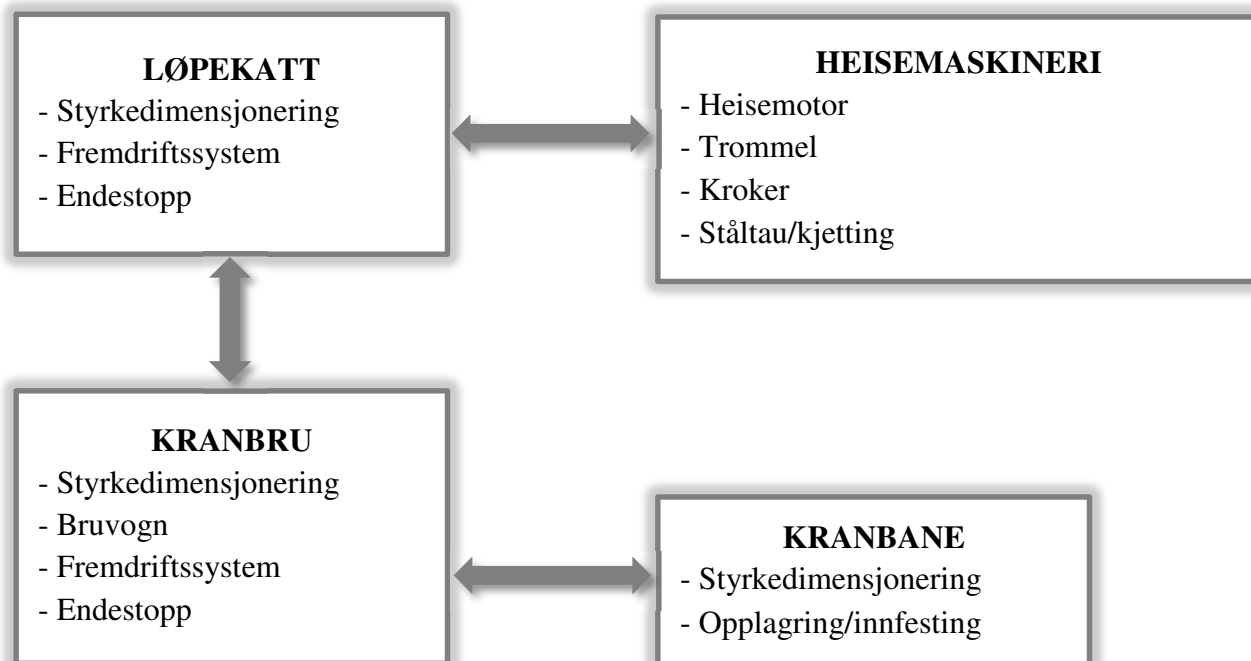
Verkstedhallens langvegger består som vist i figur 3-B av en solid vegg på den sørlige siden, og på den nordlige siden er den åpen, men med en ramme i taket og på kortveggene som angir hallens avgrensning. Avstanden mellom rammene er 4 meter. Den sørlige langveggen har en døråpning på midten, noe det burde tas hensyn til slik at den nye løpekransen ikke hindrer tilgjengelig framkomst.

Den eksisterende løpekransens kranbane er opplagret i faste utkragerbjelker som går tvers igjennom bygningens struktur. Hver kranbanebjelke er skrudd fast igjennom sin øvre flens til 6 T-bjelker. Bygningsstrukturen som bjelkene holdes fast i er full av armering, og bjelkene vil nok ikke kunne rives ut ifølge verkstedsjef Bjørn Brenna (samtale, 19. januar 2012). Det vil derfor være hensiktsmessig å vurdere om man kan benytte seg av disse i konstruksjonen.

2.3 Konseptdrøfting

2.3.1 Funksjonsanalyse

Konstruksjonselementer og noen avhengigheter (avhengigheter er angitt med piler):



Kranbane

Kranbanen må bestå av en bjelke på hver langvegg der kranbrua skal kjøre. Dimensjoneringen av kranbanen er noe avhengig av vekten på resten av utstyret i tillegg til nyttelasten. Plassering og formen på kranbanen vil legge føringer på hvordan kranbrua skal ligge på skinnene da det hele er begrenset av tilgjengelig takhøyde og andre faktorer.

Kranbru

Kranbrua må bestå av en eller flere bjelker som strekker seg på tvers av hallen. På endene må den ha bruvogner som bjelkene hviler på. Denne bruvogneren må ha et fremdriftssystem som fører hele kranbrua langs kranbanen. Utformingen er styrt av hvordan bruvogneren skal kjøre på kranbanen. I tillegg er det et krav at det skal være en sikring slik at kranbrua ikke skal kunne kjøre av kranbanen.

Løpekatt

Løpekattens funksjon er og opplagre heisemaskineriet samt å ha et fremdriftssystem som fører den langs kranbrua. I tillegg burde det være en sikring som hindrer løpekatten fra å kjøre inn i kranbanen eller bruvogneren. Løpekattens utforming er styrt av hvordan den skal ligge på kranbrua i tillegg til at den skal tilpasses heisemaskineriet.

Heisemaskineri

Heisemaskineriet består av mange deler, men de som har mest å si for løpekattens utforming er heisemotoren samt trommelen på grunn av deres størrelse. Det er også en del sikkerhetsbestemmelser som inngår under dimensjonering og valg av heisemaskineriets deler.

2.3.2 Kranbanen

Det er to løsninger på samspillet mellom kranbanen og kranbrua som er tilsynelatende mest vanlig hos de mange leverandørene av løpekraner:

Toppkjørende:



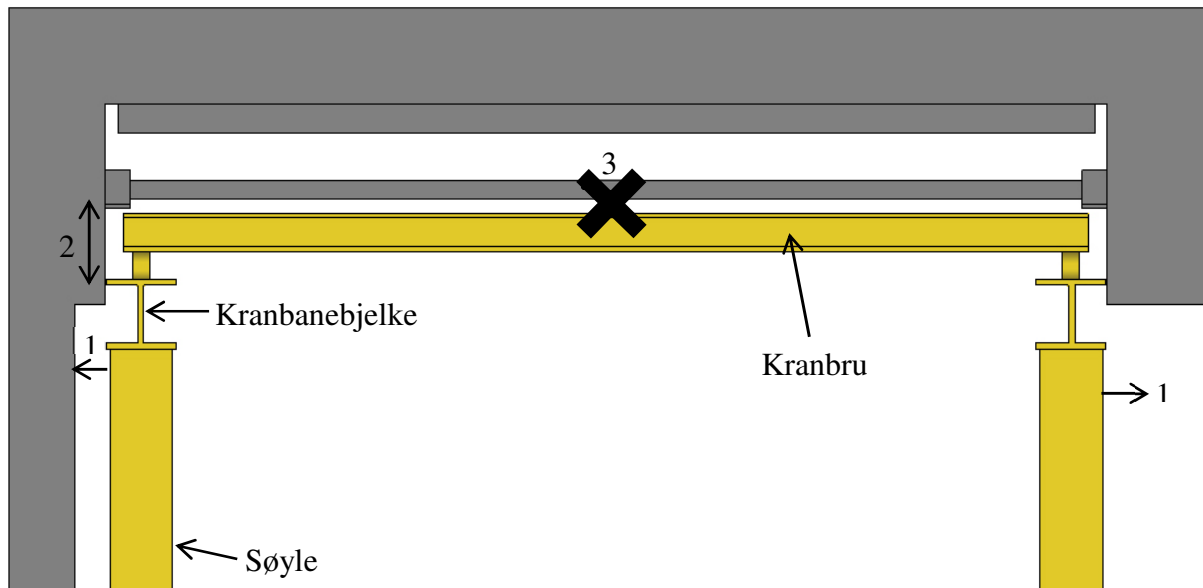
Figur 4: Bilde av en toppkjørende løpekran fra ABUS Crane Systems. ⁽¹⁷⁾ Det vises at kranbrua består av to dragere og at bruvognene kjører oppå kranbanebjelkene. Bildet antyder at denne kranen har en maksimalt tillatt last på 16 tonn.

Underhengende:



Figur 5: Bilde av en underhengende løpekran fra Crane Tec. ⁽¹⁹⁾ Det vises at kranbrua består av én drager og at bruvognene henger på kranbanebjelkenes nederste flens. Bildet antyder at denne kranen har en maksimalt tillatt last på 5 tonn.

Toppkjørende løpekran er en solid og enkel utforming. Bruvognen kjører som regel oppå en skinne som ligger på toppen av en H-bjelke. I dette tilfellet der det er bestemt at utkragerbjelkene ikke kan opplagre løpekranen alene (punkt 3.3.5), må det brukes søyler til opplagring av kranbanen. I tillegg må kranbanen befinne seg en del lavere enn utkragerbjelkene siden det ikke er nok takhøyde til både kranbanen og kranbrua, og bjelken vil da mest sannsynlig blokkere noe av døråpningen som finnes på den sørlige langveggen. Kranbanen må også sikres fra å bevege seg innover i rommet enten ved å ha en bjelke som strekker seg mellom de to kranbanene, og/eller innfestinger som holder søylene inntil veggen. En positiv side ved at kranbanen må senkes er at måten løpekatten kjører på kranbrua ikke blir så begrenset av takhøyden.



Figur 6: Illustrasjon av hvordan en toppkjørende løsekran kunne ha sett ut i dette tilfellet. Det grå er bygningsstrukturen og det gule er løsekranstrukturen. Pil 1 viser hva som menes med at kranbanen må sikres fra å bevege seg. Pil 2 viser at det må tas hensyn til at det må være nok plass mellom kranbanen og eventuelle hindringer for å få plass til kranbrua. Kryss 3 markerer problemet med at det må tas hensyn til løsekrans høyde, og om den igjen må være toppkjørende eller underhengende. Alle disse forholdene påvirker hverandre og hvordan det hele skal utformes.

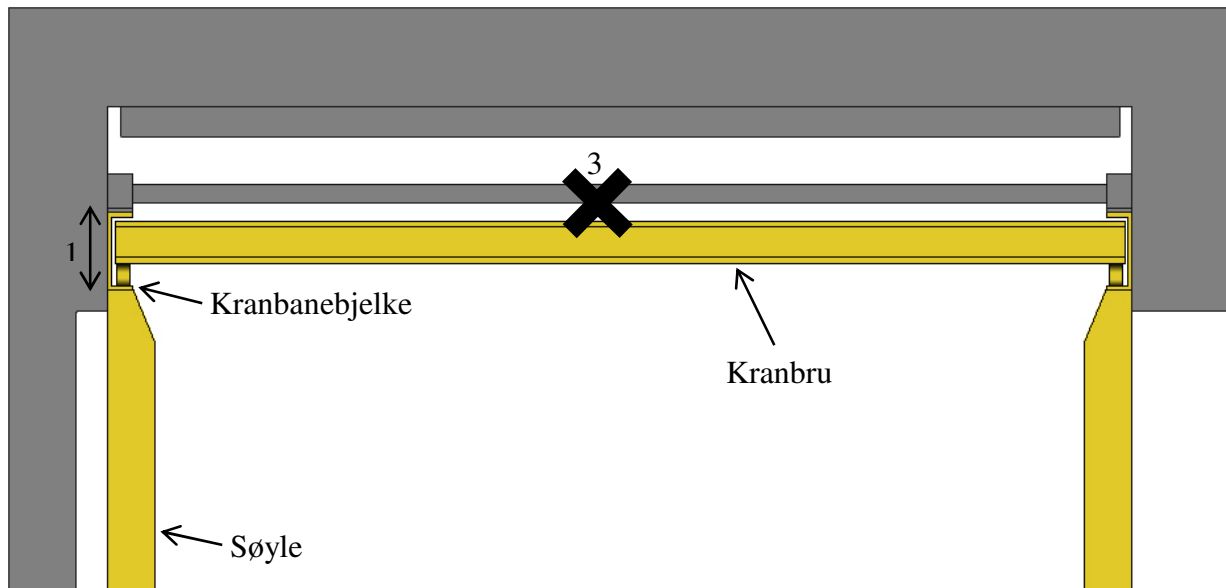
Underhengende løsekraner har som regel en lavere kapasitet enn toppkjørende løsekraner. I følge Dearborn Overhead Crane er den praktiske grensen for underhengende løsekraner en lastekapasitet rundt 15 tonn, og optimalt rundt 7,5 tonn. ⁽²⁰⁾ Det lønner seg også med underhengende der det er hensiktsmessig og opplagre kranbanen i taket eller en overhengende bjelke. I tillegg kan det være hensiktsmessig der det skal være flere kranbanesystemer.

I dette tilfellet er det ingen åpenlyse grunner til at det skulle brukes en underhengende løsekran. Utkragerbjelkene kan ikke brukes til opplagring, og det er ingen tilgjengelige festepunkter i taket. Det måtte i så fall bygges en slags ramme som kranbanen kunne henges fra, men dette er lite hensiktsmessig da det vil føre til mer materialbruk og dermed høyere kostnader.

En tredje løsning som også er brukt på den eksisterende løsekranen er å la bruvognen kjøre inni et kanalstål. Bruk av denne løsningen ville være gunstig ved at man får brukt søyler som opplagring og utkragerbjelkene som horisontal sikring av kranbanen. Noen problemstillinger med denne løsningen er at bruvognas høyde blir begrenset av kanalstålet, og at kanalstålets nederste flens må bære lasten. Sistnevnte blir noe hjulpet i de punktene der bjelken er opplagret av søyler. Ved å bruke utkragerbjelkene har man også sikret kranbanen fra å bevege seg inn i rommet, og man har da løst problemet med at nordveggen er åpen.



Figur 7: Bilde av den eksisterende kranbanen.



Figur 8: Illustrasjon av hvordan en løsning med kanalstål kunne ha sett ut i dette tilfellet. Det grå er bygningsstrukturen og det gule er løpekranstrukturen. Pil 1 viser at det må tas hensyn til at det må være nok plass imellom kanalstålets flenser for å få plass til bruvognen. Kryss 3 markerer problemet med at det må tas hensyn til løpekattens høyde og at den her må være underhengende. Da kranbanebjelkene er festet til utkragerbjelkene vil det ikke være fare for at kranbanen beveger seg inn i rommet.

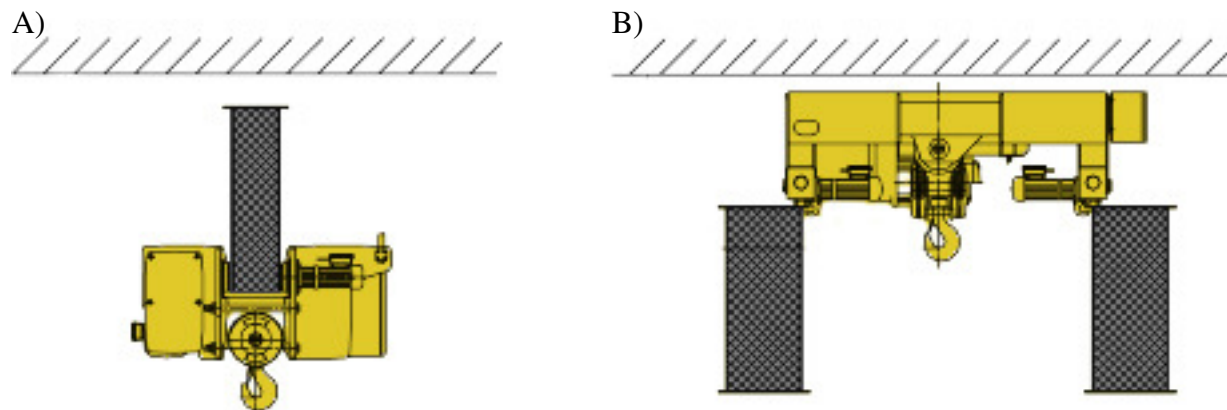
Tabell 2: Fordeler og ulemper med de forskjellige løsningene på kranbanen.

Toppkjørende	Underhengende	Kanalstål
<ul style="list-style-type: none"> + Robust. + Kranbanens høydeplassering blir ikke låst. + Symmetrisk belastning av bjelkeprofilen. - Nødvendig med støttende struktur (søylar). - Krever opplagring mot bevegelse innover i rommet, noe som blir vanskelig på nordveggen. - Den sørlige veggens døråpning blir noe blokkert i høyden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mindre robust. - Lite hensiktsmessig. + Symmetrisk belastning av bjelkeprofilen. - Krever i dette tilfellet mye støttestruktur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Høy belastning av flens. - Hele kranstrukturens utforming begrenses med tanke på høyde. - Ikke-symmetrisk belastning av bjelkeprofilen. - Nødvendig med støttende struktur (søylar). + Behøver ingen ekstra opplagring mot bevegelse innover i rommet. + Kan benytte seg av utkragerbjelkene for ekstra avstivning. + God utnyttelse av plassen.

2.3.3 Kranbrua

Det som inngår i utformingen av kranbrua er hovedsakelig om det skal være en eller to bjelker, hvordan løpekatten skal ligge på bjelken(e) og hvordan bruvognen skal se ut.

Kranbruer med flere bjelker har selvfølgelig høyere kapasitet, men da spennet i dette tilfellet er forholdsvis kort er ikke dette styrkemessig nødvendig. Grunnen til å bruke to bjelker vil være om man ønsker at løpekatten skal kjøre oppå bjelkene i stedet for å henge nederst på bjelkens flens.



Figur 9: Illustrasjon av hvordan løpekatten sitter på bjelken ved en kranbrua med én bjelke (A) og en kranbrua med to bjelker (B). ^(18, side 9) I figur A vises det hvordan løpekatten henger i bjelkens nederste flens, og i figur B vises det hvordan løpekatten kan kjøre når kranbrua består av to bjelker.

Ved bruk av én bjelke må det tas hensyn til horisontale massekrefter ved for eksempel plutselig oppbremsing eller støt. I motsetning til IPE-bjelker er det ved bruk av HE-B-bjelker ikke nødvendig med ekstra horisontal avstivning. ^(4, side. 172) Dette er fordi HE-B-bjelker har godt nok motstandsmoment om svak akse.

Tabell 3: Drøfting av løsninger på kranbrua sammen med kranbane.

	Toppkjørende kranbrua	Løsning med kanalstål
Kranbrua med en bjelke og underhengende løpekatt	<ul style="list-style-type: none"> + Mulig. - Får ikke brukt utkragerbjelkene til opplagring og avstigning. 	<ul style="list-style-type: none"> + Mulig. + Lite materialbruk og lite vekt i forhold til alternativene.
Kranbrua med to bjelker og toppkjørende løpekatt	<ul style="list-style-type: none"> + Mulig. + Robust - Mye materialbruk og høy vekt i forhold til alternativene. - Kranbanen må senkes såpass mye for å få plass til kranbane og løpekatt at døråpning på sørveggen vil bli begrenset. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ikke mulig/ugunstig da det ikke vil bli noe særlig tilgjengelig plass oppå kranbrua.

2.3.4 Valg strukturell utforming

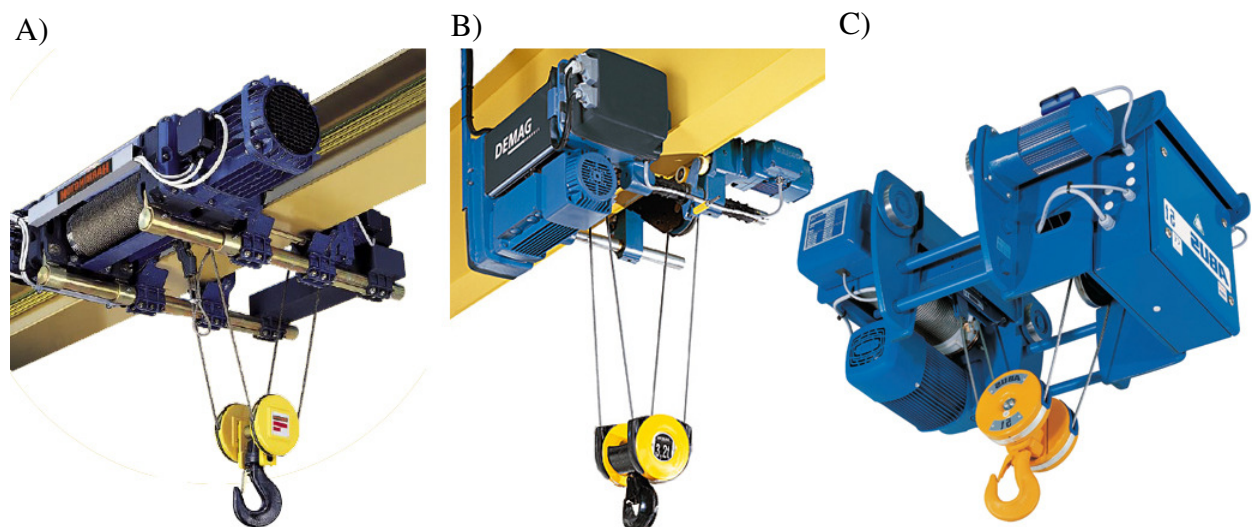
Det velges å bruke én HE-B-bjelke som kranbru, og løpekatten skal henge på bjelkens nederste flenser. Velger å bruke et valset standardprofil i stedet for sveiste og tilpassede bjelker da dette mest sannsynlig vil gi lavere tilvirkningskostnader og mindre/enklere styrkeberegninger. Et tilpasset bjelkeprofil kunne ha gitt en lettere kranbrudrager, men da egenvekten av denne delen blir så liten i forhold til nyttelasten vil ikke dette ha noe særlig å si for resten av strukturen.

Kranbanen skal bestå av kanalstål, og kranbrua skal kjøre på dens nederste flens. Ved å velge denne løsningen, behøver ikke kranbanen og senkes slik at den vil stjele noe av dørhøyden på sørveggen. Den viktigste årsaken til valget av denne løsningen er at man får full utnyttelse av utkragerbjelkene, både til avstivning av kranbanen, og ved at man slipper ekstra innfestning av søylene til veggen. En slik innfestning ville ha satt permanente spor i bygningskonstruksjonen, og ville ført med seg usikkerhet i forhold til bygningskonstruksjonens kvalitet og kapasitet. I tillegg ville det ha blitt vanskelig å gjennomføre dette siden nordveggen er åpen.

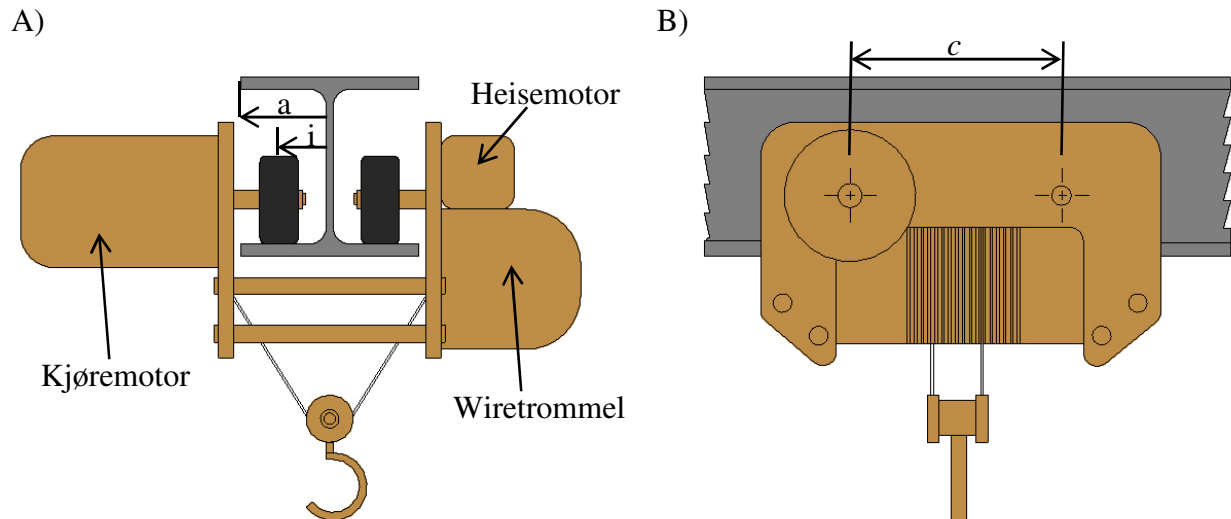
Den største utfordringen med denne løsningen vil være å gjøre beregninger på styrken til kanalstålets nederste flens. En slik løsning ser ikke ut til å være veldig vanlig, og den er ikke direkte dekket i tilgjengelige standarder slik som f.eks. symmetrisk utnyttelse av en I-bjelkes nederste flens. I tillegg vil kanalstålets profil ikke bli symmetrisk belastet, og det må vurderes om den vil tåle eventuelle torsjonskrefter som vil oppstå.

2.3.5 Løpekatt og heisemaskineri

Under dette punktet settes det krav til utformingen av løpekatten basert på avgjørelser tatt under punkt 2.3.4. Det vil også vises et forenklet forslag til hvordan løpekatten kan utformes, sammen med en oversikt over maskineriets viktigste komponenter. Dette gjør det mulig å beregne resten av løpekranens struktur med å ta hensyn til løpekattens utforming og vekt.



Figur 10: Eksempler på underhengende løpekatter. ^(24, 25, 18) Figur A viser en løpekatt fra Harrington Hoists, figur B viser en løpekatt fra Demag, og figur C viser en løpekatt fra Abus. Alle disse tre produktene er lagd for å kjøre på en I-bjelkes nederste flens.



Figur 11: Illustrasjon av en tenkt løpekatt med heisemaskineri. Figur A viser løpekatten sett forfra og figur B viser løpekatten sett fra siden. Lengden c er avstanden mellom hjulene i kjøreretning, a er avstanden fra bjelkens steg og ytterst til flensen, og i er avstanden fra bjelkens steg og ut til der hjulkraften fra løpekatten er. Denne illustrasjonen er en forenklet tegning og har kun med noen av de viktigste komponentene.

De viktigste faktorene ved løpekatten og dens heisemaskineri er vekta, avstanden c imellom hjulene, og forholdet mellom i og a som vist i figur 11.

Ser i diverse kataloger at løpekatter med en kapasitet på rundt ti tonn som regel veier mellom 600 og 1300 kg. ^(21 side 4, 23 side 9, 24 side 4) Velger derfor å sette løpekattens vekt til 1300 kg ved beregninger av løpekranens struktur, og vil da mest sannsynlig være på den sikre siden.

Avstanden c har en del å si for spenningene i kranbrubjelken. Velger å sette en minimumsverdi på 200 mm for å ha en dimensjon å forholde seg til i beregningene. Dette er en lav verdi og en konservativ antagelse.

Forholdet mellom i og a har mye å si for spenningen som kranbrubjelkens nederste flens opplever. I standarden NS 5514 er det en beskrivelse av hvordan en skal sjekke disse lokale spenningene som oppstår, og utfra denne informasjonen velges det å sette en maksimalverdi på forholdet mellom i og a til 0,6. ^(3, side 117) Dette vil sette noen styrkemessige krav til løpekatten sin utforming, spesielt i området rundt hjulakslingene, men vil på den andre siden hindre kranbrubjelken i å bli unødvendig stor.

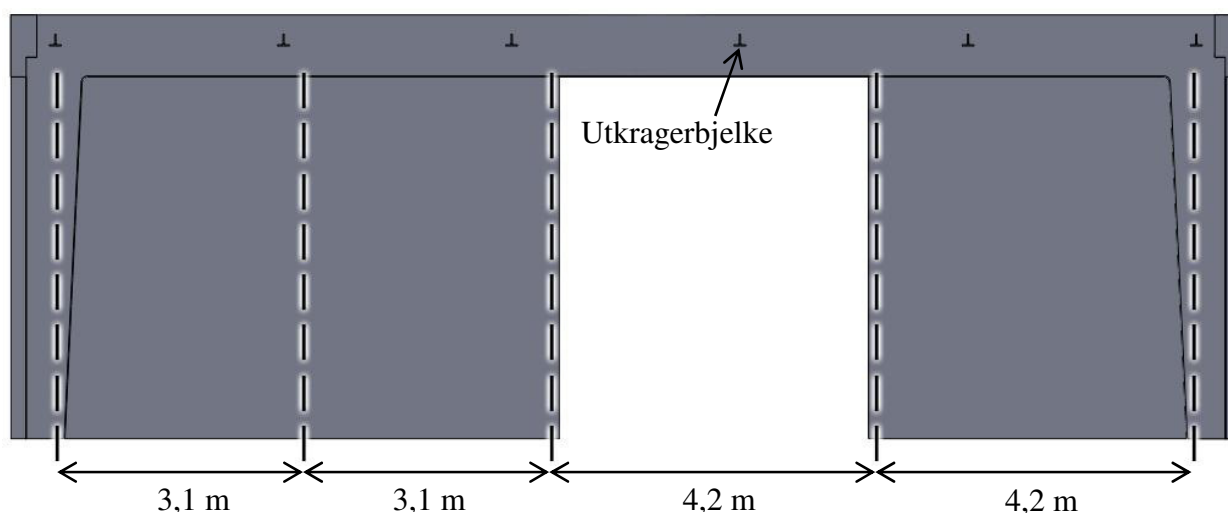
2.4 Formgiving og design

2.4.1 Opplagring av kranbane

Vertikal opplagring av kranbanen:

Det er bestemt at kranbanen skal bestå av kanalstål som er opplagret av søyler sammen med en ekstra horisontal opplagring og avstivning fra utkragerbjelkene. Antall søyler har en påvirkning på kranbanebjelkenes kapasitet, i tillegg til at de vil avgrense den tilgjengelige plassen og fremkomsten i verkstedhallen.

Det kan være et godt utgangspunkt å ha la døråpningen på sørveggen være uhindret. Dette gjør at søylenes layout ikke blir symmetrisk, men at største avstand imellom de ikke vil overstige rundt 4 meter.

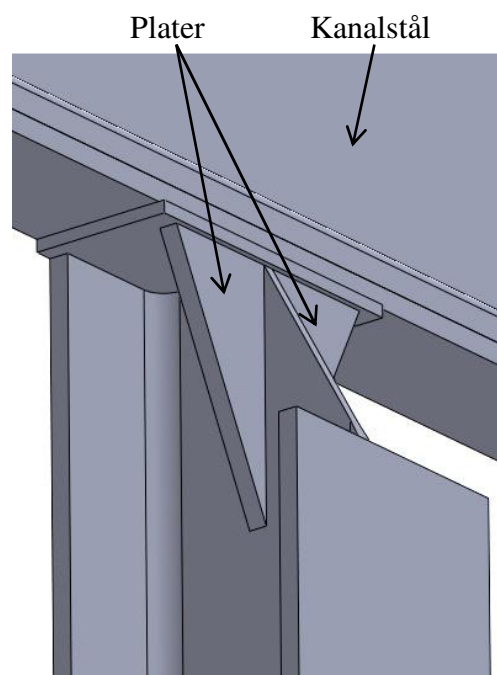


Figur 12: Illustrasjonen viser verkstedhallens sørvegg. De stiplede linjene markerer hvor søylene skal stå. Plasseringen vil være lik på nordveggen.

Søylene skal bestå av en HE-B-bjelke der flensens flate peker innover i rommet. Bjelkeprofilen vil ha god motstand mot bøyning innover i rommet, men vil beholde noe fleksibilitet til bøyning av kranbanen. I tillegg vil alle flater være synlige og tilgjengelige for visuell inspeksjon.

I toppen må bjelken tilpasses slik at den opplagrer lasten fra kranbanebjelken når kranbrua kjører over. Det vil her være gunstig å sveise på plater slik at kanalstålets belastede flens blir støttet opp nedenfra.

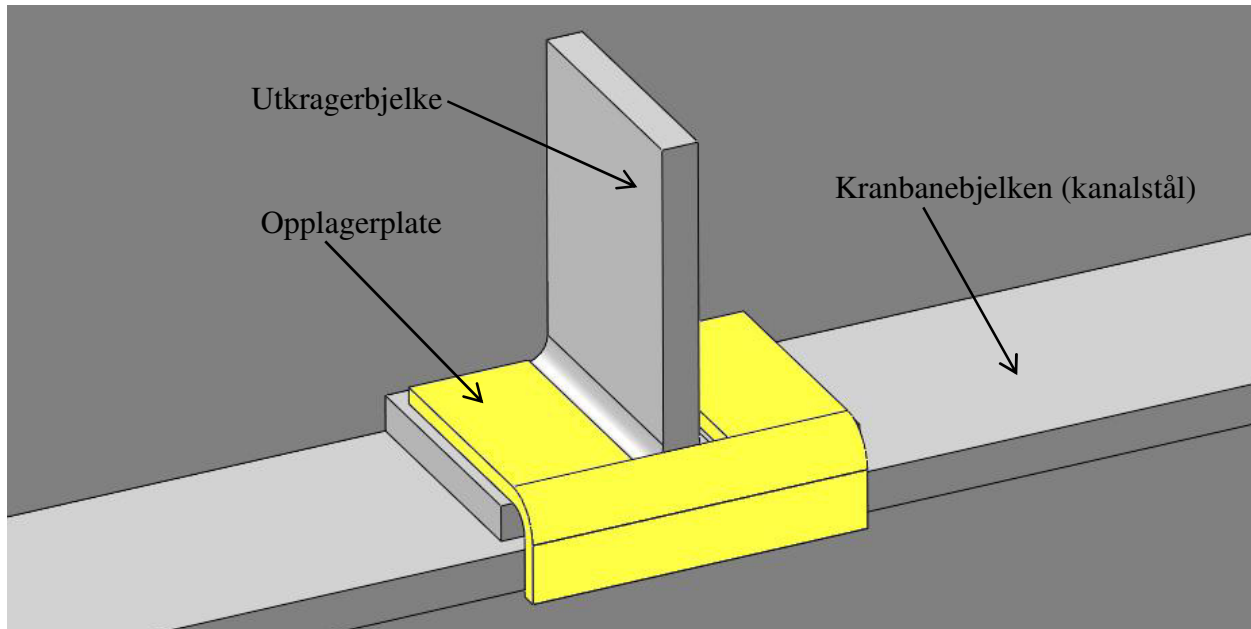
Her er det viktig å utforme delene slik at det blir plass til sveis for å binde delene sammen. Det er valgt ikke å bruke bolter siden det ikke er plass til at de kan stikke opp igjennom kanalstålets flens.



Figur 13: Illustrasjon av innfestningen mellom søyle og kranbanebjelken.

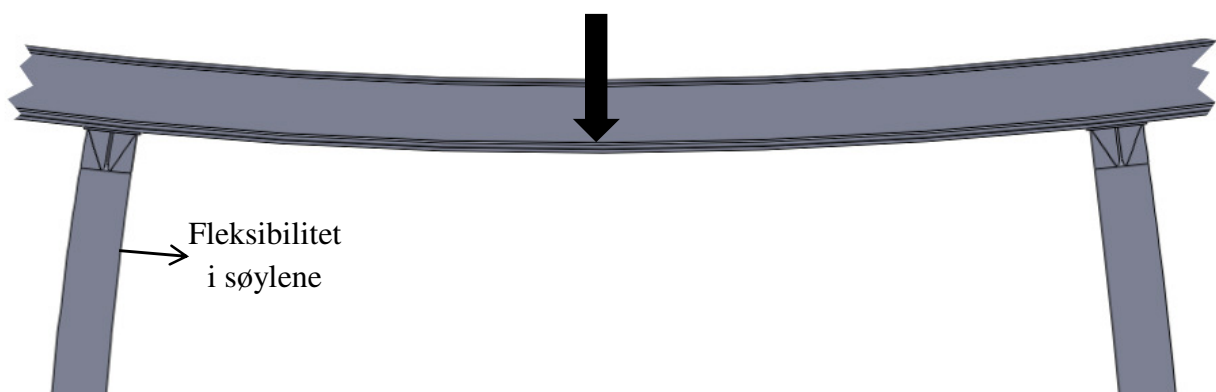
Horisontal opplagring av kranbanen:

Selv om det er funnet ut at utkragerbjelkene ikke er sterke nok til og opplagre kranbanen (punkt 3.3.5), passer de fortsatt utmerket til å sikre kranbanen inntil til veggen, i tillegg til å bidra med avstivning mot rotasjon av kanalstålet.



Figur 14: Illustrasjon av hvordan kranbanen skal holdes inntil veggen.

Det er ingen krefter som vil forsøke å velte kranbanen innover i rommet, men uansett er det viktig at den sikres på en slik måte at det ikke er noen fare for at den velter ved uforutsette påkjenninger. En opplagerplate som vist i figur 14 vil hindre kranbanen i å velte inn i rommet, samtidig som den lar kranbanen få bevege seg fritt i sin lengderetning. Sistnevnte er nødvendig for å unngå kritiske spenninger i kranbanebjelken på grunn av materialutvidelse ved store temperaturforandringer. Utformingen etterlater også en del fleksibilitet i kranbanen slik at det ikke blir så stor spenning i dette opplageret eller i forbindelsen mellom kranbanebjelken og søylene.

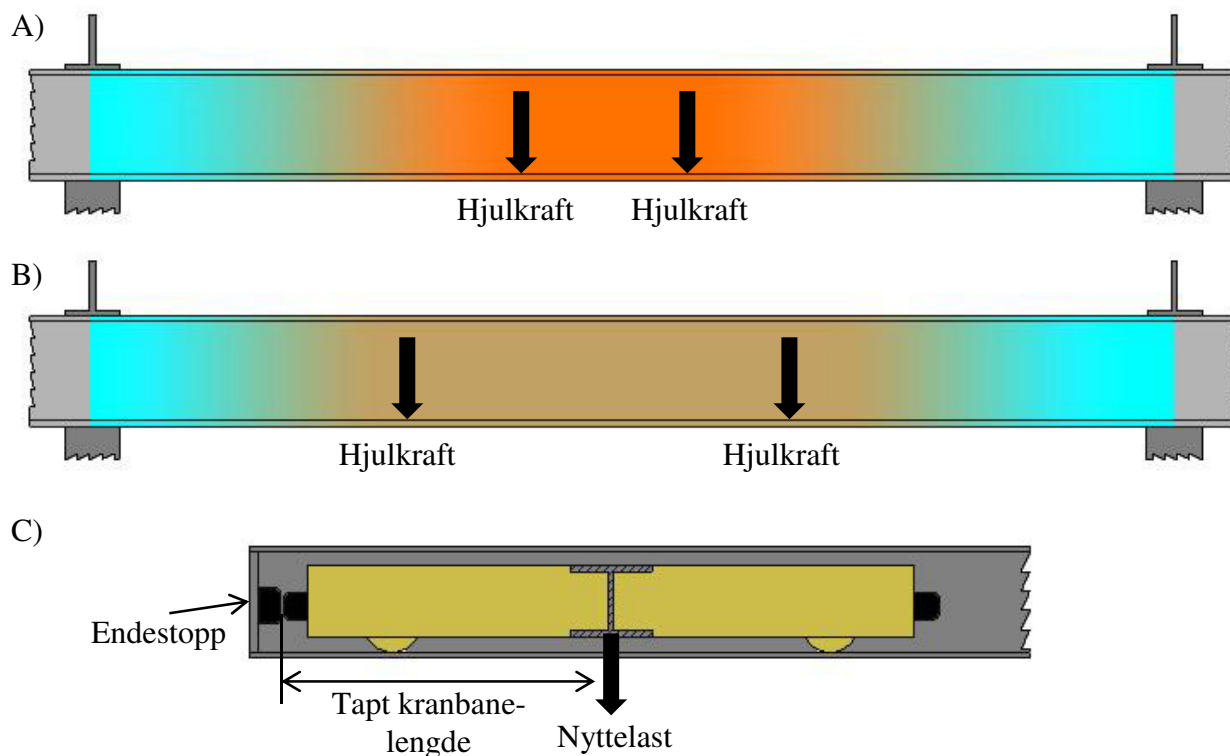


Figur 15: Illustrasjon av hva som menes med fleksibilitet i kranbanen. Pilen representerer belastningen fra kranbrua. Om kranbanen hadde vært fast innspent i mange punkter, ville disse opplagerpunktene blitt utsatt for store krefter.

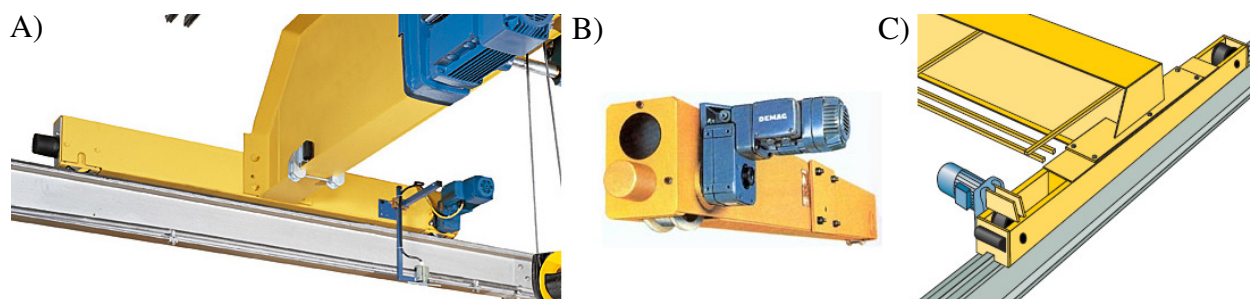
Opplagerplata må sveises fast i utkragerbjelken siden det ikke er plass til at bolter kan stikke ut inne i kanalstålet.

2.4.2 Designelementer ved bruvognen

Da det er bestemt under punkt 2.3.4 at kranbrua skal kjøre inni et kanalstål, vil dette sette noen begrensninger på bruvognas dimensjoner. Bruvognen må ha en viss lengde med hjul i hver ende for at kranbrua ikke skal kunne vris ut av kjørebanen, og for å minke belastningen på kranbanen. På den annen side så vil en lang bruvogn behøve et større/sterkere stålprofil på grunn av bøyemomentet som oppstår i den, i tillegg til at mindre av kranbanens lengde vil bli utnyttet. Det er også viktig at det blir plass til kjøremaskineriet, uten at dette krasjer med drager eller løpekatt.



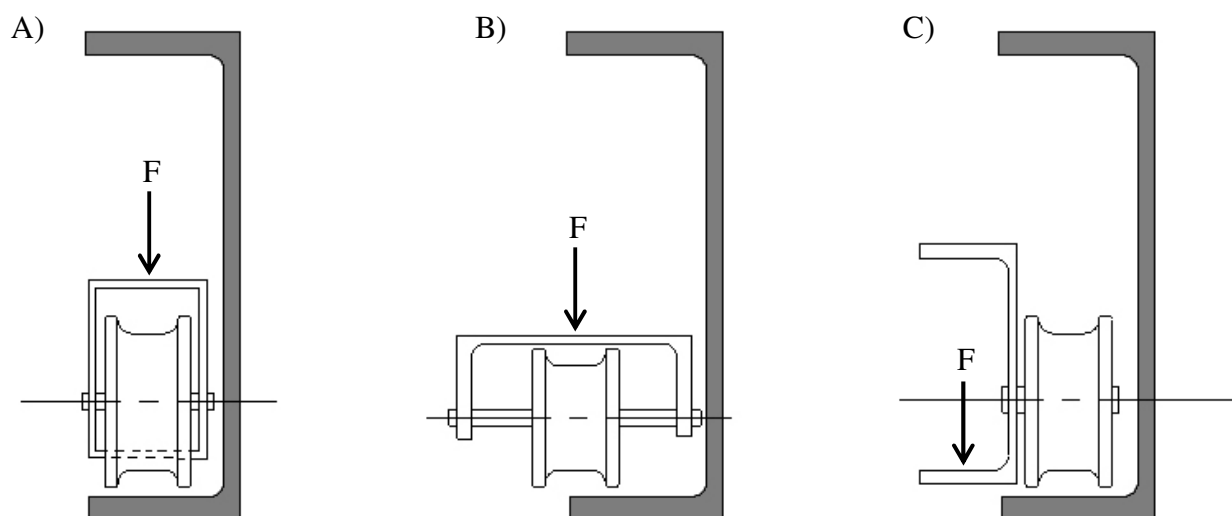
Figur 16: Figur A og figur B viser hvordan bøyespenningen i kranbanebjelken blir større jo mindre avstanden imellom bruvognens hjul er. Det grå er kranbanen med opplager i hver ende, og fargene skal illustrere bøyespenningen og dens intensitet i kranbanebjelken. Figur C viser hvordan en alt for lang bruvogn vil stjele noe av kranbanelengden. Det lysbrune er bruvognen, det grå er kranbanebjelken, og det sorte er endestoppet som hindrer kranbrua i å kjøre ut av kranbanen.



Figur 17: Figur A viser en bruvogn på en løpekran fra Demanor, figur B viser det samme bare fra en annen vinkel, og figur C viser bruvognen på en løpekran fra Munck Cranes. Det er tydelig at det er vanlig med et firkantprofil der kranbrudrageren hviler oppå, eller er boltet inn i siden, og hvor en elektromotor sitter direkte på et av hjulene. Figur 7 viser den eksisterende løsningen der det brukes et kanalstål i stedet. ^(25, 26, 22)

De åpnbare valgene når det kommer til bjelkeprofilen på bruvognen er firkantprofil eller kanalstål. Fordelen med firkantprofil vil være at den har en hel langvegg ekstra i motsetning til kanalstålet som er åpen på en side. Denne vegg vil være med på å gjøre bjelken stivere og mer holdbar mot bøyemomentet den vil oppleve. I tillegg er kanalstålprofilene mer begrenset når det kommer til dimensjoner. I dette tilfellet er det nødvendig at steget er kort og at flensene er lange på kanalstålet, men på et standard kanalstål er det som regel omvendt.

Et annet alternativ er å gjøre som det er gjort på den eksisterende løpekranen der det er lagt et kanalstål på siden for så å feste kranbruas drager innimellom flensene. Hjulet er festet på motsatt side. En ulempe med denne løsningen er at hjulene ikke er opplagret på begge sider, og deres kulelager vil bli skjevt belastet.



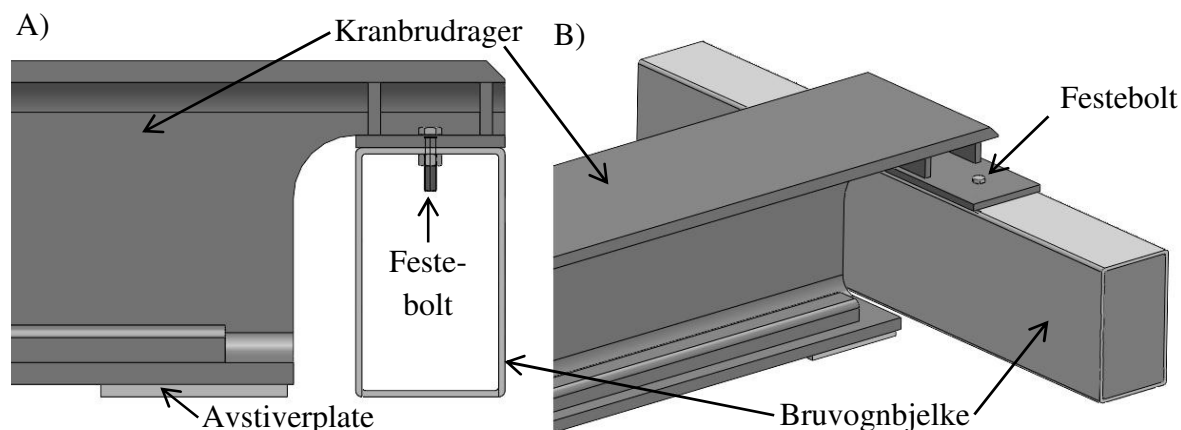
Figur 18: Illustrasjon av de tre eksemplene på valg av bruvognen sin bjelkeprofil som er drøftet. Figur A viser løsningen med firkantprofil, figur B viser løsningen med kanalstål, og figur C viser løsningen med et kanalstål snudd på siden. F er lasten fra kranbrudrageren og nyttelasten.

Løsning B er nok den minst hensiktsmessige, mens løsning C kan passe bra om kranbanebjelkens dimensjoner begrenser bruvognas størrelse. Det er derimot gjort tidlige beregningsestimater som viser at dette mest sannsynlig ikke vil være noe problem, og det velges derfor å bruke et firkantprofil til bruvognen. Her vil hjulene bli opplagret på begge sider.

2.4.3 Designelementer ved kranbrua

Det må bestemmes hvordan kranbruas drager skal festes til bruvognen. En problemstilling er da om forbindelsen skal sveises eller boltes. Kranbrudrageren er nødt til å stå helt vinkelrett på bruvognen for å unngå unødig slitasje på bruvognas hjul. Bruk av sveis kan da bli problematisk siden stålet kan slå seg slik at det oppstår små deformasjoner.

Bruk av bolter kan forenkle monteringsprosessen, og det vil være enklere å sikre at kranbrudrageren blir stående vinkelrett på bruvognen.



Figur 19: Bildet viser enden av kranbrudrageren og dens forbindelse til bruvognen. Figur A viser forbindelsen sett fra siden, og figur B viser forbindelsen sett i perspektiv. Detaljer ved bruvognen som hjul og motor er utelatt.

Som vist i figur 19 bæres kranbrudrageren av bruvognas struktur, og det vil ikke oppstå spesielt store spenninger i sveis eller bolter. Det reduserte tverrsnittet i enden kranbrudrageren er nødvendig for at det hele skal få plass inni kranbanebjelken. I tillegg sørger denne utformingen for at det er en del fleksibilitet i bjelken. Om forbindelsen hadde vært veldig stiv, så ville alle rykk, napp og støt som blir påført nyttelasten også bli overført direkte på kjøremaskineriet til bruvognen.

Når løpekatten kjøres fram og tilbake på bruvognen, utsettes denne forbindelsen for dynamiske belastninger, og det er viktig å ta hensyn til dette. Den buede kanten i enden på kranbrudragerens steg er derfor nødvendig for å motvirke sprekkdannelse i dette området.

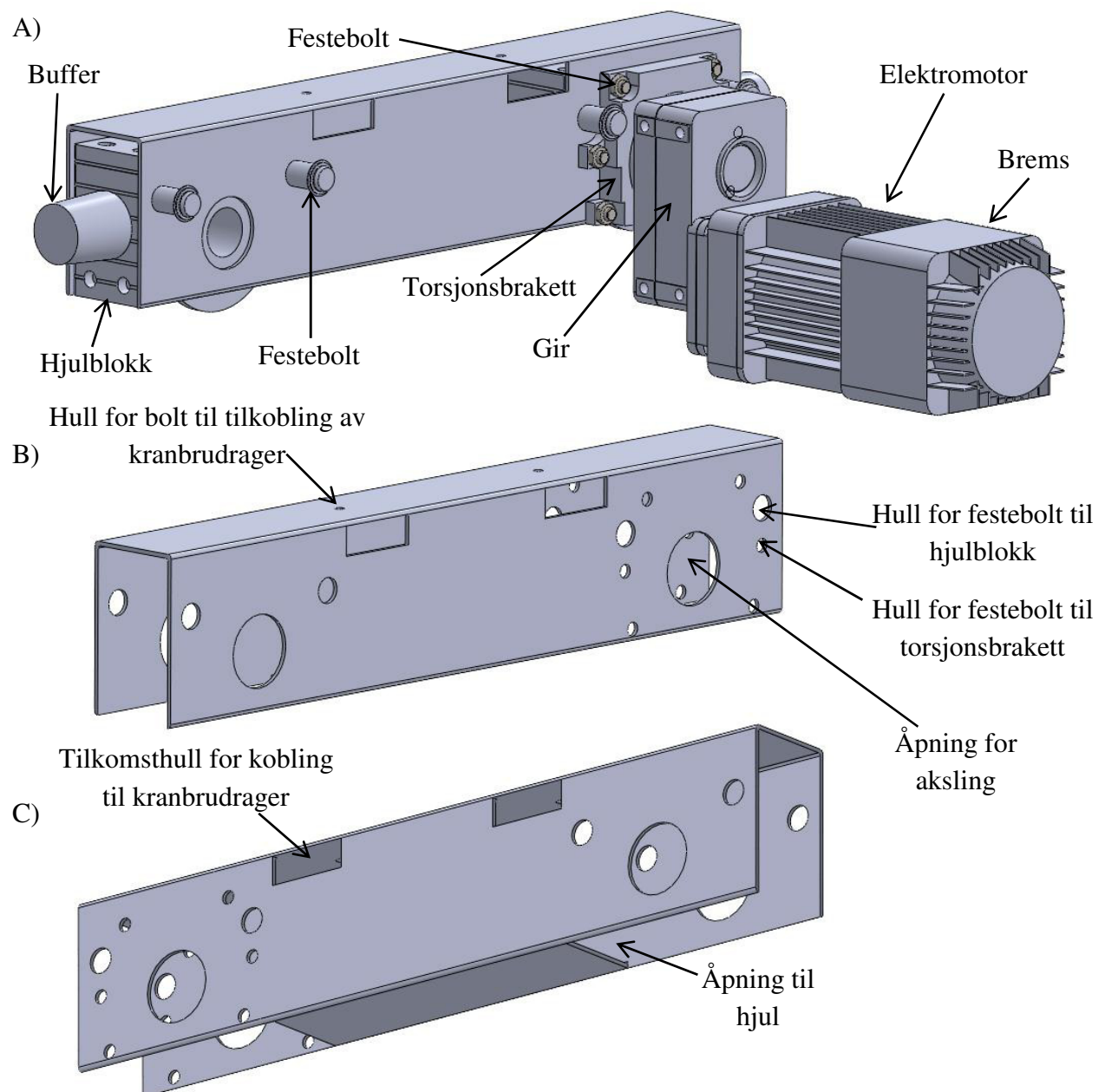
Når løpekatten står i ytterste stilling nærmest bruvognen, blir kranbrudragerens nederste flens utsatt for høye spenninger i enden av bjelken. Det er derfor valgt å sveise på en ekstra plate i underkant av flensen for å forsterke dette området.

2.4.4 Kjøremaskineri

Kjøremaskineriet til bruvognen skal bestå av en elektromotor koblet et av hjulene på hver av bruvognene. Her var det et alternativ å bruke delt drivverk med en felles aksling imellom hjulene, og dette kunne ført med seg lavere kostnader da det kun trengs en elektromotor. I tillegg kunne dette ha sikret synkronisering av hjulene. På en annen side ville dette ha krevd en større motor på grunn spennet, og mer vedlikehold på grunn av økningen i antallet komponenter.

Det velges også å bruke passende hjulblokker på bruvognene. Disse skal bestå av en komplett hjulsats i kassett med hjul og lager. Dette er valgt for å begrense oppgavens omfang.

Videre vises tilpasninger av bruvognas bjelke som må gjøres for at kjøremaskineriet skal passe.



Figur 20: Figur A viser bruvognen med kjøremotor, festebolter, torsjonsbrakett og hjulblokker med buffere. Figur B viser bruvogna sett skrått fra siden, og figur C viser bjelken sett nedenufra.

2.4.5 Kranskinner

Hjulene til løpekatten og hjulene til kranbruas bruvogner skal ferdes på kranskinner. Dette vil hindre slitasje på kranstrukturens materiale, og hjulene. I tillegg vil dette sikre en rett kjørebane. Skinnene skal være av typen flate kranskinner, med en bredde på 50 mm og en høyde på 30 mm. Profilets dimensjoner er oppgitt i Norsk Stål sin produktkatalog, men detaljerte dimensjoner som radien i de øverste hjørnene er ikke oppgitt. ⁽¹⁶⁾ Antar at de er 10 mm. Kranskinnene er laget av stålqualiteten S355JO.



Figur 21: Bilde av kranskinnenes profil.

Ved montering av kranskinnene kan det være gunstig å finjustere avstanden imellom skinnene slik at den passer traverskranens spenn helt nøyaktig. Der flere skinnelengder må skjøtes sammen er det anbefalt med sveiste skjøter. ^(3, side 116)

2.4.6 Hastigheter

Løpekranens hastigheter består av løftehastighet, løpekattens hastighet og kranbruas hastighet. En løpekran med for lave hastigheter vil sinke verkstedets effektivitet og vil være en irritasjon for de som bruker den. Er derimot hastigheten for stor kan dette føre med seg farer ved bruk av løpekranen. For å bestemme hastighetene kan man stille seg følgende spørsmål:

1. Er det mye folk og aktivitet i området der løpekranen er?
2. Hvor nøyaktig skal løpekranen være?
3. Over hvor lange avstander skal nyttelasten bevege seg?
4. Hvor mye brukes løpekranen?

Verkstedhallen er ikke et spesielt folksomt sted, men kan til tider være fullt av uerfarne studenter. Løpekranen skal brukes både til å flytte maskiner og ved montasje. Det kan derfor være hensiktsmessig å ha valget mellom to hastigheter der den ene brukes ved montasje og den andre brukes når løpekranen bare skal flyttes på. Løpekranen skal kun dekke et areal på ca. 4 ganger 15 meter, og blir ikke spesielt mye brukt. Det vil derfor ikke gå særlig mye utover verkstedets effektivitet om hastighetene holdes lave. Den nåværende løftehastigheten er ca. 4,8 og 0,54 m/min. Kranbrua beveger seg langs kranbanen med en hastighet på ca. 12 m/min. Løpekatten forflyttes manuelt og er ikke begrenset til noen hastighet. De verkstedansatte er fornøyd med den nåværende hastigheten ifølge Bjørn Brenna (samtale, 22. februar 2012).

Velger på bakgrunn av dette å begrense løftehastigheten til maksimalt 6 m/min, og i tillegg skal den ha en annen hastighet på rundt 0,6 m/min for bruk i situasjoner der det behøves større nøyaktighet. Ser ingen grunn til å øke kranbruas hastighet, og setter dermed denne til maksimalt 12 m/min. Løpekattens maksimale hastighet settes til det samme som kranbrua sin hastighet.

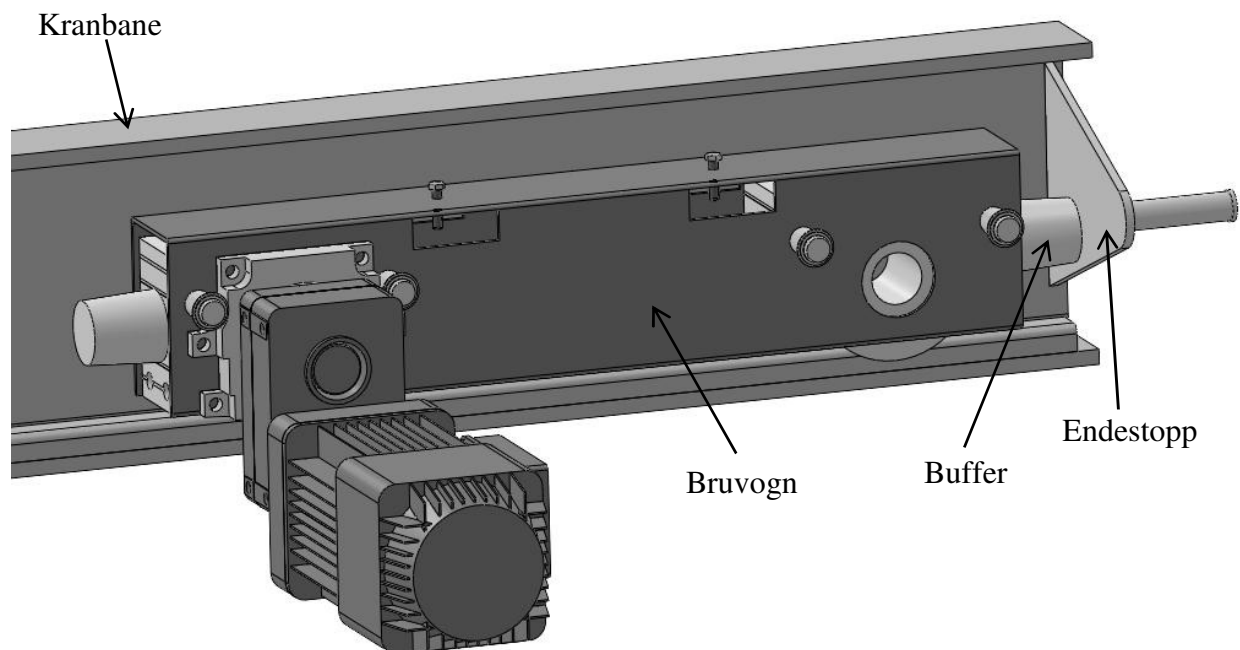
Nyttelasten vil dermed bruke i overkant av et minutt på å reise på langs av verkstedhallen, og i underkant av et minutt på å heises fra gulvet og opp til taket.

2.4.7 Endestopp

Det skal befinne seg endestopp i begge ender av kranbanen. Disse skal ha til hensikt å stoppe kranbrua fra å kjøre ut av kranbanen, og kan utformes som en plate der bufferne vil treffe om kranbrua kjøres helt til enden.

Det er en mulig løsning at strømmen til kjøremaskineriet kuttes når bufferen treffer endestoppet, men dette går under elektronikk og automasjon, og dekkes ikke i denne oppgaven.

Det skal også være endestopp på kranbrua som hindrer løpekatten i å kjøre av kranbrudrageren. Denne endestoppen må tilpasses løpekatten, og dekkes derfor heller ikke i denne oppgaven.



Figur 22: Bildet illustrerer endestoppet og dens funksjon. Den viser en bruvogn som er kjørt helt til enden av kranbanen og hvor bufferen møter endestoppet. Endestoppet består av en plate og et rør som fører stoppkreftene direkte til bygningsstrukturen.

3. GRUNNLAGSBEREGNINGER

3.1 Klasse- og gruppeinndeling

3.1.1 Klassifisering av den strukturelle gruppen

Det er nødvendig å bestemme løpekranens gruppertilhørighet for å kunne finne riktige tilleggsfaktorer fra standarden NS 5514. For å bestemme hvilken krangruppe denne løpekranen hører til, må man først klassifisere bruks- og lastklassen:

Bruksklassene deles inn i fire grupper A, B, C og D der antall heisesykluser vokser fra A til D. Ifølge verkstedsjef Bjørn Brenna vil løpekranen bli brukt ca. en gang hver 5. – 6. uke (samtale, 19. januar 2012). Løpekranen vil dermed havne under bruksklasse A – Uregelmessig drift fulgt av lange hvileperioder.

Tabell 4: Tabell for valg av bruksklasse. ^(3, s. 6, tabell T-1.11)

Bruksklasse	Bruksfrekvens for løftebevegelsen	Antall lastcykler
A	Uregelmessig drift fulgt av lange hvileperioder.	$6,3 \cdot 10^4$
B	Regelmessig drift med periodevis belastning.	$2 \cdot 10^5$
C	Regelmessig drift med intensiv belastning.	$6,3 \cdot 10^5$
D	Intensiv, høy belastning, f.eks. ved mer enn ett skift.	$2 \cdot 10^6$

Lastklassene deles inn i fire grupper 0, 1, 2, 3 der gruppe 0 er svært lett, og gruppe 3 er tungt. Da noe av intensjonen med den nye løpekranen er å kunne øke løftekapasiteten, og det i tillegg finnes mindre kraner på verkstedet for å ta seg av lettere løft, er det rimelig og å putte den inn under gruppe 3 – Kran som regelmessig løfter last opp mot tillatt arbeidslast.

Tabell 5: Tabell for valg av lastklasse og krangruppe. ^(3, side 7, tabell T-1.121 og side 9, tabell T-1.13)

Lasttilstand	Bruksklasse			
	A	B	C	D
0 – Kran som unntaksvis løfter tillatt arbeidslast, og som normalt løfter små laster	1	2	3	4
1 – Kran som sjelden løfter tillatt arbeidslast, og som normalt løfter laster på omkring 1/3 av maksimal last.	2	3	4	5
2 – Kran som ofte løfter tillatt arbeidslast, og som normalt løfter laster mellom 1/3 og 2/3 av maksimal last.	3	4	5	6
3 – Kran som regelmessig løfter last opp mot tillatt arbeidslast.	4	5	6	6

Løpekranens struktur havner dermed innunder krangruppe 4, og tilleggsfaktor M blir lik 1,06. ^(3, s. 21, tabell T-1.34)

Denne tilleggsfaktoren tar hensyn til en viss sannsynlighet for overskridelse av de beregnede spenninger på grunn av ufullkomne beregningsmetoder og uforutsette omstendigheter. ^(3, s. 20)

3.2 Statiske krefter, momenter, sikkerhet mot flyt og nedbøyning

Spenninger i konstruksjonen beregnes på grunnlag av aktuelle lasttilfeller gitt av standarden NS 5514 ved bruk av vanlige regler for fasthetsberegning. Diverse metoder og formler er tatt fra, og utledet i boka "Løfte- og transportmaskiner" ⁽⁴⁾. Dimensjoner, masse og andre statiske verdier til bjelkeprofiler brukt i oppgaven er gitt i vedlegg C.

3.2.1 Lasttilfeller

Lasttilfelle 1: Kran i arbeid uten vind

Dette tilfellet er det som løpekranen hovedsakelig vil bli utsatt for. Her tar man hensyn til tilleggsfaktoren M , lasten fra konstruksjonens egenvekt S_G , nyttelasten S_L multiplisert med en dynamisk faktor ψ , og horisontale massekrefter S_H .

$$S_{total} = M (S_G + \psi S_L + S_H) \quad (1)$$

der $M =$ Tilleggsfaktor for stålkonstruksjoner.

$S_G =$ Last fra konstruksjonens egenvekt. Innebærer hovedsakelig løpekattens egenvekt.

$\psi =$ en dynamisk faktor som tar hensyn til svingningene som oppstår ved løfting av lasten. Laster fra akselerasjon og fra vertikale sjokkbelastninger på nyttelasten dekkes også av denne faktoren. ^(3, side 12)

$S_L =$ kraften fra den maksimale nyttelasten på 10 tonn.

$S_H =$ de horisontale massekreftene i kranbrua som oppstår ved for eksempel plutselig oppbremsing eller akselerasjon av kranbrua eller løpekatten.

Dynamisk faktor ψ :

$$\psi = 1 + \zeta V_L \quad (2)$$

der $\zeta =$ en eksperimentelt bestemt faktor, og som er 0,6 for traverskraner. ^(3, s. 11)

$V_L =$ løftehastigheten i m/s. Verdien er bestemt i punkt 2.4.6 – "Hastigheter".

$$\psi = 1 + (0,6 \cdot 0,1) = 1,06$$

Den dynamiske faktor skal ikke være lavere enn 1,15. Setter derfor ψ til **1,15**. ^(3, side 11)

Last fra nyttelast S_L :

$$S_L = g \cdot m \quad (3)$$

der $g =$ gravitasjonskonstanten i m/s^2 .

$m =$ nyttelasten i kg.

$$S_L = 9,81 \cdot 10\,000 = \mathbf{98\,100\,N}$$

Horisontale krefter S_H :

Ved akselerasjon eller retardasjon av kranbrua eller løpekatten vil det oppstå krefter fra kranbrua og løpekattens masse, i tillegg til en kraft som følge av at nyttelasten vil få en liten pendeleffekt. Det er gitt en veiledning i standarden NS 5514 på hvordan en kan finne denne belastningen, men denne metoden er omfattende og består av en rekke faktorer. I boka "Løfte- og transportmaskiner" står det derimot at de horisontale massekreftene i kranbrua som oppstår ved for eksempel plutselig oppbremsing, i praksis tas med som $1/10$ av det vertikale bøyemomentet midt på kranbrua ^(4, side 172). Siden løpekranens hastigheter er relativt lave antas det at denne forenklingen er holdbar.

For horisontalhastigheter under $0,7$ m/s skal det ikke tas hensyn til bufferkrefter. ^(3, side 16) I dette tilfellet er den satt til $0,2$ m/s. Bufferkrefter oppstår ved kjøring mot endestopp, og kan virke på konstruksjonen eller den opphengte lasten.

Lasttilfelle 2: Kran med ekstraordinær last (lasttilfelle 3 i NS 5514)

Ekstraordinær last er i dette tilfellet når kranen er under prøving. Dette vil si at nyttelasten skal ganges med en faktor $\rho_1 = 1,25$ under dynamisk prøving, og en faktor $\rho_2 = 1,4$ under statisk prøving. ^(3, side 102)

Den største av de følgende lastkombinasjoner velges:

$$S_{total} = S_G + \psi \rho_1 S_L \quad (4)$$

$$S_{total} = S_G + \rho_2 S_L \quad (5)$$

3.2.2 Klimatiske laster

Da løpekranen vil befinne seg inne i en verkstedhall tas det ikke hensyn til vind- og snølast. Det tas derimot hensyn til temperaturvariasjoner der deler ikke kan utvide seg fritt. Maksimal temperaturvariasjon skal ifølge NS 5514 være fra -20 til 45 °C. ^(3, side 20) Denne variasjonen er generell for mange krantyper, også utendørs kraner. Det velges derfor å stille krav til at løpekranstrukturen skal tåle denne temperaturvariasjonen i ubelastet tilstand, og en variasjon imellom 10 og 40 °C ved full belastning.

3.2.3 Tillatte spenninger og deformasjoner i kranstrukturen

Tillatte spenninger i konstruksjonselementer ^(3, side 22 og 23)

For stål der forholdet mellom flytegrensen σ_E og strekkfastheten σ_R er mindre enn $0,7$ er den tillatte spenningen σ_a i lasttilfelle 1 som følger:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_E}{1,5} \quad (6)$$

der $\sigma_a =$ tillatt spenning.

$\sigma_E =$ materialets flytegrense.

Og for lasttilfelle 2:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_E}{1,1} \quad (7)$$

Den tillatte skjærspenningen τ_a finnes på følgende måte:

$$\tau_a = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Ser med en gang at disse verdiene inneholder den største sikkerheten. Ser også utfra faktorene at ved dimensjonering med hensyn på flyt i materialet, vil lasttilfelle 1 være dimensjonerende. Det vil derfor ikke alltid være nødvendig å gjøre en sjekk av lasttilfelle 2. Der det ikke dimensjoneres etter hensyn på flyt i materialet vil det derimot være viktig å gjøre en sjekk av lasttilfelle 2. Dette gjelder blant annet der det er fare for knekking eller vipping.

Videre vises tillatte spenninger for noen aktuelle stålqualiteter som benyttes i oppgaven.

Tabell 6: Tabellen viser de tillatte spenningene i to materialer som er mye brukt i oppgaven. *S* står for stål, og de etterfølgende tallene angir materialets flytegrense.

Lasttilfelle	Spenningstype	Stålqualitet S235 [MPa]	Stålqualitet S355 [MPa]
1	σ_a	156	236
	τ_a	90	136
2	σ_a	213	322
	τ_a	123	186

Tillatte spenninger i skrueforbindelser ^(3, side 24)

Der skruer utsatt for strekk skal den beregnede spenningen ikke overstige:

$$\sigma \leq 0,65\sigma_a \quad (9)$$

der $\sigma_a =$ tillatt strekkspenning for materialet i skruen.

Der skruer er utsatt for avskjæring skal skjærspenningen τ i en enkelsnittet forbindelse ikke overstige:

$$\tau = 0,6\sigma_a \quad (10)$$

Tillatte deformasjoner

De nåværende regler fastsetter ingen maksimal tillatt nedbøying, ^(3, side 32) men nedbøyningen f i bjelker der hjul ferdes bør ikke overskride lengden delt på 600, da motstanden for bevegelse blir uforholdsmessig stor. ^(4, side 172)

$$f_{\text{till}} = \frac{l}{600} \quad (11)$$

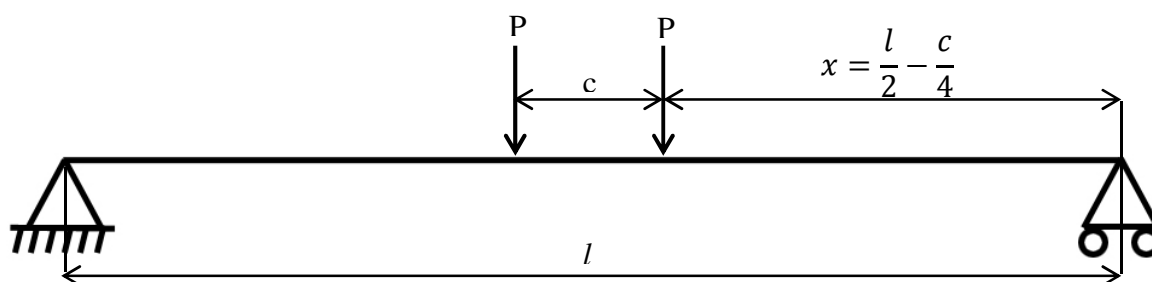
3.3 Dimensjonering

3.3.1 Kranbruas drager

Det er bestemt at kranbrua skal bestå av en bjelke med et HE-B profil. Løpekatten skal ferdes på bjelkens nederste flens. Bjelken skal sjekkes for spenninger på grunn av bøyemomentet i det mest ugunstige lasttilfellet. Dette er når løpekatten står i en liten avstand fra bjelkens avstand som vist i figur 23.

I tillegg må det sees på bjelkens maksimale deformasjon, og på spenningene som oppstår i bjelkens nederste flens der løpekatten henger.

Finner det maksimale vertikale bøyemomentet:



Figur 23: Forenklet belastningsbilde der P er hjulkraften per hjul på løpekatten (hver P på illustrasjonen er egentlig $2P$), x er avstanden fra bjelkens ende og fram til løpekatten, og l er bjelkens lengde.

Hjulkraften P :

$$P = 0,25M(S_G + \psi S_L) \quad (12)$$

der S_G = lasten fra løpekatten i N. Verdien er bestemt i punkt 2.3.5.

$$P = 0,25 \cdot 1,06(12753 + (1,15 \cdot 98100)) = 33276 \text{ N} = \mathbf{33,3 \text{ kN}}$$

Det vertikale bøyemomentet M_{bv} :

$$M_{bv} = P \cdot \frac{\left(l - \frac{c}{2}\right)^2}{l} \quad (13)$$

der P = hjulkraften i N.

l = bjelkens lengde i mm.

c = hjulenes avstand til hverandre i mm. Verdien er bestemt i punkt 2.3.5.

$$M_{bv} = 33276 \cdot \frac{\left(4000 - \frac{200}{2}\right)^2}{4000} \cdot 10^{-3} = \mathbf{126 \text{ 532 Nm}}$$

Velger å bruke en bjelke av stål med flytegrense på 355 MPa, og den tillatte spenningen σ_a blir dermed 236 MPa.

Estimerer nødvendig bjelkestørrelse utfra det vertikale bøyemomentet:

Nødvendig tverrsnittsmodul om sterk akse W_x :

$$W_x = \frac{M_{bv}}{\sigma_a} = \frac{126532}{236} \cdot 10^3 = \mathbf{536\ 153\ mm^3} \quad (14)$$

Ser utfra tekniske tabeller at det vil være nødvendig med et HE200B-profil.

Sjekker bøyepeningen når det tas hensyn til bjelkens egenvekt og horisontal belastning:

Det vertikale bøyemomentet M_{bv} :

$$M_{bv} = P \cdot \frac{\left(l - \frac{c}{2}\right)^2}{l} + \frac{ql^2}{8} \quad (15)$$

der q = lasten fra bjelkens egenvekt i N/mm.

$$M_{bv} = 126532 + \frac{601 \cdot 10^{-3} \cdot 4000^2}{8} \cdot 10^{-3} = \mathbf{127\ 734\ Nm}$$

Det horisontale bøyemomentet M_{bh} :

$$M_{bh} = \frac{M_{bv}}{10} = \frac{127734}{10} = \mathbf{12\ 773\ Nm} \quad (16)$$

Den totale spenningen σ_{tot} :

$$\sigma_{tot} = \frac{M_{bv}}{W_x} + \frac{M_{bh}}{W_y} = \frac{127734 \cdot 10^3}{570 \cdot 10^3} + \frac{12773 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3} = \mathbf{288\ MPa} > \sigma_a \quad (17)$$

Ser at det vil være nødvendig med et større bjelkeprofil når det tas hensyn til bjelkens egenvekt og horisontal belastning. Prøver med et HE220B-profil:

$$M_{bv} = P \cdot \frac{\left(l - \frac{c}{2}\right)^2}{l} + \frac{ql^2}{8} = 126532 + \frac{701 \cdot 10^{-3} \cdot 4000^2}{8} \cdot 10^{-3} = 127\ 934\ Nm$$

$$M_{bh} = \frac{M_{bv}}{10} = \frac{127934}{10} = 12\ 793\ Nm$$

$$\sigma_{tot} = \frac{M_{bv}}{W_x} + \frac{M_{bh}}{W_y} = \frac{127934 \cdot 10^3}{736 \cdot 10^3} + \frac{12793 \cdot 10^3}{258 \cdot 10^3} = \mathbf{223\ MPa} < \sigma_a$$

Det vil holde med et HE220B-profil med fokus på sikkerhet mot flyt i materialet.

Sjekker nedbøyningen i bjelken:

Tillatt nedbøyning f_{till} :

$$f_{till} = \frac{l}{600} = \frac{4000}{600} = \mathbf{6,6 \text{ mm}}$$

Total nedbøyning f på midten av bjelken:

$$f = \left(\frac{M(S_G + \psi S_L) + \left(\frac{5}{8}\right) Q}{48EI_x} \right) \cdot l^3 \quad (18)$$

der $Q =$ den totale lasten fra bjelkens egenvekt i N .

$E =$ elastisitetsmodulen for stål i MPa .

$I_x =$ annet arealmoment for bjelkeprofilen i mm^4 .

$$f = \left(\frac{1,06(12753 + (1,15 \cdot 98100)) + \left(\frac{5}{8}\right) 2806}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 80,9 \cdot 10^6} \right) \cdot 4000^3 = \mathbf{10,6 \text{ mm}}$$

Ser at nedbøyningen er for stor. Prøver med et HE260B-profil:

$$f = \left(\frac{1,06(12753 + (1,15 \cdot 98100)) + \left(\frac{5}{8}\right) 3649}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 149,2 \cdot 10^6} \right) \cdot 4000^3 = \mathbf{5,8 \text{ mm}}$$

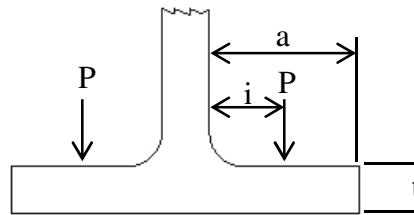
Nedbøyningen er tydeligvis dimensjonerende. Finner bøyespenningene i bjelkeprofilen HE260B for å kunne bruke dette i videre utregninger og ved verifikasjon:

$$M_{bv} = P \cdot \frac{\left(l - \frac{c}{2}\right)^2}{l} + \frac{ql^2}{8} = 126532 + \frac{912 \cdot 10^{-3} \cdot 4000^2}{8} \cdot 10^{-3} = 128\,356 \text{ Nm}$$

$$M_{bh} = \frac{M_{bv}}{10} = \frac{128356}{10} = 12\,836 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{tot} = \frac{M_{bv}}{W_x} + \frac{M_{bh}}{W_y} = \frac{128356 \cdot 10^3}{1150 \cdot 10^3} + \frac{12836 \cdot 10^3}{395 \cdot 10^3} = 144 \text{ MPa}$$

Sjekker sekundærspenninger i bjelkens nederste flens etter forenklede formler ^(3, side 117):



Figur 24: Illustrasjon av delen det regnes på. P er hjulkraften, a er lengden på flensen utfra steget, i er avstanden utfra steget og til der hjulkraften angriper, og t er tykkelsen på flensen.

Lokal sekundærspenning i flens σ_{sek} :

$$\sigma_{sek} = \frac{k \cdot 2P}{t^2} \quad (19)$$

der k = faktor bestemt ut ifra forholdet mellom i og a . ^(3, side 117, figur F-A.IV)
 t = flenstykkelsen i mm.

$$\sigma_{sek} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 33276}{17,5^2} = \mathbf{109 \text{ MPa}}$$

Følge betingelse skal oppfylles:

$$\sigma_{sek} + \sigma_{tot} \leq 0,75\sigma_E \quad (20)$$

$$109 + 144 = 253 \text{ MPa} < 266 \text{ MPa}$$

Betingelsen er oppfylt.

Sjekker bjelken i lasttilfelle 2, og den tillatte spenningen σ_a blir da på 322 MPa:

Bruker den av de følgende to formlene som gir størst hjulkraft:

$$P = 0,25(S_G + \psi\rho_1 S_L) \quad (21)$$

$$P = 0,25(12753 + (1,15 \cdot 1,25 \cdot 98100)) = 38\,443 \text{ N}$$

$$P = 0,25(S_G + \rho_2 S_L) \quad (22)$$

$$P = 0,25(12753 + (1,4 \cdot 98100)) = 37\,523 \text{ N}$$

Finner den totale spenningen:

$$M_{bv} = P \cdot \frac{\left(l - \frac{c}{2}\right)^2}{l} + \frac{ql^2}{8} = 38443 \cdot \frac{10^{-3} \left(4000 - \frac{200}{2}\right)^2}{4000} + 1824 = 148\,004 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{tot} = \frac{M_{bv}}{W_x} = \frac{148004 \cdot 10^3}{1150 \cdot 10^3} = 129 \text{ MPa} < \sigma_a$$

Sjekker lokal sekundærspenning i flens:

$$\sigma_{sek} = \frac{k \cdot 2P}{t^2} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 38443}{17,5^2} = 126 \text{ MPa}$$

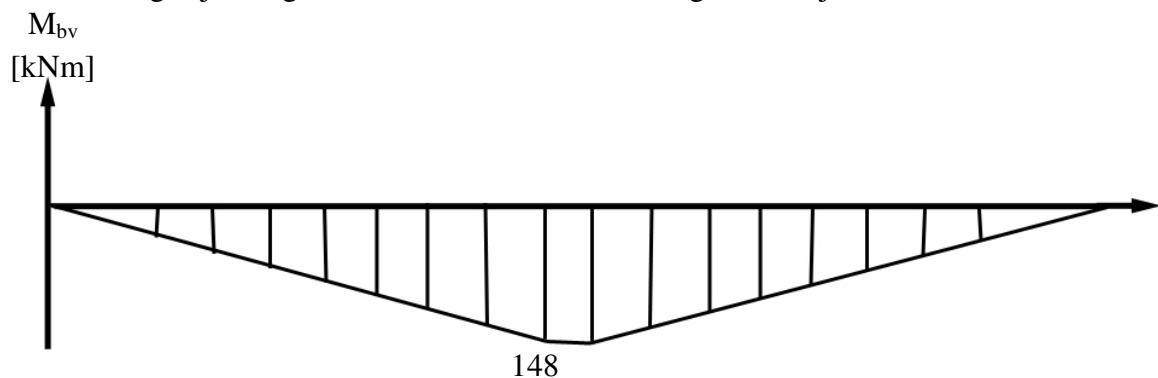
$$126 + 129 = 255 \text{ MPa} < 266 \text{ MPa}$$

Betingelsen er oppfylt.

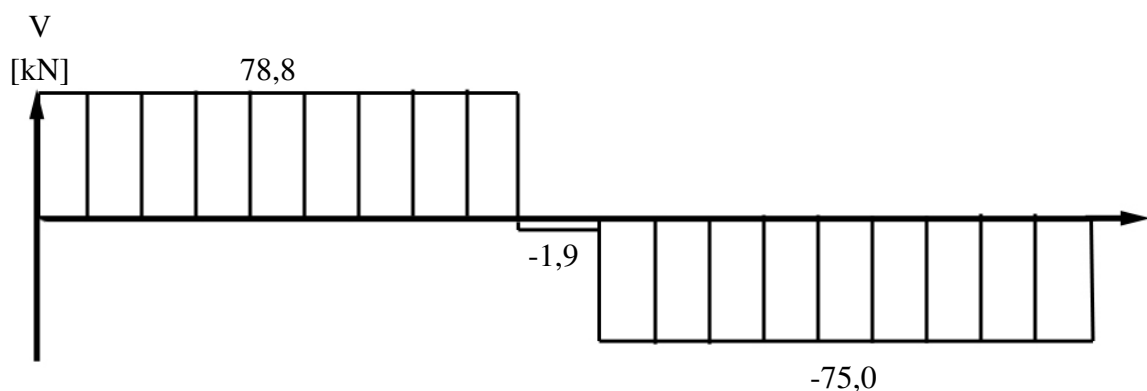
Konkluderer med at en HE260B-bjelke av stål med flytegrense på 355 MPa vil kunne brukes som kranbruas drager. Den samlede spenningen fra bøyespenningen og de lokale sekundærspenningene er tett oppimot den tillatte grensen, men det er gjort såpass med konservative avrundinger igjennom utregningene at dette ikke er grunn til noen bekymring. I tillegg er utregningen verifisert under punkt 5.1.1.

Skjærkraft- og bøyemomentdiagram:

Viser moment og skjærkraftdiagram etter lasttilfelle 2 da dette ga størst hjulkraft:



Figur 25: Bøyemomentdiagram for bjelken i lasttilfelle 2. Maksimalt bøyemoment finnes litt til siden for midten på bjelken og er på 148 kNm.

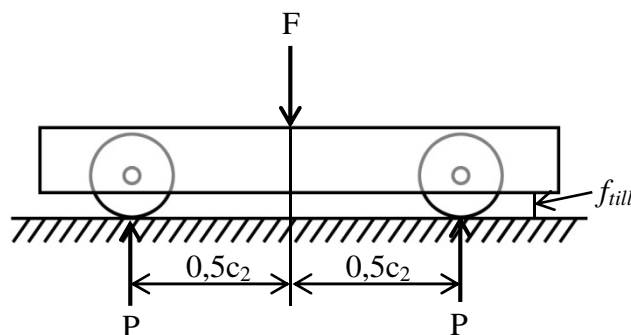


Figur 26: Skjærkraftdiagram for bjelken i lasttilfelle 2. Kraftene er funnet utfra hjulkraften i lasttilfelle 2 og geometrien gitt i figur 23.

3.3.2 Bruvognas bjelke

Det er bestemt at bruvognen skal bestå av et rektangulært hulprofil. Spenninger og maksimal nedbøyning skal sjekkes utfra kreftene som oppstår når løpekatten med nyttelast står helt inntil bruvognen, og ved oppbremsing da bjelken blir utsatt for aksialkrefter.

Finner det maksimale bøyemomentet:



Figur 27: Illustrasjon av bruvognen sett fra siden. Det bestemmes at c_2 skal være 700 mm. P er hjulkraften og F er lasten fra nyttelasten, løpekatten og bjelkevekta når løpekatten står i ytterste stilling, helt inntil bruvognen.

Hjulkraften P :

$$2Pl - M(\psi S_L + S_G) \left(l - \frac{c}{2} \right) - \frac{ql^2}{2} = 0 \quad (23)$$

der l = kranbruas lengde i mm.

c = løpekattens hjulavstand i mm.

q = lasten fra kranbrudragerens egenvekt i N/mm.

$$2P \cdot 4000 - 1,06((1,15 \cdot 98100) + 12753) \left(4000 - \frac{200}{2} \right) - \frac{912 \cdot 10^{-3} \cdot 4000^2}{2} = 0$$

$$P = 65799 \text{ N} = \mathbf{65,8 \text{ kN}}$$

Maksimalt bøyemoment M_b på midten av bruvognen:

$$M_b = 0,5c_2P \quad (24)$$

$$M_b = 0,5 \cdot 700 \cdot 65799 \cdot 10^{-3} = \mathbf{23 \text{ 030 Nm}}$$

Finner den maksimale trykkraften som bjelken blir utsatt for ved nedbremsing:

Tar utgangspunkt i utregningene gjort under dimensjoneringen av kranbruas drager, der det er antatt at de horisontale massekreftene i kranbrua som oppstår ved oppbremsing, tas med som 1/10 av det vertikale bøyemomentet. Finner en tenkt horisontal kraft F_h midt på kranbrudrageren utfra dette:

$$F_h = \frac{4M_{bh}}{l} \quad (25)$$

der M_{bh} = det horisontale bøyemomentet i kranbrudrageren i Nmm.
 l = kranbrudragerens lengde i mm.

$$F_h = \frac{4 \cdot 12773 \cdot 10^3}{4000} = 12\,773\,N = \mathbf{12,7\,kN}$$

Tenker at det mest ugunstige tilfellet er når kranbrua bremses opp samtidig som at løpekatten står i ytterste stilling. Velger derfor å sette F_h som en aksialkraft som virker i bruvognbjelkens lengderetning.

Velger å bruke et 200x120x5 hulprofil da dette passer godt med andre dimensjoner og utstyr. Bjelken skal være av stål med flytegrense på 355 MPa, og den tillatte spenningen σ_a er da 236 MPa.

Sjekker spenningen i dette bjelkeprofil:

$$\sigma_{tot} = \frac{M_b}{W_x} + \frac{F_h}{A} \quad (26)$$

$$\sigma_{tot} = \frac{23030 \cdot 10^3}{168 \cdot 10^3} + \frac{12773}{3070} = \mathbf{141\,MPa} < \sigma_a$$

Sjekker nedbøyningen i bjelken:

Tillatt nedbøyning f_{till} er 10 mm. Denne verdien er tatt fra strukturens geometri, og om nedbøyningen overstiger denne verdien, vil bruvognen ligge nedpå kranbaneskinna.

Finner total nedbøyning f på midten av bjelken. Ser bort ifra bjelkens egenvekt da dens innvirkning er neglisjerbar:

$$f = \frac{Fc_2^3}{48EI_x} \quad (27)$$

der F = lasten fra nyttelasten, løpekatten og bjelkevekta når løpekatten står helt inntil bruvognen i N. Denne må etter likevektsloven være 2 ganger P .

c_2 = avstanden imellom hjulene på bruvogna i mm.

E = elastisitetsmodulen for stål i MPa.

I_x = annet arealmoment for bjelkeprofilen i mm⁴.

$$f = \frac{131598 \cdot 700^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 16,85 \cdot 10^6} = \mathbf{0,3\,mm} < f_{till}$$

Nedbøyningen er neglisjerbar og vil ikke skape noen problemer selv om den muligens ville blitt noe større pga. den horisontale kraften.

Sjekker bjelken i lasttilfelle 2, og den tillatte spenningen σ_a blir da 322 MPa:

Hjulkraften P :

$$2Pl - (\psi\rho_1 S_L + S_G) \left(l - \frac{c}{2} \right) - \frac{ql^2}{2} = 0 \quad (28)$$

$$2P \cdot 4000 - (1,15 \cdot 1,25 \cdot 98100 + 12753)(4000 - 100) - \frac{912 \cdot 10^{-3} \cdot 4000^2}{2} = 0$$

$$P = 75876 \text{ N} = \mathbf{75,9 \text{ kN}}$$

Maksimalt bøyemoment M_b :

$$M_b = 0,5c_2 P = 0,5 \cdot 700 \cdot 75876 \cdot 10^{-3} = \mathbf{26\,557 \text{ Nm}}$$

Total spenning σ_{tot} :

$$\sigma_{tot} = \frac{M_b}{W_x} = \frac{26557 \cdot 10^3}{168 \cdot 10^3} = \mathbf{158 \text{ MPa}} < \sigma_a$$

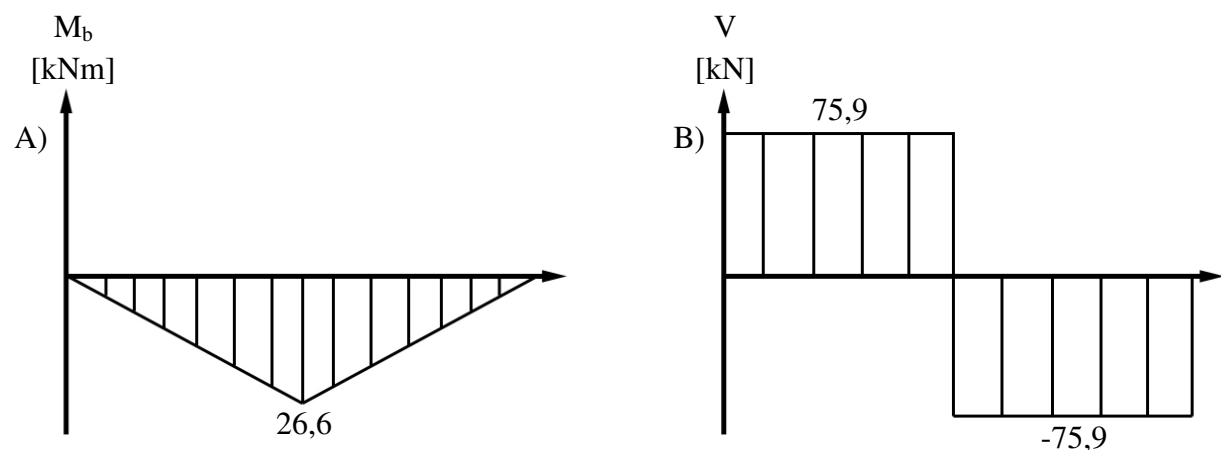
Total nedbøyning f på midten av bjelken:

$$f = \frac{F c_2^3}{48EI_x} = \frac{151752 \cdot 700^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 16,85 \cdot 10^6} = \mathbf{0,3 \text{ mm}}$$

Konkluderer med at et 200x120x5-profil av stål med flytegrense på 355 MPa vil kunne brukes som bruvogns bjelke. Det ser også ut som at det skulle gått bra med en lik bjelke av stål med flytegrense på 235 MPa. Velger å bruke førstnevnte siden bjelken skal kappes og tilpasses i forbindelsespunkter, skruehull osv. Dette fører til et noe svekket tverrsnitt i noen deler av profilet. Utregningen er verifisert under punkt 5.1.3.

Skjærkraft- og bøyemomentdiagram:

Viser moment og skjærkraftdiagram etter lasttilfelle 2 da dette ga størst belastning:



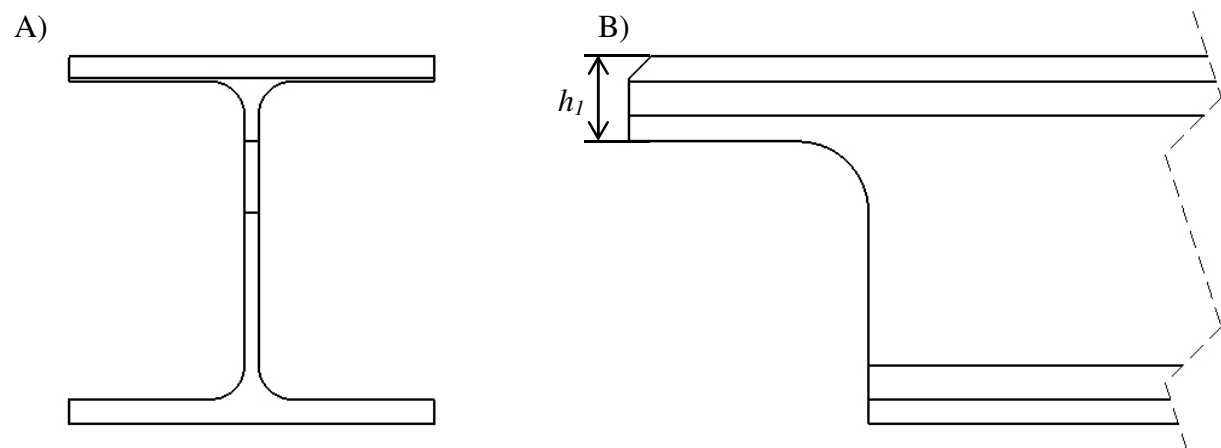
Figur 28: Figur A viser bøyemomentdiagrammet for bruvognen i lasttilfelle 2, og figur B viser skjærkraftdiagrammet for bruvognen i lasttilfelle 2. Største bøyemoment befinner seg på midten.

3.3.3 Forbindelse imellom kranbrua og bruvognen

I området ved forbindelsen imellom kranbrudrageren og bruvognen må det gjøres ekstra beregninger for å sjekke at materialet holder. Dette området er kritisk for løpekranen, og blir utsatt for store og varierende krefter.

Det må vises at det reduserte tverrsnittet til kranbrudrageren holder når løpekatten står helt inntil bruvognen. Skrueforbindelsen imellom kranbrudrageren og bruvognen, i tillegg til sveisene imellom kranbrudrageren og platene må også dimensjoneres. Disse platene skal fordele kraften fra kranbrudrageren utover bruvognbjelken.

Sjekk av kranbrubjelkens tverrsnitt i tilfellet der løpekatten står i ytterste posisjon:



Figur 29: Illustrasjon av kranbrudragerens ende. Figur A viser profilet, og figur B viser enden på profilet sett fra siden.

Beregning av resterende tverrsnitt A_{rest} ved enden av bjelkeprofilet:

$$A_{rest} = (t \cdot b) + s(h_1 - t) + \frac{4r^2 - \pi r^2}{2} \quad (29)$$

- der
- t = tykkelsen på bjelkes flens i mm.
 - b = bjelkens bredde i mm.
 - s = tykkelsen på bjelkens steg i mm.
 - h_1 = høyden på det resterende tverrsnittet i mm.
 - r = radien imellom bjelkens steg og flens i mm.

$$A_{rest} = (17,5 \cdot 260) + 10(60 - 17,5) + \frac{4 \cdot 24^2 - \pi \cdot 24^2}{2} = 5222 \text{ mm}^2$$

Sjekk av vertikal skjærspenningen τ_v . Den tillatte skjærspenningen τ_a er 136 MPa:

$$\tau_v = \frac{F}{A_{rest}} = \frac{131598}{5222} = 25 \text{ MPa} < \tau_a \quad (30)$$

- der
- F = lasten fra nyttelasten, løpekatten og kranbruvekta i N når løpekatten står helt inntil bruvognen, og som er lik $2P$ funnet under dimensjoneringen av bruvognen.

Det blir også nødvendig å se på skjærkreftene som oppstår ved bremsing eller plutselig stopp. Finner den horisontale skjærspenningen τ_h :

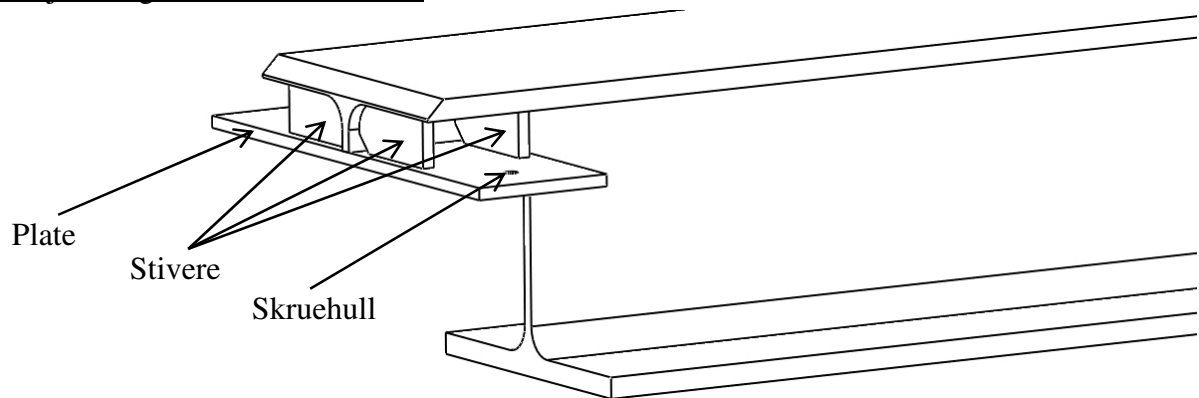
$$\tau_h = \frac{F_h}{A_{rest}} = \frac{12773}{5222} = 3 \text{ MPa} < \tau_a \quad (31)$$

Sjekker kombinasjonen av skjærkreftene:

$$\tau_v + \tau_h = 25 + 3 = 28 \text{ MPa} < \tau_a \quad (32)$$

Det er ingen fare for avskjæring i det resterende tverrsnittet på enden av kranbrudrageren. Resultatet er såpass langt innpå den konservative siden at tverrsnittet ikke sjekkes i lasttilfelle 2.

Dimensjonering av skrueforbindelse:



Figur 30: Illustrasjon av detaljene på endene av kranbrudrageren. Delene som vises er kranbrudrageren, plata den ligger på, og stiverne som fordeler kreftene fra drageren utover plata.

Kranbrua skal fastlåses til bruvognen ved hjelp av to skruer, en på hver side av kranbrudragerens steg. Siden bruvognen ligger løst på kranbaneskinna vil denne forbindelsen utsettes for lite mer enn skjærkraft ved bremsing eller plutselig stopp av kranbrua eller løpekatten.

Velger å bruke høyfaste sekskantskruer i fasthetsklasse 8.8. Skruen har da en strekkfasthet på 800 MPa og flytegrense på 640 MPa. Siden forholdet mellom flytegrensen og strekkfastheten er over 0,7 blir den tillatte strekkspenningen σ_a for materialet i skruen blir etter NS 5514 ^(3, side 23) dermed:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_E + \sigma_R}{\sigma_{E52} + \sigma_{R52}} \cdot \sigma_{a52} = \frac{640 + 800}{353 + 510} \cdot 235 = 392 \text{ MPa} \quad (33)$$

der σ_{E52} = flytegrensen for St52, dvs. 353 MPa.
 σ_{R52} = strekkfastheten for St52, dvs. 510 MPa.
 σ_{a52} = tillatt spenning for St52, dvs. 235 MPa.

Ifølge NS 5514 er det ikke nødvendig å kontrollere høyfaste skruer for avskjæring. ^(3, side 26) Velger likevel å gjøre en sjekk der det tas utgangspunkt i at skruen ikke er høyfast. Den tillatte skjærspenningen blir dermed $0,6\sigma_a = 235 \text{ MPa}$.

Nødvendig spenningsareal A_s i den enkelte skrue:

$$A_s = \frac{F_h}{2\tau_a} = \frac{12773}{2 \cdot 235} = 27 \text{ mm}^2 \quad (34)$$

der F_h = den tenkte maksimale horisontalkraften utledet i punkt 3.3.2.

Velger å bruke M10-skruer som har et spenningsareal på 58 mm^2 for å være helt på den sikre siden. Skruehullet kan ha en frihulldiameter på 11 mm. ^(30, side 49, pdf-side 3) Dette vil sikre en enkel monteringsprosess.

Hullkantrykket p i platen:

$$p = \frac{F_h}{t \cdot d \cdot n} = \frac{12773}{10 \cdot 11 \cdot 2} = 58 \text{ MPa} \quad (35)$$

der t = platens tykkelse i mm.
 d = skruehulldiameteren i mm.
 n = antallet skrueforbindelser.

Utrivning av grunnmaterialet:

$$\tau = \frac{F_h}{4l_{eff} \cdot t} = \frac{12773}{4 \cdot 54,5 \cdot 10} = 6 \text{ MPa} \quad (36)$$

der l_{eff} = lengden ifra platens ende og til hullets ytterkant i mm.

Brudd i platens nettotverrsnitt:

$$\tau = \frac{F_h}{t(b-d)} = \frac{12773}{10(120-11)} = 12 \text{ MPa} \quad (37)$$

der b = platens bredde i mm.

Hullkantrykket er langt under den tillatte spenningen i platens materiale (S355). Det antas da at verdien er holdbar selv om hulltrykkspenningen muligens egentlig ville vært noe høyere på grunn av differansen imellom skruediameteren og hulldiameteren. De beregnede spenningene viser også at det heller ikke er fare for utrivning av grunnmaterialet eller brudd i nettotverrsnittet til platen.

Dimensjonering av sveiseforbindelse:

Det skal være kilesveiser i forbindelsene til stiverne i tillegg til den delen av kranbrubjelkens steg som ligger på platen (se figur 30). Kilesveisene skal være dobbeltsidige på forbindelsen imellom plata og kranbrudrageren. På grunn av vanskelig tilkomst beregnes det kun med ensidige kilesveiser på forbindelsen imellom stiverne, platen og kranbrudrageren. Dette tar da utgangspunkt i at plata sveises til kranbrudrageren først, og at stiverne sveises på etter. Skruehullene bores til slutt for at de skal bli helt riktige i forhold til vinkelen imellom kranbrudrageren og bruvognene.

Dimensjonerer sveisenes a-mål utfra de ensidige kilesveisene i forbindelsen mellom stiverne og plata. Kraften de blir utsatt for er skjærkraften F_h ved bremsing eller plutselig stopp av kranbrua eller løpekatten.

Finner sveisens totale lengde l_e . Prøver med et a-mål på 5 mm:

$$l_e = (n \cdot l) - (x \cdot a) = (4 \cdot 85) - (8 \cdot 5) = 300 \text{ mm} \quad (38)$$

der n = antallet kilesveiser, en på hver stiver da det muligens ikke er god nok tilkomst for å sveise på begge sider av stiverne.

l = stiverens lengde i mm.

x = antallet sveiseender.

a = a-målet. Det trekkes fra på grunn av endefeil.

Den parallelle skjærspenningen τ_{\parallel} :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_h}{A_{sveis}} = \frac{12773}{5 \cdot 300} = \mathbf{9 \text{ MPa}} \quad (39)$$

Jevnførende spenning σ_{jf} :

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{3 \cdot 9^2} = \mathbf{16 \text{ MPa}} \quad (40)$$

Sjekker at sveisen langs kranbrubjelkens drager også holder ved bremsing eller plutselig stopp av løpekatten. Gjør en konservativ forenkling der det sies at denne forbindelsen også blir utsatt for den maksimale skjærkraften F_h .

Sveisens totale lengde l_e :

$$l_e = (n \cdot l) - (x \cdot a) = (2 \cdot 120) - (4 \cdot 5) = 220 \text{ mm}$$

Den parallelle skjærspenningen τ_{\parallel} :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_h}{A_{sveis}} = \frac{12773}{5 \cdot 220} = \mathbf{12 \text{ MPa}}$$

Jevnførende spenning σ_{jf} :

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{3 \cdot 12^2} = \mathbf{21 \text{ MPa}}$$

Spenningsene i sveisene er lave og godt under den tillatte jevnføringsspenningen på 235 MPa og den tillatte skjærspenningen på 167 MPa. ^(3, side 27, tabell T-1.4124) Spenningsene er så lave at det ikke er nødvendig å sjekke spenningen i lasttilfelle 2. Det antas at sveiseavsettet har minst like gode egenskaper som grunnmaterialet.

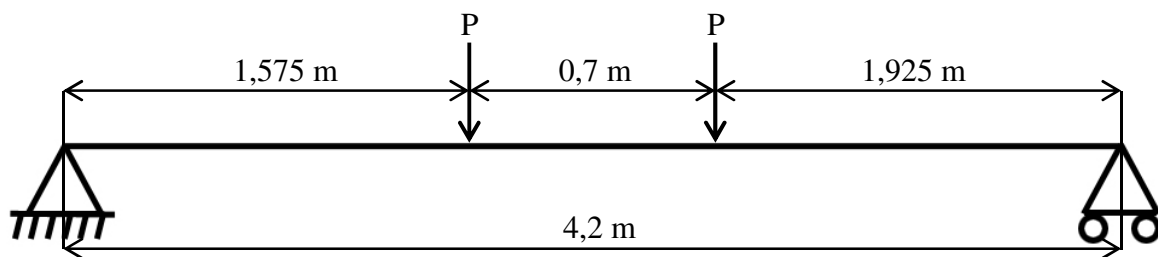
3.3.4 Dimensjonering av kranbanebjelkene

Det er bestemt at kranbanen skal være kanalstål av typen UPE. Det gjøres beregninger på det største spennet som er på ca. 4,2 meter. Siden kraften fra hjulene ikke treffer i profilets skjærsenter ville det i utgangspunktet oppstå store torsjonsspenninger i profilet, og den ville fått en rotasjon der øverste flens roterer ut i rommet. I dette tilfellet ligger det en vegg i bakkant, og bjelken vil ikke oppleve den samme torsjonen som den ville ha opplevd uten veggen. I tillegg vil skinna som ligger på bjelkens nederste flens også gi profilet en høyere stivhet.

Velger derfor å dimensjonere bjelken kun med hensyn på bøyespenningen som oppstår når kranbrua står litt til siden av midten på spennet, på samme måte som ved dimensjoneringen av kranbrudrageren. Torsjonen som oppstår er utforsket mer i en detaljert FEM-analyse som gir et riktigere bilde av spenningene i bjelken (punkt 5.1.5).

Det må også gjøres beregninger som sjekker om bjelkens nederste flens vil tåle belastningen den utsettes for. I dette tilfellet er det funnet lite litteratur/formler som dekker et slikt tilfelle, og det gjøres forenklete beregninger som gjør at dimensjoneringen havner på konservativ side.

Estimerer bjelkestørrelse ved å se på bøyespenningen og nedbøyningen:



Figur 31: Forenklet belastningsbilde. P er den maksimale hjulkraften fra kranbrua, og størst bøyemoment oppstår når avstanden fra kanten og til den ene lasten er halve spennet minus en fjerdedel av lengden mellom hjulkraftene.

Maksimalt M_b :

$$M_b = \frac{P \left(l - \frac{c_2}{2} \right)^2}{2l} \quad (41)$$

der P = hjulkraften i N, funnet under dimensjoneringen av bruvoggen.

l = hele spennet i mm.

c_2 = avstanden imellom hjulkraftene i mm.

$$M_b = \frac{65799 \left(4200 - \frac{700}{2} \right)^2}{2 \cdot 4200} \cdot 10^{-3} = \mathbf{116\ 108\ Nm}$$

Finner nødvendig tverrsnittsmodul om sterk akse W_x med en tillatt spenning σ_a på 236 MPa:

$$W_x = \frac{M_b}{\sigma_a} = \frac{116108 \cdot 10^3}{236} = \mathbf{491\ 983\ mm^3}$$

Det er nødvendig med et profil av størrelsen UPE300 eller større. Velger å bruke et UPE360-profil av stål med flytegrense på 355 MPa siden dette passer best med bruvognas størrelse.

Sjekker spenningen σ_b når det tas hensyn til bjelkens vekt:

$$M_b = \frac{P \left(l - \frac{c_2}{2} \right)^2}{2l} + \frac{ql^2}{8} = 116108 + \frac{600 \cdot 10^{-3} \cdot 4200^2}{8} \cdot 10^{-3} = 117\ 431\ Nm \quad (42)$$

der q = lasten fra kranbanebjelken i N/mm.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_x} = \frac{117431 \cdot 10^3}{824 \cdot 10^3} = \mathbf{143\ MPa} < \sigma_a \quad (43)$$

Bøyepeningen er ok. Sjekker nedbøyningen f :

$$f_{\text{till}} = \frac{l}{600} = \frac{4200}{600} = 7\ mm$$

$$f = \frac{P_{\text{tot}} + \frac{5}{8}Q}{48EI_x} \cdot l^3 \quad (44)$$

der P_{tot} = summen av hjulkreftene plassert på midten i N .

Q = den totale lasten fra bjelkens egenvekt i N .

E = elastisitetsmodulen for stål i MPa .

I_x = annet arealmoment for bjelkeprofilen i mm^4 .

$$f = \frac{131598 + \left(\frac{5}{8} \cdot 2520 \right)}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 148,2 \cdot 10^6} \cdot 4200^3 = \mathbf{6,6\ mm} < f_{\text{till}}$$

Sjekker resultatet i lasttilfelle 2 der den tillatte spenningen σ_a blir på 322 MPa:

$$M_b = \frac{P \left(l - \frac{c_2}{2} \right)^2}{2l} + \frac{ql^2}{8} =$$

$$\frac{75876 \left(4200 - \frac{700}{2} \right)^2}{2 \cdot 4200} \cdot 10^{-3} + \frac{600 \cdot 10^{-3} \cdot 4200^2}{8} \cdot 10^{-3} = 135\ 213\ Nm$$

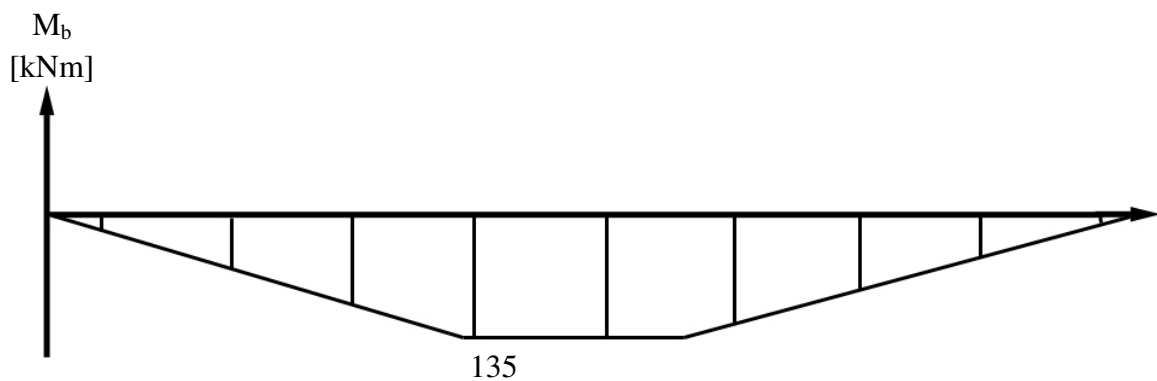
$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_x} = \frac{135213 \cdot 10^3}{824 \cdot 10^3} = \mathbf{164 \text{ MPa}} < \sigma_a$$

$$f = \frac{P_{tot} + \frac{5}{8}Q}{48EI_x} \cdot l^3 = \frac{151752 + \left(\frac{5}{8} \cdot 2520\right)}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 148,2 \cdot 10^6} \cdot 4200^3 = \mathbf{7,6 \text{ mm}} > f_{till}$$

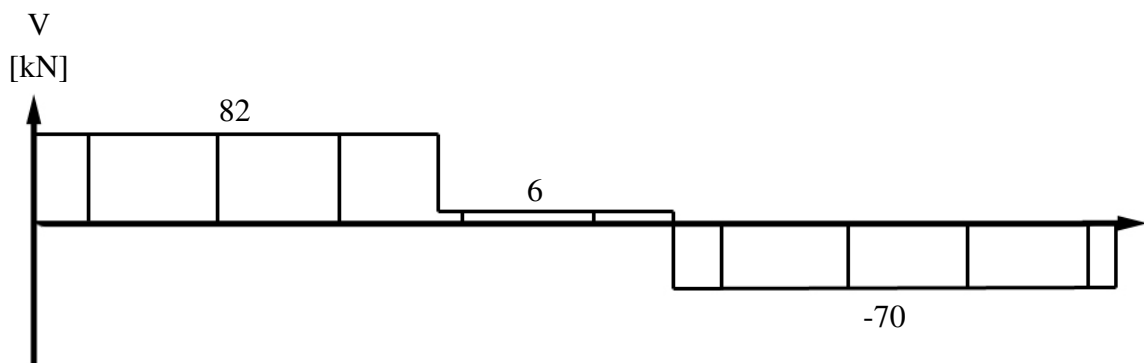
Mener at dette resultatet fortsatt er holdbart da det ligger mye usikkerhet i verdien for E-modul. Den tillatte nedbøyningen er uansett ingen kritisk verdi, og det vil ikke ha noen særlige konsekvenser om nedbøyningen blir 8 mm i stedet for 7 mm.

Skjærkraft- og bøyemomentdiagram:

Viser moment og skjærkraftdiagram etter lasttilfelle 2 da dette tilfellet har størst hjulkraft:

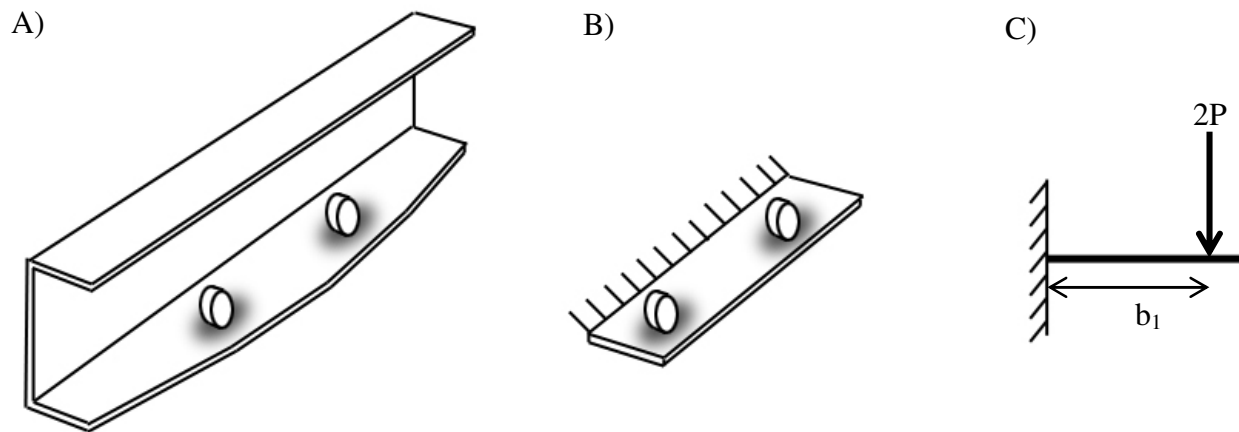


Figur 32: Bøyemomentdiagram for bjelken i lasttilfelle 2. Maksimalt bøyemoment finnes litt til siden av midten på bjelken og er på 135 kNm.



Figur 33: Skjærkraftdiagram for bjelken i lasttilfelle 2. Kraftene er funnet utfra hjulkraften i lasttilfelle 2 og geometrien gitt i figur 31.

Sjekker belastningen av kranbanens flens:



Figur 34: Illustrasjon av forenklingene som gjøres ved sjekk av kranbanebjelkens flens. Figur A viser hele spennet og kranbruas to hjul i tillegg til nedbøyningen ytterst på flensen. Figur B viser hva slags forenkling som gjøres i beregningene. Det sees kun på et snitt av flensen der hvor hjulene treffer, og flensen sees på som en plate innspent i den ene langsiden. Figur C viser en enkel beregningstegning. Kraften fra hjulene angriper ca. 77 mm fra steget.

Sjekker bøyemomentet M_b innerst ved steget:

$$M_b = 2Pb_1 = 2 \cdot 65799 \cdot 77 \cdot 10^{-6} = \mathbf{10\ 133\ Nm} \quad (45)$$

der b_1 = avstanden imellom hjulkraften og steget i mm.

Finner annet arealmoment I for den delen av flensen det sees på:

$$I = \frac{1}{12}lt^3 \quad (46)$$

der l = lengden av flensen det sees på i mm, og som er lik lengden imellom hjulkraftene.
 t = flensens tykkelse i mm.

$$I = \frac{1}{12}700 \cdot 17^3 = \mathbf{286\ 592\ mm^3}$$

Finner maksimal bøyespenning σ_b :

$$\sigma_b = \frac{M_b}{I} \cdot y = \frac{10133 \cdot 10^3}{286592} \cdot 8,5 = \mathbf{301\ MPa} > \sigma_a \quad (47)$$

Ser at spenningen som er funnet er over den tillatte spenningen på 236 MPa. I virkeligheten vil flensen blir støttet opp fra sidene i tillegg til at kranbaneskinna vil gi ekstra styrke. Utregningen og forenklingene som er gjort er ganske konservative, og de representerer nok ikke den virkelige spenningen som oppstår. Men da spenningen som ble funnet er så stor, tyder dette på at det bør gjøres grundigere analyser av problemet. Dette er gjort under punkt 5.1.5.

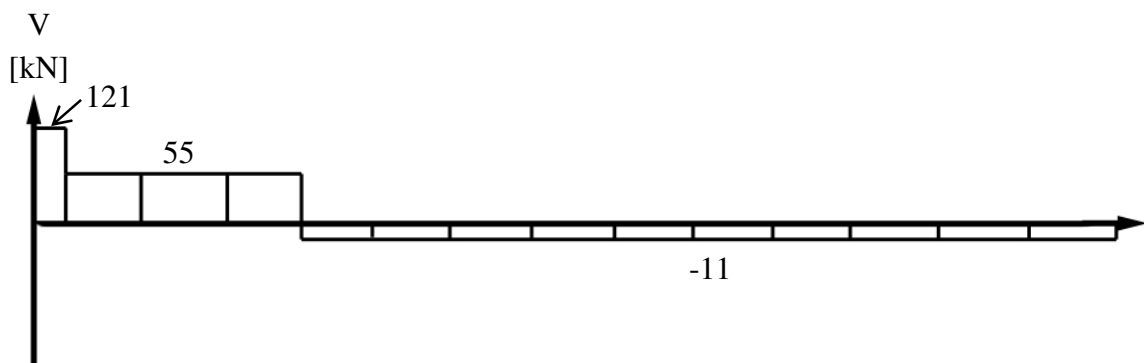
Sjekker avskjæring av flens når kranbrua står helt inntil opplageret:

Den tillatte skjærspenningen τ_a er 136 MPa. Får oversikt over skjærkreftene som oppstår når hjula står helt inntil opplageret på bjelkespennet. Finner først opplagerkraften F_{oppl} nærmest hjula:

$$F_{oppl} = \frac{Pl + P(l - c_2)}{l} \quad (48)$$

der $P =$ hjulkreftene i N.
 $l =$ spennet i mm.
 $c_2 =$ avstanden imellom hjulkreftene i mm.

$$F_{oppl} = \frac{(65799 \cdot 4200) + 65799(4200 - 700)}{4200} = 120\,632\, N$$



Figur 35: Skjærkraftdiagram for bjelken i dette tilfellet. Det vil være et lite punkt helt til venstre der skjærkraften vil være tilnærmet lik opplagerkraften F_{oppl} . Det er i dette punktet at skjærspenningen må sjekkes.

Finner tverrsnittet A der avskjæring kan oppstå:

$$A = t \cdot b = 17 \cdot 110 = 1870\, mm^2 \quad (49)$$

der $t =$ flensens tykkelse i mm.
 $b =$ flensens bredde i mm.

Finne skjærspenningen τ i dette punktet:

$$\tau = \frac{F_{oppl}}{A} = \frac{120632}{1870} = 65\, MPa < \tau_a \quad (50)$$

Det er ingen fare for avskjæring.

Sjekker spenning på grunn av termisk utvidelse:

Under punkt 2.4.1 – "Opplagring av kranbane" er det beskrevet at kranbanens opplagring gir kanalstålet muligheten til å utvide seg i sin lengderetning. Dette er begrunnet med at det er nødvendig for å unngå kritiske spenninger i kranbanebjelken på grunn av materialutvidelse ved store temperaturforandringer. Viser her hvilke effekter en stor temperaturvariasjon har på kranbanen.

Utvidelse Δl ved maksimal temperaturvariasjon:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 15000 \cdot (45 + 20) = \mathbf{11 \text{ mm}} \quad (51)$$

der $\alpha =$ den midlere lineære lengdeutvidelseskoeffisienten for materialet i K^{-1} (5, side 37)
 $l_0 =$ den opprinnelige lengden til kanalstålet i mm.
 $\Delta T =$ temperaturvariasjonen i K.

Denne utvidelsen tas det høyde for i lengden på kanalstålet. Hadde denne vært dimensjonert for å nå helt inntil verkstedhallens vegger, ville dette gitt ekstra spenninger som kunne ha vært kritiske under bruk.

Finner spenningen σ_T som ville oppstått om kranbanebjelken hadde vært fast innspent i utkragerbjelkene. Det sees på en mer realistisk temperaturvariasjon ($10^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$) under bruk av løpekrane:

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{F_\perp}{A} \cdot L_0 = \Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (52)$$

gir meg

$$\sigma_T = \frac{F_\perp}{A} = E \alpha \Delta T = 2,1 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot (40 - 10) = \mathbf{70 \text{ MPa}} \quad (53)$$

der $F_\perp =$ den vinkelrette trykkraften som oppstår i N.
 $A =$ tverrsnittsarealet i bjelken i mm^2 .
 $E =$ Elastisitetsmodul for materialet i MPa.

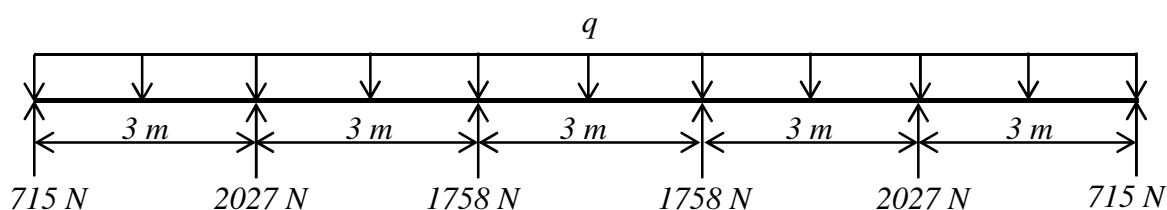
Summen av denne spenningen og den maksimale bøyepeningen i kanalstålet ligger under den tillatte verdien. Men da spenningen er forholdsvis stor er det bestemt at det er riktig å la kranbanebjelken få utvide seg fritt i sin lengderetning.

3.3.5 Sjekk av utkragerbjelkenes kapasitet

Det gjøres en forenklet beregning av spenningene som vil oppstå ved en eventuell opplagring av kranstrukturen i utkragerbjelkene. Dette er nødvendig for å fastslå om disse kan brukes til opplagring av løpekransen, og for å kunne utarbeide løsningsforslag for løpekransens utforming.

Selve utkragerbjelken er et T-profil med flensen nederst. Den stikker 100 millimeter ut fra veggen, og belastningen vil angripe ca. 50 millimeter fra veggen. Når kranbrua kjører over opplagringen, og løpekatten befinner seg nærmest veggen, blir utkragerbjelken belastet med tilnærmet hele lasten, i tillegg til lasten fra kranbanens egenvekt.

Finner fordelingen av kranbanebjelkens egenvekt ved å gjøre en enkel analyse i Ansys Classic:
Resultater fra Ansys Classic der q er på 600 N/m:



Ser videre på en utkragerbjelke belastet med 2027 N, og gjør en konservativ forenkling der hele lasten fra kranbrua settes rett på denne:

Total last F_{tot} på utkragerbjelken:

$$F_{tot} = Q + 2P \quad (54)$$

der $Q =$ lasten fra kranbanebjelkens egenvekt i N.
 $P =$ hjulkraftene i N, funnet under dimensjoneringen av bruvoggen.

$$F_{tot} = 2027 + (2 \cdot 65799) = 133\,625\, \text{N} = \mathbf{133,6\, kN}$$

Det er rimelig å anta at utkragerbjelkene er av konstruksjonsstål med flytgrense ikke lavere enn 235 MPa. Tillatte spenninger σ_a og τ_a er dermed henholdsvis 156 og 90 MPa.

Sjekker bøyepeningen σ_b øverst på steget (1), nederst på steget (2) og nederst på flensen (3):

$$\sigma_b = \frac{M_b \cdot y}{I_x} = \frac{F_{tot} \cdot l \cdot y}{I_x} \quad (55)$$

der $l =$ avstanden fra veggen og ut til der kraften angriper i mm.
 $y =$ vertikal avstand imellom tyngdepunktsaksen og det gjeldende punktet i mm.
 $I_x =$ annet arealmoment om sterk akse i mm^4 .

$$\sigma_{b1} = \frac{133625 \cdot 50 \cdot 107}{9112725} = \mathbf{79\, MPa} < \sigma_a$$

$$\sigma_{b2} = \frac{133625 \cdot 50 \cdot 28}{9112725} = \mathbf{21 \text{ MPa}} < \sigma_a$$

$$\sigma_{b3} = \frac{133625 \cdot 50 \cdot 43}{9112725} = \mathbf{32 \text{ MPa}} < \sigma_a$$

Sjekker horisontal skjærspenning τ ved tyngdepunktsaksen (4) og nederst på steget (2):

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I_x \cdot b} \quad (56)$$

der $V = F_{tot}$ i N.

$S =$ det statiske momentet for den gjeldende flaten i mm^3 .

$t =$ bredden til tverrsnittet i det gjeldende punktet i mm.

$b =$ bredden til det gjeldende tverrsnittet i mm.

$$S_4 = s(h - y) \left(\frac{h - y}{2} \right) = 85868 \text{ mm}^3 \quad (57)$$

$$S_2 = b \cdot t \cdot \left(y - \left(\frac{t}{2} \right) \right) = 79875 \text{ mm}^3 \quad (58)$$

der $s =$ stegets tykkelse, $h =$ profilets høyde, $y =$ avstanden mellom profilets bunn og tyngdepunktsaksen, $b =$ profilets bredde, $t =$ flensens tykkelse i mm.

$$\tau_4 = \frac{133625 \cdot 85868}{9112725 \cdot 15} = \mathbf{84 \text{ MPa}} < \tau_a$$

$$\tau_2 = \frac{133625 \cdot 79875}{9112725 \cdot 15} = \mathbf{78 \text{ MPa}} < \tau_a$$

Sjekker jevnførende spenning σ_{jf} nederst på steget (2):

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_{b2}^2 + 3\tau_2^2} \quad (59)$$

$$\sigma_{jf} = \sqrt{21^2 + 3 \cdot 78^2} = \mathbf{137 \text{ MPa}} < \sigma_a$$

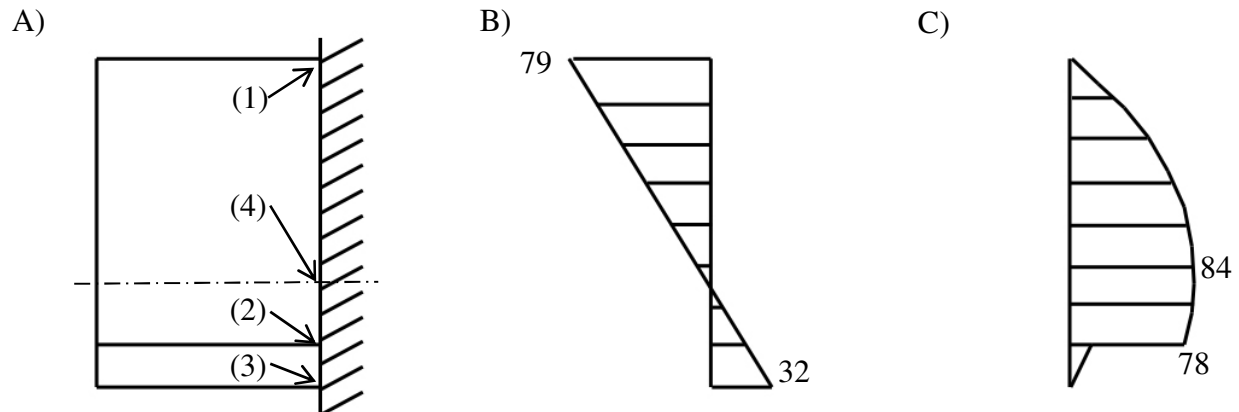
Sjekker avrivning av bjelkeprofilet:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

der $A =$ er profilets tverrsnittsareal i mm^2 .

$$\tau = \frac{133625}{4275} = \mathbf{31 \text{ MPa}} < \tau_a$$

Bøye- og skjærspenningsdiagram:



Figur 36: Bøye- og skjærspenningsdiagram for utkragerbjelken. Figur A viser de forskjellige punktene sine plasseringer, figur B viser bøyespenningsdiagrammet og figur C viser det horisontale skjærspenningsdiagrammet. Verdier er i MPa.

Konklusjon:

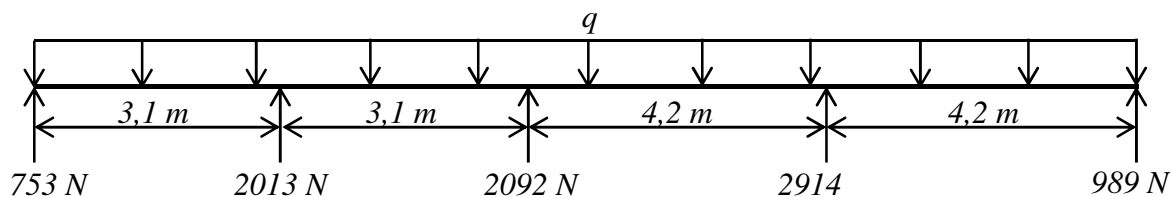
Spenningene er under, men tett oppimot de tillatte spenningene. Velger ikke å bruke utkragerbjelkene som rammens opplagring på bakgrunn disse resultatene sammen med følgende begrunnelser:

- Utkragerbjelkenes materialkvalitet er ukjent.
- Ved brudd i bjelken vil det få store konsekvenser for hele strukturen.
- Kranbroen vil bevege fram og tilbake over opplagerpunktet, og dette vil føre til en dynamisk belastning av bjelken, dog med en lav frekvens.
- Utkragerbjelkenes belastningshistorie er ukjent.

3.3.6 Dimensjonering av kranbanens søyler

Søylene er plassert som vist i punkt 2.4.1 – "Opplagring av kranbane", og de skal bestå av HEB-profiler med flensens flate pekende innover i rommet. Søylene dimensjoneres etter den største trykkraften de blir utsatt for, som oppstår når kranbrua kjører over søylen, og løpekatten befinner seg nærmest veggen. Da blir søylen belastet med tilnærmet hele lasten i tillegg til lasten fra kranbanens egenvekt.

Finner fordelingen av kranbanebjelkens egenvekt ved å gjøre en enkel analyse i Ansys Classic:
 Resutater fra Ansys Classic der q er på 600 N/m:



Ser videre på søyle belastet med 2914 N, og gjør en konservativ forenkling der hele lasten fra kranbrua settes rett på denne:

Total last F_{tot} på søylen:

$$F_{tot} = Q + 2P = 2914 + (2 \cdot 65799) = 134\,512\,N = \mathbf{134,5\,kN}$$

der Q = lasten fra kranbanebjelkens egenvekt i N.

P = hjulkreftene i N, funnet under dimensjoneringen av bruvognen.

Nødvendig tverrsnittsareal A :

$$A = \frac{F_{tot}}{\sigma_{till}} = \frac{134512}{236} = 570\,mm^2$$

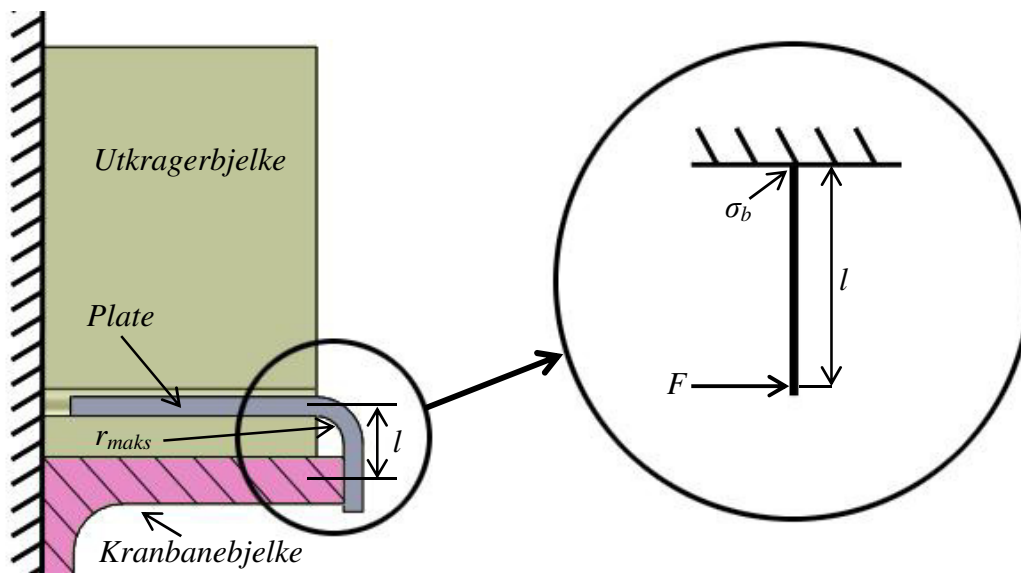
Ser at et HE100B-profil har et tverrsnittsareal på 2600 mm², og dette vil holde i massevis. Her er det sannsynlig at det kan være en fare for knekking. Det blir derfor nødvendig å gjøre en knekkingsberegning for å se om dette bjelkeprofilet holder. Dette er gjort under punkt 3.5.1.

3.3.7 Dimensjonering av opplagerplate

Platen som forbinder kranbanebjelken til utkragerbjelkene må kunne tåle belastningen fra torsjonsmomentet som oppstår i kranbanebjelken. Denne oppstår som en konsekvens av at belastningen ikke treffer bjelkens skjærsenter, og er under punkt 5.1.5 – "FEM-analyse av kranbanebjelken" funnet til å kunne være på ca. 17 kN. Verdien er ikke verifisert, og kan være noe unøyaktig, men brukes uansett som utgangspunkt for sjekk av opplagerplatens dimensjoner.

For at platen skal kunne ligge helt inntil utkragerbjelken og kranbanebjelken, er det utfra geometrien gitt at største knekkradius r_{maks} kan være 10 mm. Dette gir en maksimal platetykkelse på 7 mm. ^(2, side 57, tabell 13)

Platen skal sveises fast langs utkragerbjelken, og bøyepeningen kan sjekkes utfra det største momentet som opplever ytterst ved enden av utkragerbjelken.



Figur 37: Illustrasjon av platens funksjon. Figur A viser platen, utkragerbjelken og toppen av et snitt av kranbanebjelken. Figur B viser et forenklet lastbilde for dimensjoneringen av plata. F er belastningen fra kranbanebjelken på 17 283 N, og l er 27 mm. Platas bredde b er 140 mm.

Sjekker bøyepeningen i plata:

Momentet M som plata opplever:

$$M = F \cdot l = 17283 \cdot 27 = 466\,641 \text{ Nmm} = \mathbf{467 \text{ Nm}}$$

Annet arealmoment I for platens tverrsnitt:

$$I = \frac{bt^3}{12} = \frac{140 \cdot 7^3}{12} = \mathbf{4001 \text{ mm}^4} \quad (60)$$

Maksimal bøyepening σ_b :

$$\sigma_b = \frac{M}{I} \cdot \frac{t}{2} = \frac{466641}{4001} \cdot \frac{7}{2} = \mathbf{408 \text{ MPa}} \quad (61)$$

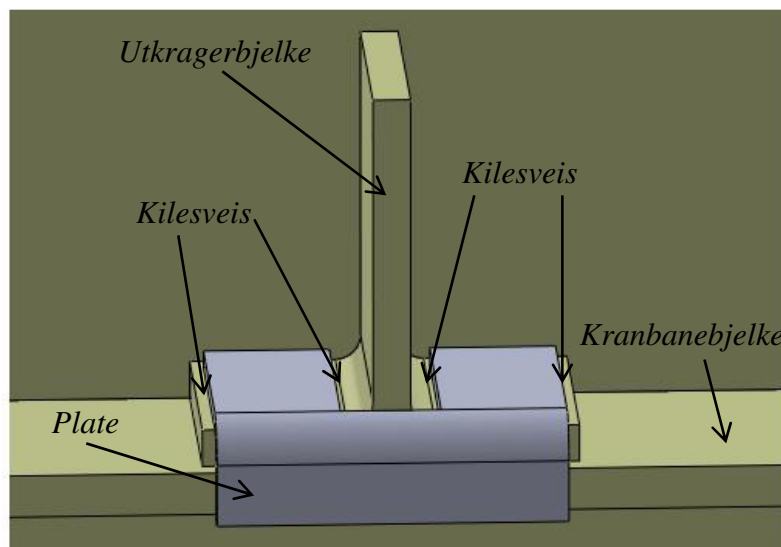
Sjekker avskjæring:

Skjærspenning τ :

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot t} = \frac{17283}{140 \cdot 7} = \mathbf{18 \text{ MPa}} \quad (62)$$

Ser at bøyespenningen i vinkelen på plata blir veldig høy. Om det brukes stål med flytegrense på 355 MPa, må det gjøres endringer på denne plata sin utforming for at den skal kunne tåle belastningen.

Dimensjonering av sveiseforbindelsen mellom opplagerplata og utkragerbjelken:



Figur 38: Illustrasjon av hvor kilesveisene som forbinder plata til utkragerbjelken, befinner seg. Sveisenes lengde er 90 mm.

Sweisens totale lengde l_e . (Prøver med et a-mål på 5 mm):

$$l_e = (n \cdot l) - (x \cdot a) = (4 \cdot 90) - (8 \cdot 5) = \mathbf{320 \text{ mm}}$$

Den parallelle skjærspenningen τ_{\parallel} :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{sveis}} = \frac{17283}{5 \cdot 320} = \mathbf{11 \text{ MPa}}$$

Jevnførende spenning σ_{jf} :

$$\sigma_{jf} = \sqrt{3\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{3 \cdot 11^2} = \mathbf{19 \text{ MPa}}$$

Spenningene i sveisene er lave og godt under den tillatte jevnføringsspenningen på 235 MPa og den tillatte skjærspenningen på 167 MPa. ^(3, side 27, tabell T-1.4124) Spenningene er så lave at det ikke er nødvendig å sjekke spenningen i lasttilfelle 2. Det antas at sveiseavsettet har minst like gode egenskaper som grunnmaterialet.

3.3.8 Nødvendig effekt på kranbruas kjøremotor

Nødvendig effekt finnes utfra gitte laster og verdier fra valg av hjulblokk i punkt 4.1.2.
Friksjonsmotstand P_1 mot kjøring:

$$P_1 = \frac{S_L + S_G + Q}{D} (2e + \mu d) M \quad (63)$$

der $Q =$ lasten fra kranbroa i N.

$D =$ hjuldiameter i mm.

$e =$ arm for rullende friksjon i mm. Antar en verdi utfra liknende beregninger. ^(4, side 144)

$\mu =$ friksjonskoeffisient hjul/aksel. Antar en verdi.

$d =$ tappdiameter i mm.

$M =$ faktor for friksjon fra hjulenes flenser. Antar en verdi.

$$P_1 = \frac{(98100 + 12753 + 3648)}{160} (2 \cdot 0,5 + 0,07 \cdot 35) 1,5 = 3703 \text{ N} = \mathbf{3,7 \text{ kN}}$$

Akselerasjonsmotstand P_2 mot kjøring:

$$P_2 = m \cdot a = \frac{3648 + 12753 + 98100}{9,81} \cdot 0,1 = 1167 \text{ N} = \mathbf{1,2 \text{ kN}} \quad (64)$$

der $m =$ massen av kjøremaskineriet og nyttelasten i kg.

$a =$ akselerasjonen av kjøremaskineriet i m/s^2 . Velger en aksellerasjonstid på 2 sekunder, og hastigheten er satt til 0,2 m/s.

Total motstand P :

$$P = P_1 + P_2 = 3703 + 1167 = \mathbf{4870 \text{ N}} \quad (65)$$

Nødvendig effekt N_e :

$$N_e = \frac{P \cdot v}{\eta} \quad (66)$$

der $v =$ hastigheten i m/s.

$\eta =$ virkningsgrad for kjøremaskineri. Antar en verdi utfra liknende beregninger. ^(4, side 145)

$$N_e = \frac{4870 \cdot 0,2}{0,7} = \mathbf{1391 \text{ W}}$$

Siden kjøremaskineriet skal bestå av to elektromotorer trengs det bare halvparten av effekten N_e på hver motor. Men når løpekatten står helt inntil bruvognen kan motstanden på den ene siden være betraktelig mye større der, og dette burde det tas hensyn til ved valg av motor.

3.4 Dynamiske belastninger og sikkerhet mot utmatting

Løpekransens struktur vil bli utsatt for dynamiske belastninger når dens løpekatt eller kranbru beveger seg, og ved heising av nyttelasten. Standarden NS 5514 gir et antall konvensjonelle lastsykluser som kranen er forventet å utføre i sin levetid utfra bruksklassen til løpekransens struktur ($6,3 \cdot 10^4$ sykluser)^(3, s. 6, tabell T-1.11). Det er rimelig å anta at dette antallet lastsykluser er erfaringstall, og de kan da brukes som et minstekrav til antall lastsykluser som løpekransens struktur skal tåle. Standarden gir også antall brukstimer utfra varigheten av lastsyklusen, men siden varigheten i dette tilfellet blir veldig unøyaktig å estimere, velges det og heller se på antall løft som det regnes med at kranen vil gjøre i løpet av et år. Det blir dermed mulig å finne levetiden i antall år, noe som gir et bedre inntrykk av levetiden enn antall timer, siden løpekransen skal brukes relativt lite.

Maskinforskriften sier at konstruksjonen skal tåle dynamisk prøving der største arbeidsbelastning er multiplisert med den dynamiske prøvefaktoren, som normalt skal være 1,1.^(12, vedlegg 1, punkt 4.1.2.3) Dette er en sikkerhetsfaktor for mekanisk styrke, og vil gi en litt kunstig lavere levetid utfra beregningene, men det velges fortsatt å ha den med for å være på den sikre siden.

3.4.1 Dynamisk belastning av kranbrudrageren

Selv om utmattingsbrudd hovedsakelig forekommer i forbindelser, er det også hensiktsmessig å gjøre en sjekk av konstruksjonselementer som kranbrudrageren. Denne bjelken vil bli utsatt for dynamiske belastninger hver gang løpekransen blir brukt. Det er rimelig å anta at nyttelasten vil bli heist én gang, og forflyttet langs kranbrua én gang i løpet av en lastsyklus. Spenningsvidden vil derfor finnes utfra spenningen som oppstår når lasten heises opp og løpekatten står i posisjon som gir høyest bøyemoment. Dette er en konservativ tilnærming som vil gi en lavere teoretisk levetid enn den sannsynlige levetiden.

Finner spenningsvidden i det nevnte lasttilfelle:

Hjulkraften fra løpekatten P :

$$P = 0,25n_L(S_G + \psi S_L) \quad (67)$$

der n_L = den dynamiske prøvefaktoren.

S_G = lasten fra løpekatten i N.

S_L = nyttelasten i N.

ψ = dynamisk faktor. Velger å ta denne med da lasten alltid vil bli heist opp fra gulvet i løpet av en lastsyklus.

$$P = 0,25 \cdot 1,1(12753 + (1,15 \cdot 98100)) = 34531 \text{ N} = \mathbf{34,5 \text{ kN}}$$

Vertikalt bøyemoment M_{bv} :

$$M_{bv} = P \cdot \frac{\left(l - \frac{c}{2}\right)^2}{l} + \frac{ql^2}{8} \quad (68)$$

der $l = \text{kranbrudragerens lengde i mm.}$
 $c = \text{avstanden imellom løpekattens hjul i dens kjøreretning i mm.}$
 $q = \text{lasten fra kranbrudragerens egenvekt i N/mm.}$

$$M_{bv} = 34531 \cdot \frac{\left(4000 - \frac{200}{2}\right)^2}{4000} \cdot 10^{-3} + \frac{912 \cdot 10^{-3} \cdot 4000^2}{8} \cdot 10^{-3} = \mathbf{133\ 128\ Nm}$$

Spennvidde $\Delta\sigma_I$:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{M_{bv}}{W_x} + \frac{M_{bh}}{W_y} = \frac{133128 \cdot 10^3}{1150 \cdot 10^3} + \frac{13313 \cdot 10^3}{395 \cdot 10^3} = \mathbf{150\ MPa} \quad (69)$$

der $M_{bh} = \text{det horisontale bøyemomentet i Nmm. Velger å ta med denne da lasten nesten alltid vil bli forflyttet i kranbruas kjøreretning i løpet av en lastsyklus.}$
 $W_x = \text{tverrsnittsmodul om sterk akse.}$
 $W_y = \text{tverrsnittsmodul om svak akse.}$

Bruker kurveklasse B1 utfra standarden DNV-RP-C203 (6, side 73, tabell A-1, tilfelle 2), og denne kurven omfatter valsede profiler utsatt for bøyning. Får dermed følgende levetid i antall sykler N_i : (6, side 18, tabell 2-1)

$$N_i = C \cdot \Delta\sigma^{-m} \quad (70)$$

der $C = 10^{\log a}$ hvor a er en konstant som definerer kurvens nivå.
 $m = \text{en helningskoeffisient for kurven.}$

$$N_i = 1,309 \cdot 10^{15} \cdot 150^{-4} = \mathbf{2\ 585\ 679\ sykler}$$

Som tidligere nevnt er det forventet at den nye løpekrane vil bli brukt ca. en gang hver 5. – 6. uke. Antar på bakgrunn av dette at løpekrane vil gjøre 2 løft hver 4. uke. Regner med en økning i bruk på grunn av kranens kapasitetsøkning, og havner i hvert fall på den konservative siden.

Antall løft n_i i løpet av et år:

$$\frac{52 \text{ uker}}{4. \text{ uke}} \cdot 2 \text{ løft} = 26 \text{ løft i året} \quad (71)$$

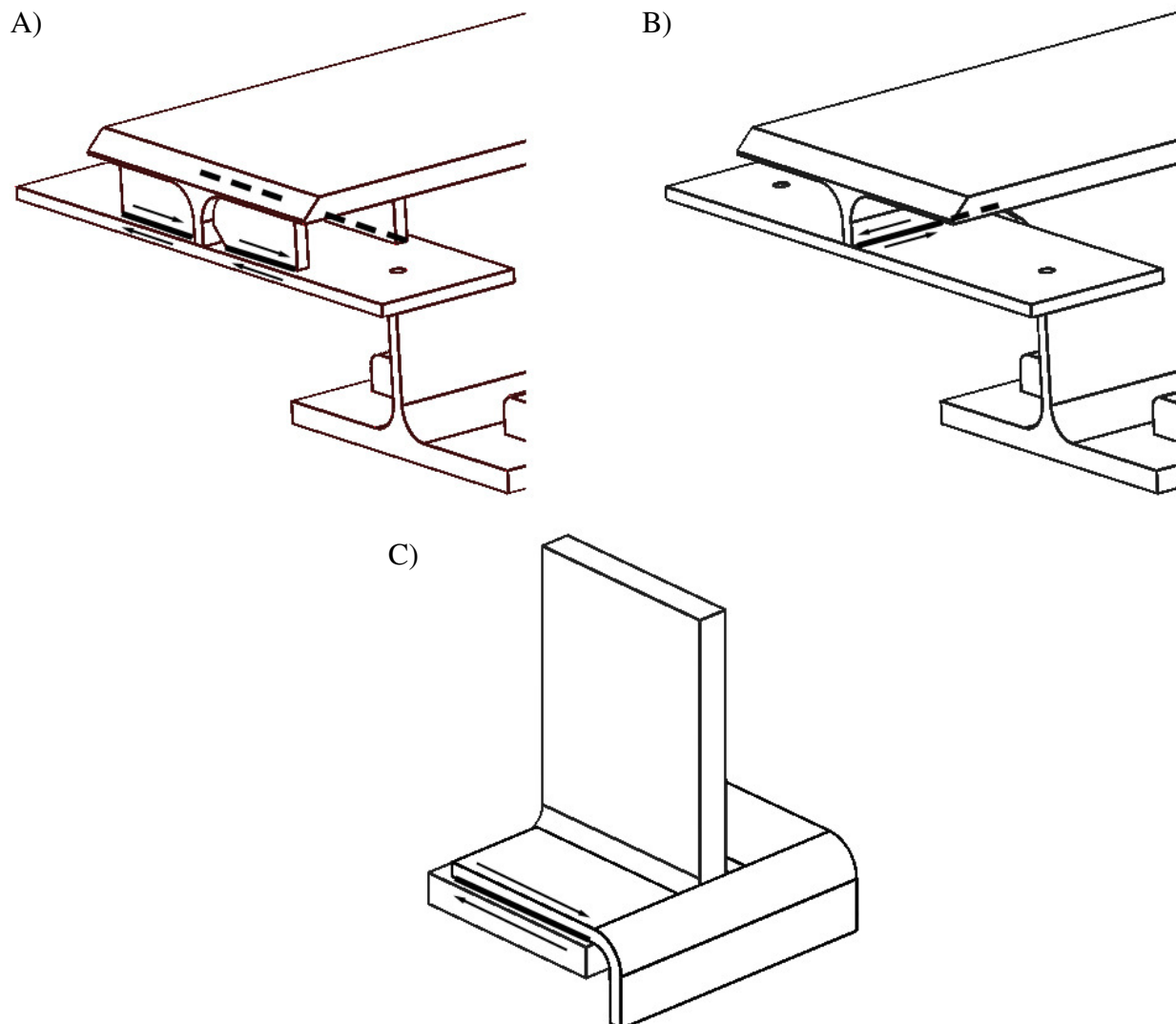
Levetiden X :

$$X = \frac{N_i}{n_i} = \frac{2585679}{26} = \mathbf{99\ 449\ år} \quad (72)$$

Dette resultatet viser at løpekranens bruksfrekvens mest sannsynlig er alt for lav til å gi utmattingsbrudd, i hvert fall i rene konstruksjonselementer som dette.

3.4.2 Utmatting i sveiser

Det er tre steder i konstruksjonen der det brukes lastbærende kilesveiser. Disse belastes på samme måte, og det vil bli brukt samme utmattingskurve for beregning av sveisenes levetid. Det velges derfor kun å se på den sveisen som opplever den største spenning.



Figur 39: Illustrasjon av sveisenes belastning. Figur A viser sveiseforbindelse 1 imellom endeplata og endestiverne, figur B viser sveiseforbindelse 2 imellom endeplata og kranbrudragerens steg, og figur C viser sveiseforbindelse 3 imellom opplagerplata og utkragerbjelken.

Utfra DNV-RP-C203 velges det å bruke utmattingskurve E. ^(6, side 87, tabell A-8, tilfelle 7) For at denne utmattingskurven skal kunne benyttes, stilles det krav til at sveisene stopper opp mer enn 10 mm fra platens kant. Da de statiske beregningene av disse spenningene er såpass lave, antas det at denne endringen ikke vil gi for høye spenninger. Det tas ikke hensyn til effekter på grunn av platens tykkelse da de alle er under referansetykkelsen på 25 mm. ^(6, side 17)

Videre benyttes også verdier funnet under punkt 3.4.1 – "Dynamisk belastning av kranbrudrageren"

Beregner spenning i sveiseforbindelse 1:Langsgående skjærkraft V :

$$V = \frac{4M_{bh}}{l} = \frac{4 \cdot 13313 \cdot 10^3}{4000} = 13313 \text{ N} \quad (73)$$

Sveisens totale lengde l_e :

$$l_e = (n \cdot l) - (x \cdot a) - (x \cdot 10) \quad (74)$$

der n = antallet kilesveiser, en på hver stiver da det muligens ikke er god nok tilkomst for å sveise på begge sider av stiverne.

l = stiverens lengde i mm.

x = antallet sveiseender.

a = a -målet. Det trekkes fra på grunn av endefeil. I tillegg skal sveisene slutte mer enn 10 mm fra platens ende.

$$l_e = (4 \cdot 85) - (8 \cdot 5) - (8 \cdot 10) = \mathbf{220 \text{ mm}}$$

Den parallelle skjærspenningen τ_{\parallel} :

$$\tau_{\parallel} = \frac{V}{A_{sveis}} = \frac{13313}{5 \cdot 220} = \mathbf{12 \text{ MPa}} \quad (75)$$

Spenning i sveis σ_w :

$$\sigma_w = \sqrt{0,2\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{0,2 \cdot 12^2} = \mathbf{5 \text{ MPa}} \quad (76)$$

Beregner spenning i sveiseforbindelse 2:

Gjør en forenkling og sier at maksimal skjærkraft er den samme i denne sveiseforbindelsen.

Sveisens totale lengde l_e :

$$l_e = (n \cdot l) - (x \cdot a) - (x \cdot 10) = (2 \cdot 120) - (4 \cdot 5) - (4 \cdot 10) = \mathbf{180 \text{ mm}}$$

Den parallelle skjærspenningen τ_{\parallel} :

$$\tau_{\parallel} = \frac{V}{A_{sveis}} = \frac{13313}{5 \cdot 180} = \mathbf{15 \text{ MPa}}$$

Spenning i sveis σ_w :

$$\sigma_w = \sqrt{0,2\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{0,2 \cdot 15^2} = \mathbf{7 \text{ MPa}}$$

Beregner spenning i sveiseforbindelse 3:

Bruker her samme belastning på 17 283 N som er brukt i den statiske beregningen. Begrunner dette med at opplagerplata aldri vil befinne seg på midten av det største spennet som er bruk i analysen der denne verdien er funnet, og dette vil gi god nok sikkerhet i seg selv.

Sveisens totale lengde l_e :

$$l_e = (n \cdot l) - (x \cdot a) - (x \cdot 10) = (4 \cdot 90) - (8 \cdot 5) - (8 \cdot 10) = \mathbf{240 \text{ mm}}$$

Den parallelle skjærspenningen τ_{\parallel} :

$$\tau_{\parallel} = \frac{V}{A_{sveis}} = \frac{17283}{5 \cdot 240} = \mathbf{14 \text{ MPa}}$$

Spenning i sveis σ_w :

$$\sigma_w = \sqrt{0,2\tau_{\parallel}^2} = \sqrt{0,2 \cdot 14^2} = \mathbf{6 \text{ MPa}}$$

Sveiseforbindelse 2 vil oppleve størst penning. Går derfor videre med denne.

Selve spenningsvariasjonen vil være den dobbelte av spenningen som er funnet. Dette er fordi oppbremsingen som fremkaller spenningen i både sveiseforbindelse 1 og 2, kan komme i begge retninger. $\Delta\sigma$ er da lik $2\sigma_w$.

Kurveklasse E gir meg følgende levetid i antall sykler N_i (6, side 18, tabell 2-1):

$$N_i = C \cdot \Delta\sigma^{-m} = 1,023 \cdot 10^{12} \cdot 14^{-3} = \mathbf{372 \ 813 \ 411 \ sykler}$$

Antar at løpekranen vil bli brukt 2 ganger hver 4. uke, og at løpekatten stopper opp 4 ganger hver gang.

Antall oppbremsinger n_i i løpet av et år:

$$\frac{52 \text{ uker}}{4. \text{ uke}} \cdot 2 \text{ løft} \cdot 4 \text{ brems} = 104 \text{ oppbremsinger} \quad (77)$$

Levetiden X :

$$X = \frac{N_i}{n_i} = \frac{372813411}{104} = 3 \ 584 \ 744 \text{ år}$$

Siden all belastning av disse sveiste forbindelsene er langsgående med sveisen, og spenningene dermed blir så små, vil sannsynligvis ikke disse belastningene kunne føre til sprekkvekst. De to andre sveiseforbindelsene der levetiden ikke er beregnet, opplever en lavere spenning, og vil ikke oppleve noe særlig flere spenningscykler.

3.5 Knekking og vipping

3.5.1 Kontroll mot knekking av strukturbærende søyler

De strukturbærende søylene skal bestå av lange og slanke HEB-profiler, og det er nødvendig å sjekke om søylene kan bli utsatt for knekking. Siden kranbanen skal kunne utvide/bevege seg noe i sin lengderetning er det fornuftig og konservativt å se på søylen som uopplagret i toppen ved kontroll mot knekking om svak akse.

NS 5514 sier at deler utsatt for knekking skal beregnes med samme sikkerhetsmargin som benyttet for flytegrensen. Valg av beregningsmetode er overlatt til produsenten, som angir kilden til den valgte metode. ^(3, side 27) Velger å bruke Eulers og Tetmajers formler for tillatte belastninger, og med en større sikkerhet enn sikkerheten mot flyt.

Fri knekk lengde L_k utfra søylens lengde l og uopplagret topp:

$$L_k = 2l = 2 \cdot 4750 = \mathbf{9500 \text{ mm}} \quad (78)$$

Slankhet λ til et HE100B-profil:

$$\lambda = \frac{L_k}{i_y} \quad (79)$$

der $i_y =$ bjelkeprofilens treghetsradius om svak akse i mm.

$$\lambda = \frac{9500}{25,3} = \mathbf{376}$$

$\lambda > 105$. Må bruke Euler's formel.

Tillatt knekklast F_k :

$$F_k = \frac{\pi^2}{n} \cdot \frac{EI_y}{L_k^2} \quad (80)$$

der $E =$ elastisitetsmodulen for materialet i MPa.

$I_y =$ annet arealmoment om svak akse for bjelkeprofilen i mm^4 .

$n =$ knekksikkerhetsfaktor. Velger en passende verdi. ^(5, side 61)

$$F_k = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 16,7 \cdot 10^5}{9500^2} = 12\,784 \text{ N} = \mathbf{12,8 \text{ kN}}$$

Last F_{tot} i lasttilfelle 2:

$$F_{tot} = Q + 2P = 2914 + (2 \cdot 75876) = 154\,666 \text{ N} = \mathbf{154,7 \text{ kN}}$$

der $Q =$ lasten fra kranbanebjelkens egenvekt i N.

$P =$ hjulkraften i N i lasttilfelle 2, funnet under dimensjoneringen av bruvognen.

$$F_k < F_{tot}$$

Den tillatte knekkraften F_k er mye mindre enn lasten F_{tot} på som søylen blir utsatt for, og bjelkeprofilen må økes. Ser at dette blir en veldig konservativ beregning der det allerede er sikkerhetsfaktorer inni påsatt last, samt forenklingen med den frie opplagringen, men da dette er en veldig kritisk del av kranstrukturen, bestemmes det at disse beregningene er fornuftige. I tillegg blir ikke hele tverrsnittet på toppen av søylen belastet jevnt, og dette gir også en god grunn for å holde beregningen konservativ.

Prøver å øke bjelkeprofilstørrelsen til et HE220B-profil:

Slankhet λ til et HE220B-profil:

$$\lambda = \frac{L_k}{i_y} = \frac{9500}{55,9} = \mathbf{170}$$

$\lambda > 105$. Må bruke Euler's formel.

Tillatt knekklast F_k :

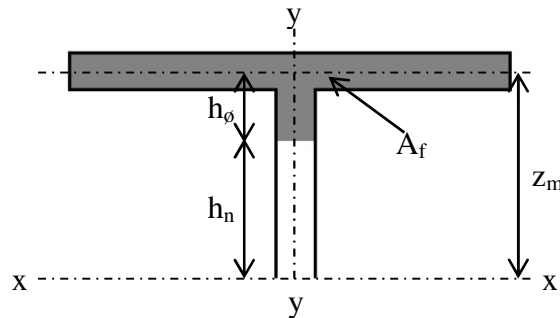
$$F_k = \frac{\pi^2}{n} \cdot \frac{EI_y}{L_k^2} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 284 \cdot 10^5}{9500^2} = 217\,404\,N = \mathbf{217,4\,kN} > F_{tot}$$

Et HE220B-profil vil holde. Ved kontroll mot knekking om søylens sterke akse vil toppen være bedre innspent, og det vil ikke være nødvendig å gjøre noen beregninger.

Den store sikkerheten i denne beregningen gir en trygghet om at kranbanesøylene vil tåle eventuelle belastninger midt på bjelken som følge av uventede sammenstøt fra mennesker eller andre objekter, og krefter som følge av termisk utvidelse.

3.5.2 Kontroll mot vipping i kranbrudrageren

Det gjøres en kontroll mot vipping av kranbrudrageren. Når løpekatten står på midten, blir bjelken utsatt for en bøyning om sterk akse. Det må derfor sjekkes at trykksiden i tverrsnittet ikke vil knekke ut sideveis. Det brukes en forenklet vippingskontroll som er utviklet fra NS 3472-1984, og som er konservativ i forhold til Eurokode 3. Metoden er modifisert av Geir Terjesen, og kan benyttes om en har grunnleggende kunnskaper om Euler og Tetmajer. ⁽⁷⁾



Bøyepeningen σ_m midt i trykkflensen:

$$\sigma_m = \frac{M_{maks,x} \cdot z_m}{I_x} = \frac{148004 \cdot 10^3 \cdot 121,25}{149,2 \cdot 10^6} = \mathbf{120 \text{ MPa}} \quad (81)$$

der $M_{maks,x}$ = det maksimale bøyemomentet i Nmm i lasttilfelle 2, funnet under dimensjoneringen av kranbrudrageren.
 z_m = avstanden imellom profilets nøytralakse og flensens midtpunkt i mm.

Tilhørende aksialkraft F :

$$F = \sigma_m \cdot A_1 = 120 \cdot 17,5 \cdot 260 = 546\,000 \text{ N} = \mathbf{546,0 \text{ kN}} \quad (82)$$

der A_1 = trykkflensens areal i mm^2 .

Arealet A_f :

$$h_\emptyset = \frac{1}{3} \left(\frac{h}{2} - t \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{260}{2} - 17,5 \right) = 37,5 \text{ mm} \quad (83)$$

$$h_n = 2h_\emptyset = 2 \cdot 37,5 = 75 \text{ mm} \quad (84)$$

$$A_f = \frac{A}{2} - h_n \cdot t = \frac{11800}{2} - (75 \cdot 17,5) = \mathbf{4588 \text{ mm}^2} \quad (85)$$

Annet arealmoment $I_{f,y}$ for A_f om svak akse:

$$I_{f,y} = \frac{I_y}{2} - \frac{h_n \cdot t^3}{12} = \frac{51,3 \cdot 10^6}{2} - \frac{75 \cdot 17,5^3}{12} = \mathbf{25,6 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} \quad (86)$$

Treghetsradien $i_{f,y}$:

$$i_{f,y} = \sqrt{\frac{I_{f,y}}{A_f}} = \sqrt{\frac{25,6 \cdot 10^6}{4588}} = \mathbf{74,7 \text{ mm}} \quad (87)$$

Slankheten λ :

$$\lambda = \frac{L_k}{i_{f,y}} = \frac{4000}{74,7} = 54 \quad (88)$$

$\lambda > 105$. Må bruke Tetmajers formel.

Tillatt knekkspenning σ_k :

$$\sigma_k = 310 - 1,14\lambda = 310 - (1,14 \cdot 54) = 248 \text{ MPa} \quad (89)$$

Knekklast F_k :

$$F_k = \sigma_k \cdot A_f = 248 \cdot 4588 = 1137824 \text{ N} = \mathbf{1337 \text{ kN}} \quad (90)$$

Tillatt knekklast $F_{k,tillatt}$:

$$F_{k,tillatt} = \frac{F_k}{n_k} = \frac{1137824}{2} = 568912 \text{ N} = \mathbf{568 \text{ kN}} \quad (91)$$

Sikkerhetsfaktoren mot knekking settes lavt til 2,0 fordi beregningsmetoden er konservativ.

$$F_{k,tillatt} > F$$

Ingen fare for vipping. Kontrollen er ekstra konservativ da det ligger noe ekstra sikkerhet inne i bøyemomentet på kranbrudrageren.

3.5.3 Kontroll mot vipping i kranbanebjelkens lengste spenn

Bøyepeningen σ_m midt i trykkflensen:

$$\sigma_m = \frac{M_{maks,x} \cdot z_m}{I_x} = \frac{135213 \cdot 10^3 \cdot 172}{148,2 \cdot 10^6} = \mathbf{120 \text{ MPa}}$$

der $M_{maks,x}$ = det maksimale bøyemomentet i Nmm i lasttilfelle 2, funnet under dimensjoneringen av kranbanebjelkene.

z_m = avstanden imellom profilets nøytralakse og flensens midtpunkt i mm.

Tilhørende aksialkraft F :

$$F = \sigma_m \cdot A_1 = 120 \cdot 17 \cdot 110 = 224\,400 \text{ N} = \mathbf{224,4 \text{ kN}}$$

der A_1 = trykkflensens areal i mm².

Arealet A_f :

$$h_\emptyset = \frac{1}{3} \left(\frac{h}{2} - t \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{360}{2} - 17 \right) = 54,3 \text{ mm}$$

$$h_n = 2h_\emptyset = 2 \cdot 54,3 = 108,7 \text{ mm}$$

$$A_f = \frac{A}{2} - h_n \cdot t = \frac{7790}{2} - (108,7 \cdot 17) = \mathbf{2047 \text{ mm}^2}$$

Annet arealmoment $I_{f,y}$ for A_f om svak akse:

$$I_{f,y} = \frac{I_y}{2} - \frac{h_n \cdot t^3}{12} = \frac{84,4 \cdot 10^6}{2} - \frac{108,7 \cdot 17^3}{12} = \mathbf{42,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}$$

Treghetsradien $i_{f,y}$:

$$i_{f,y} = \sqrt{\frac{I_{f,y}}{A_f}} = \sqrt{\frac{42,2 \cdot 10^6}{2047}} = \mathbf{144 \text{ mm}}$$

Slankheten λ :

$$\lambda = \frac{L_k}{i_{f,y}} = \frac{4200}{144} = 29$$

$\lambda > 105$. Må bruke Tetmajers formel.

Tillatt knekkspenning σ_k :

$$\sigma_k = 310 - 1,14\lambda = 310 - (1,14 \cdot 29) = \mathbf{276 \text{ MPa}}$$

Knekklast F_k :

$$F_k = \sigma_k \cdot A_f = 276 \cdot 2047 = 564972 \text{ N} = \mathbf{564 \text{ kN}}$$

Tillatt knekklast $F_{k,tillatt}$:

$$F_{k,tillatt} = \frac{F_k}{n_k} = \frac{564972}{2} = 282486 \text{ N} = \mathbf{282 \text{ kN}}$$

Sikkerhetsfaktoren mot knekking settes lavt til 2,0 fordi beregningsmetoden er konservativ.

$$F_{k,tillatt} > F$$

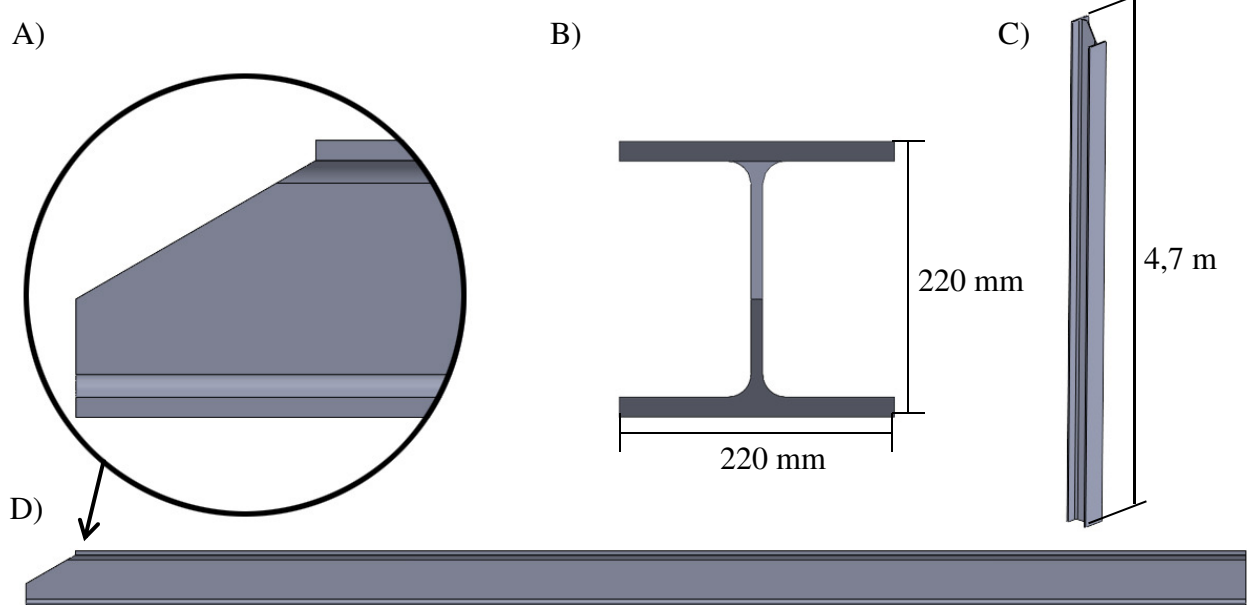
Det at lasten virker under profilets skjærsenter, og veggens som opplager i bakkant motvirker også vipping.

4. ELEMENT- OG LØSNINGSVALG

4.1 Komponenter

4.1.1 Komponenter som må tilvirkes

Søylebjelke



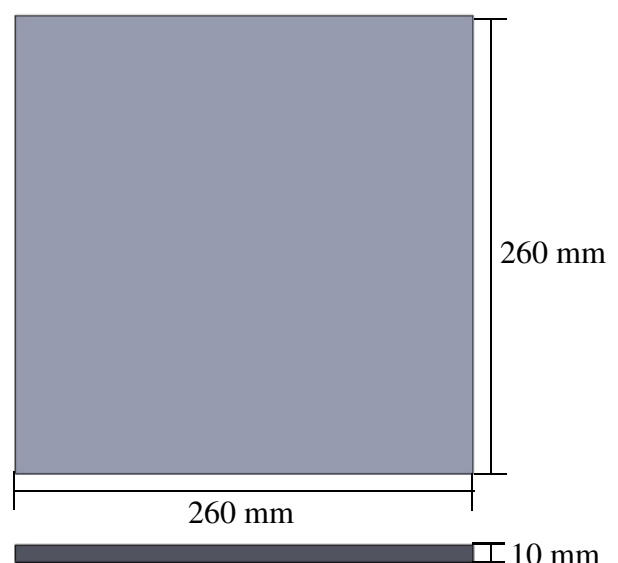
Figur 40: Illustrasjon av søylebjelken. Figur A viser et detaljutsnitt fra toppen av bjelken, figur B viser bjelkens profil, figur C viser bjelken stående sett fra skrå, og figur D viser bjelken liggende sett fra siden.

Søylebjelkens skal bestå av en standard HE220B-bjelke og skal være av konstruksjonsstål S355. Bjelkens lengde er 4,7 m, og dens funksjon er å holde oppe kranbanen. I toppen skal bjelken tilpasses kranbanens dimensjoner som vist i figuren over.

Søylefotplate

Søylefotplaten skal bestå av en kvadratisk plate med sidelengde 260 mm og tykkelse 10 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Komponentens funksjon er å fordele lasten fra søylebjelken, og den skal sveises fast i bjelkens bunn.

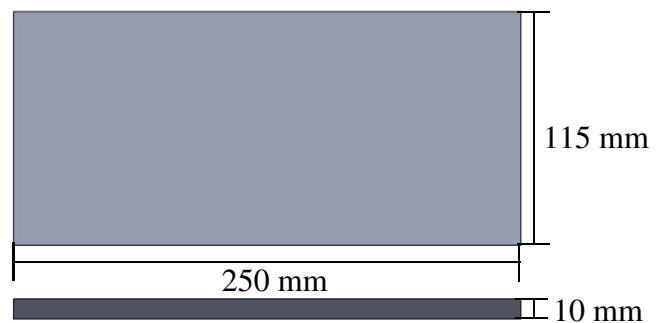
Platen gir også mulighet for en eventuell fastbolting til gulvet.



Figur 41: Illustrasjon av søylefotplaten.

Søyletopplate

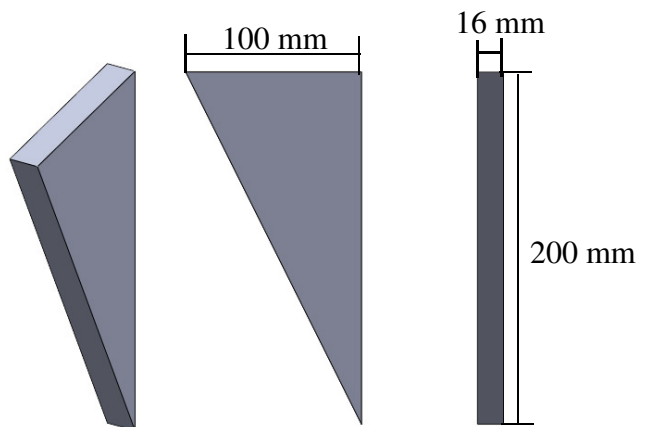
Søyletopplaten skal bestå av en plate med sidelengdene 115 mm og 250 mm. Tykkelsen skal være på 10 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Platens funksjon er å fordele lasten fra kranbanen utover søylebjelken, og dens dimensjoner gir rom for kilesveiser i forbindelsen imellom søylene og kranbanen.



Figur 42: Illustrasjon av søyletopplaten.

Søyletoppstivere

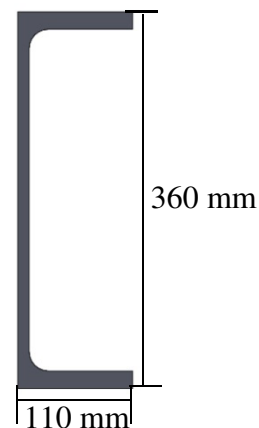
Søyletoppstiverne skal ha bredde 100 mm, lengde 200 mm og tykkelse 15 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Komponentens funksjon er å fungere som søylebjelkens flens i toppen, og dens tykkelse passer bjelkens originale flenstykkelser.



Figur 43: Illustrasjon av søyletoppstiveren.

Kranbanebjelke

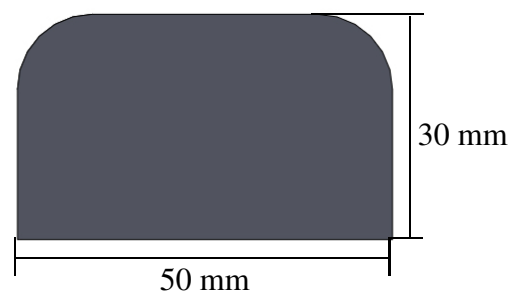
Kranbanebjelkene skal bestå av UPE360-bjelker med lengde 15 meter. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Kanalstålets funksjon er å fungere som en bane der kranbrua kan kjøre langs.



Figur 44: Illustrasjon av kranbanebjelkens profil.

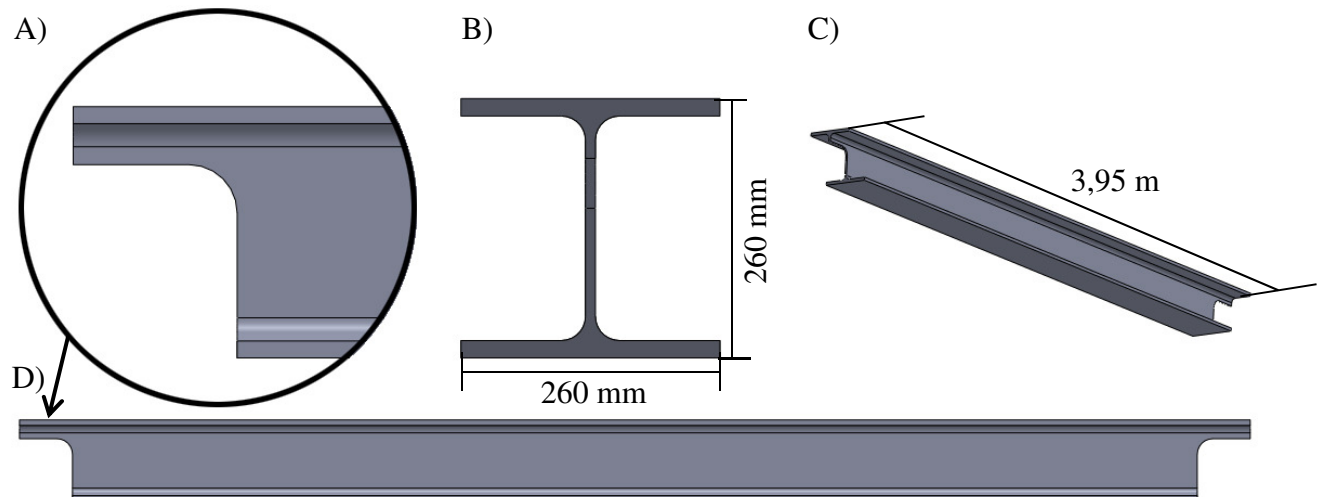
Kranbaneskinne

Flate kranskinner er tilgjengelige i Norsk Stål sin produktkatalog, og de er av materialet S355JO. Kranbaneskinnas lengde skal være 14,95 meter, og det skal være en på hver kranbanebjelke.



Figur 45: Illustrasjon av kranbaneskinnens profil.

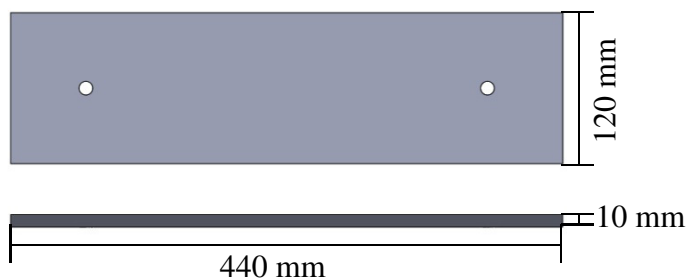
Kranbrudrager



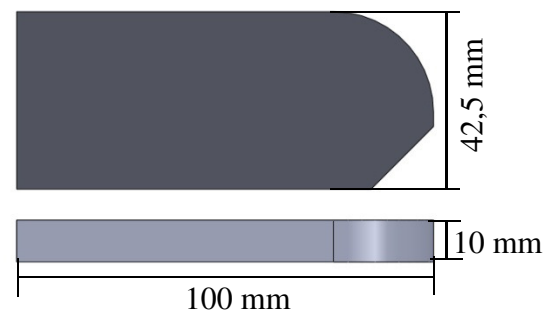
Figur 46: Illustrasjon av kranbrudrageren. Figur A viser et detaljutsnitt fra enden av bjelken, figur B viser bjelkens profil, figur C viser bjelken sett fra skrå, og figur D viser bjelken liggende sett fra siden.

Kranbrudrageren skal bestå av en standard HE260B-bjelke og skal være av konstruksjonsstål S355. Bjelkens lengde er 3,95 m, og dette er hovedkomponenten i kranbrudrageren. I begge endene er bjelken tilpasset bruvognene og kranbanebjelken.

Endeplate



Endestiver



Figur 47: Illustrasjon av endeplaten og endestiveren.

Endeplaten skal bestå av en plate med sidelengdene 440 mm og 120 mm. Tykkelsen skal være 10 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Platens funksjon er å fordele lasten fra kranbrudrageren utover bruvognen i tillegg til å kunne tilkobles den ved hjelp av skruer.

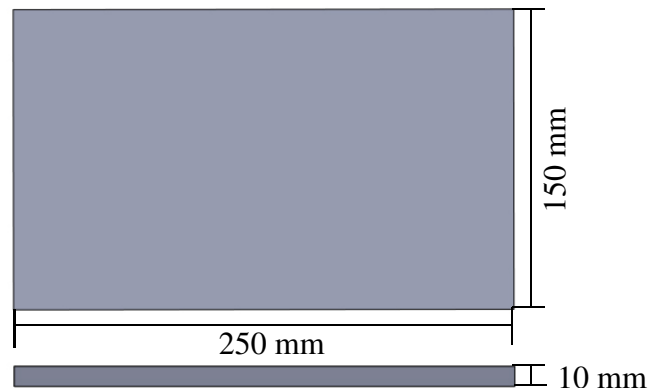
Endestiverne skal ha lengde 100 mm, høyde 42,5 mm og tykkelse 10 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Komponentens funksjon er å fordele lasten fra kranbrudrageren utover endeplaten. Skråkanten i nederste hjørne til høyre er for å gi rom for en kilesveis.

Kranbruskinne

Denne skinnen skal være av samme type som kranbaneskinnen. Kranbruskinnas totale lengde skal være 3,5 meter, og det skal være en på begge sider av kranbrudrageren nederste flens.

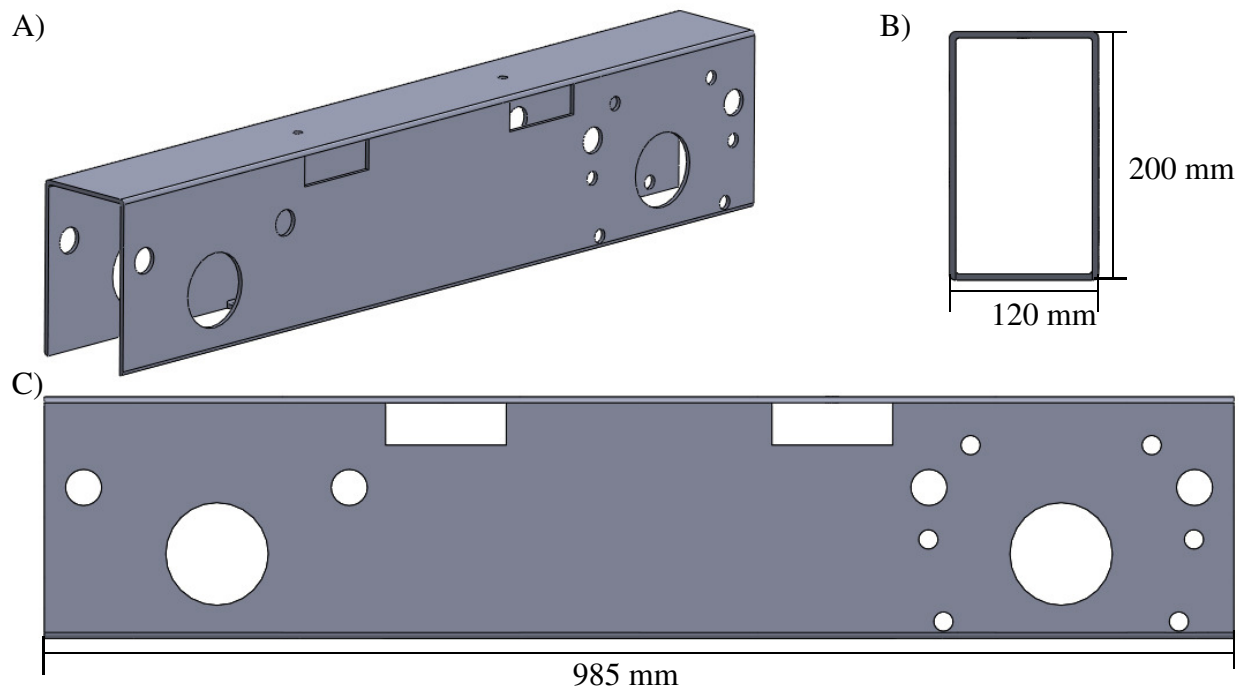
Avstiverplate

Avstiverplaten skal bestå av en plate med sidelengdene 250 mm og 150 mm. Tykkelsen skal være 10 mm og materialet skal være konstruksjonsstål S355. Platens funksjon er å stive av endene på den belastede flensen på kranbrudrageren.



Figur 48: Illustrasjon av avstiverplaten.

Bruvognbjelke



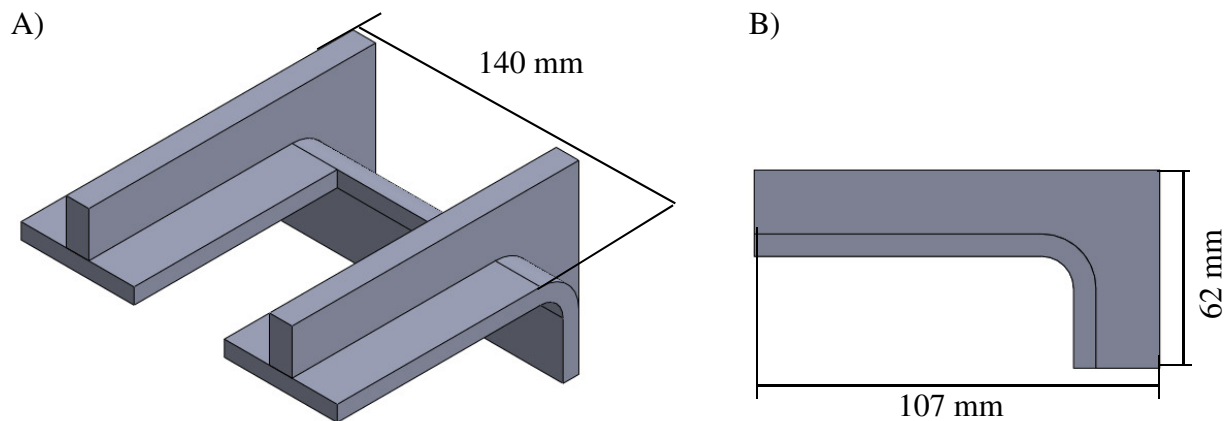
Figur 49: Illustrasjon av bruvognbjelken. Figur A bjelken sett fra skrå, figur B viser bjelkens profil, figur C viser bjelken sett fra siden.

Bruvognbjelken skal bestå av et 200x120 hulprofil med veggtykkelse 5 mm. Bjelkens lengde skal være 985 mm, og materialet skal være konstruksjonsstål S355.

I begge endene må det bores hull for å få festet hjulblokkene, og for å gi rom til akselen fra elektromotoren. På den ene siden må det i tillegg bores hull for feste av torsjonsbraketten til kjøremotoren.

I toppen skal det bores hull for festeboltene som forbinder kranbrua til bruvognen. Det blir da nødvendig å ha åpninger slik at det skal være mulig å feste og stramme mutterne til disse festeboltene.

Opplagerplate

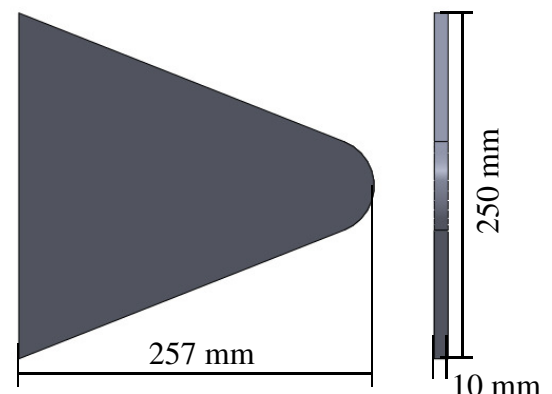


Figur 50: Illustrasjon av opplagerplaten. Figur A viser opplagerplaten sett fra skrå, og figur B viser den sett fra siden.

Opplagerplaten skal lages av en plate med bredden 140 mm og tykkelsen 7 mm. 2 ganger tykkelsen må trekkes fra lengden på grunn av forlengelse ved knekking, og lengden blir dermed 128 mm. Siden håndberegningen viste at tverrsnittet var for lite, ble det valgt å sveise på to plater for å forsterke komponenten. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Opplagerplatens funksjon er å holde kranbanen inntil veggen.

Endestopplate

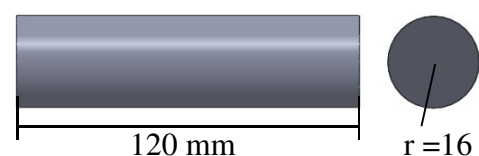
Endestopplaten skal ha høyde 250 mm og bredde 257 mm. Platen skal ha tykkelsen 10 mm, og den skal være av konstruksjonsstål S355. Platens funksjon er å stanse kranbrua fra å kjøre for langt mot enden av kranbanen.



Figur 51: Illustrasjon av endestopplaten.

Endestopp sylinder

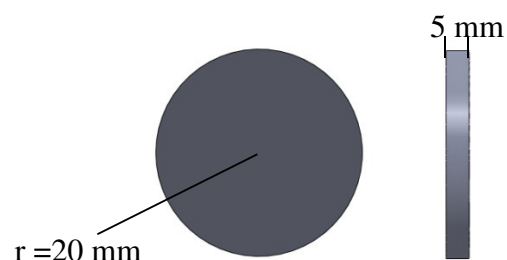
Endestopp sylindere skal lages av en sylinder med diameter lik 32 mm, og den skal ha en lengde på 120 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Sylindere funksjon er å føre kraften fra kranbrua inn i veggen.



Figur 52: Illustrasjon av endestopp sylindere.

Endestopp rørende

Denne delen skal ha tykkelsen 5 mm, og den skal ha en diameter på 20 mm. Materialet skal være konstruksjonsstål S355. Delen skal sveises til enden av endestopp sylindere som står imot veggen, og den skal fordele kraften fra bruvognen utover et større areal.



Figur 53: Illustrasjon av endestopp rørende.

4.1.2 Innkjøpte komponenter

Bruvognenes kjøremaskineri

Det er valgt å bruke elektromotor med tilhørende hjulblokker fra Demag til kranbruas framdrift. Hjulblokkene består av en komplett hjulsats i kassett med hjul og lager. De kan enkelt boltes fast til i bruvognas bjelkeprofil og kjøremotoren. Dette vil være en god løsning da disse komponentene vil passe godt sammen, og fordi de kunne plukkes utfra katalog ⁽²⁹⁾ etter gitte betingelser:

- Omdreining n_h :

$$n_k = \frac{60V_K}{\pi D} \quad (92)$$

der V_K = kranbruas kjørehastighet i m/s.
 D = hjulets diameter i m.

$$n_h = \frac{60 \cdot 0,2}{\pi \cdot 0,16} = \mathbf{24 \text{ rpm}}$$

- Kjørehastighet på 12 m/min.
- Maksimal masse m_{maks} per motor. Dette er hva den enkelte motor må kunne dra når løpekatten står i ytterste stilling, og kranbrua kjøres mens nyttelasten heises:

$$m_{maks} = \frac{2P}{g} \quad (93)$$

der P = hjulkraften funnet under dimensjoneringen av bruvognen i N. I denne verdien inngår det allerede litt sikkerhet via tilleggsfaktorer. Denne sikkerheten er såpass liten at det ikke vil føre til noe særlig overdimensjonering av kjøremaskineriet.
 g = gravitasjonskonstanten i m/s^2 .

$$m_{maks} = \frac{2 \cdot 65799}{9,81} = \mathbf{13 \ 415 \ kg}$$

- En maksimal masse m_{hjul} per hjul:

$$m_{hjul} = \frac{P}{g} = \frac{65799}{9,81} = \mathbf{6707 \ kg} \quad (94)$$

- Et lavt daglig bruk. Minste verdi er på 0,25 timer daglig, noe som er passende i dette tilfellet.
- Et høyt lastspektrum, der lasten som løftes ofte er oppimot den tillatte lasten.
- Et hjulmateriale av støpejern (GJS-700-2).

- En flat skinne av stål med flytegrense på 335 MPa og dimensjonene 50 ganger 30 mm.
- Påkrevd total utgående effekt N_e lik 1391 W.

Den totale utgående effekten blir i dette tilfellet overstyrt av den maksimale massen m_{maks} . Det vil si at den valgte motoren har en lavere utgående effekt enn N_e , men disse komponentene har da tydeligvis andre faktorer og bedre egenskaper enn det som er brukt i punkt 3.3.8 – "Nødvendig effekt på kranbruas kjøremotor".

De valgte komponenters egenskaper er vedlagt som vedlegg E, og deres betegnelser er som følger:

Kjøremotor bruvogn nord:	AME 30 DD-M0-45-1-55.7 ZBF 90 B 4 B020
Kjøremotor bruvogn nord:	AME 30 DD-M0-45-3-55.7 ZBF 90 B 4 B020
Hjulblokk dreven:	DRS-160-A45-A-65-B-X-A30
Hjulblokk udreven:	DRS-160-NA-A-65-B-X-X

Begge hjulblokkene har medfølgende buffere, og de har samme ytterdimensjoner. Eneste forskjellen på de to motorbetegnelsene er plasseringen av terminalboksen. Elektromotoren inkluderer brems, gir og torsjonsbrakett.



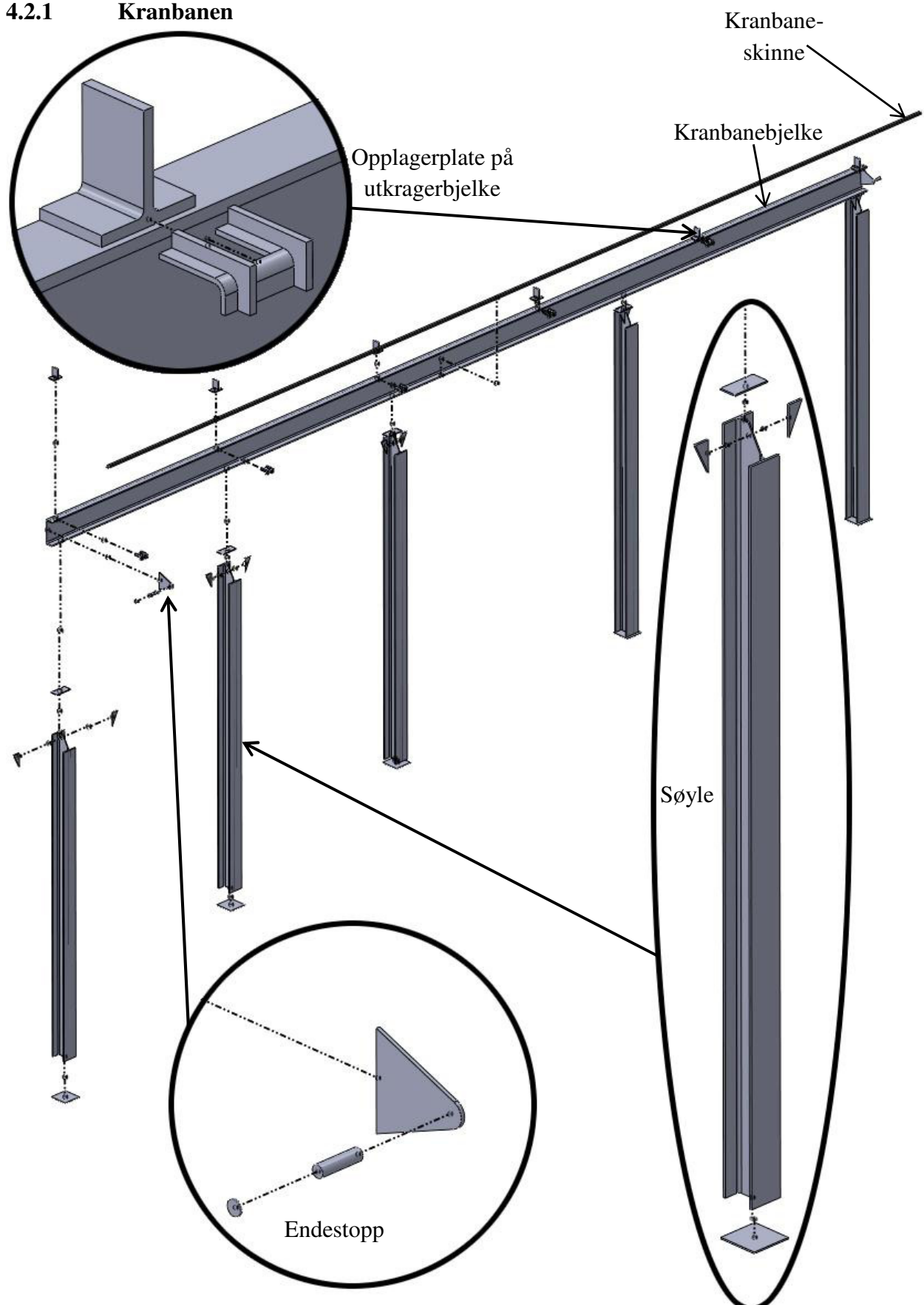
Figur 54: Produktbilde av en hjulblokk og påmontert elektromotor fra Demag. ⁽²⁷⁾

Festemateriale

I skrueforbindelser skal det brukes syrefaste sekskantskruer i fasthetsklasse 8.8. Dette kjøpes som standard hyllevare.

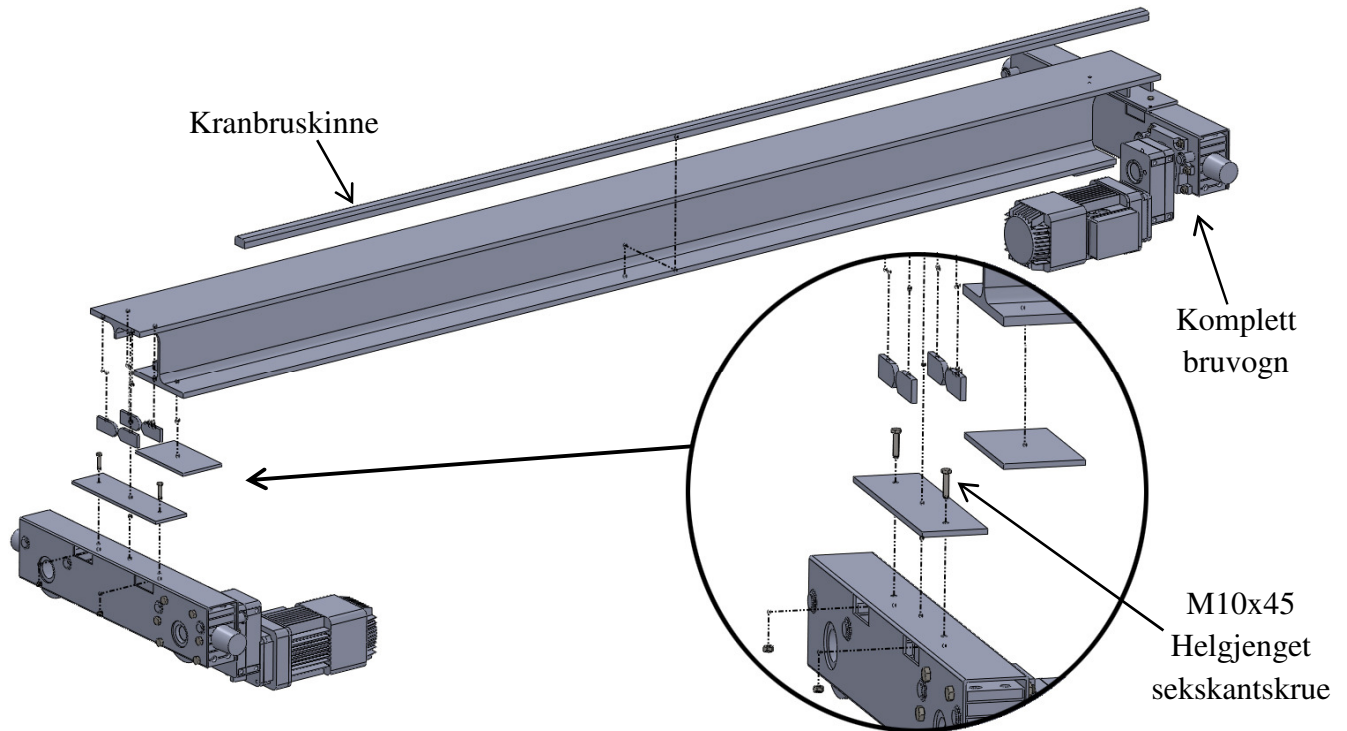
4.2 Hovedelementer

4.2.1 Kranbanen



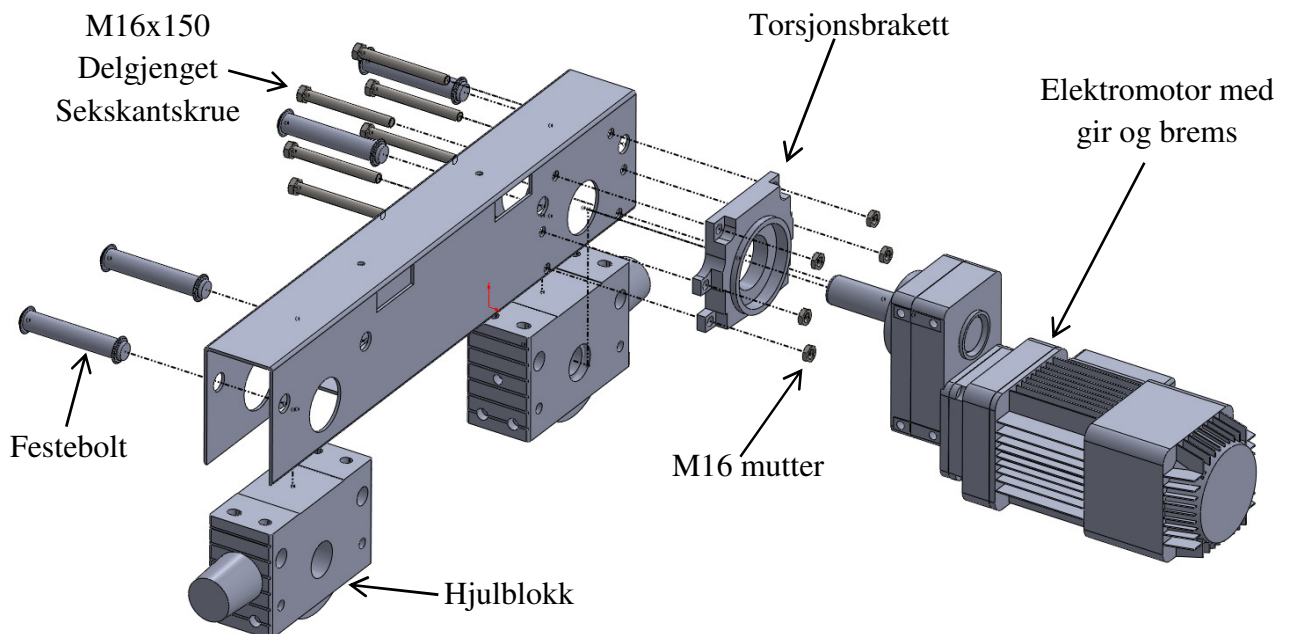
Figur 55: Illustrasjon av den sørlige kranbanen med sammenstillinger og diverse detaljer.

4.2.2 Kranbrua



Figur 56: Illustrasjon av kranbrua med sammenstilling og et detaljutsnitt.

4.2.3 Bruvogn



Figur 57: Illustrasjon av bruvognen med alle dens komponenter. Torsjonsbraketten og festeboltene til hjulblokkene medfølger de innkjøpte komponentene. Det er mulig at det trengs skiver til å fylle ut festeboltene, men dette er standardvarer og vil ikke føre med seg problemer.

5. STRUKTUROPTIMERING

5.1 Strukturspenninger

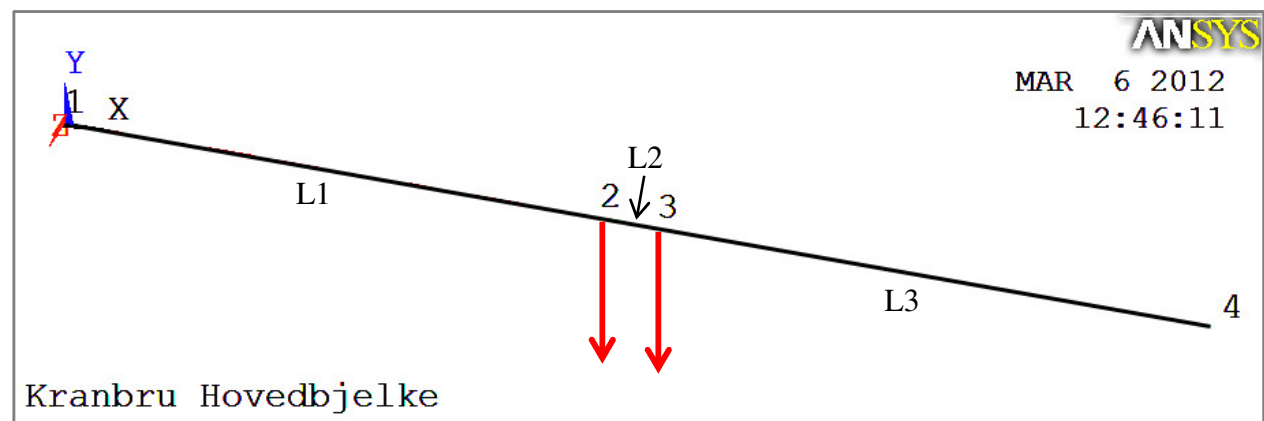
5.1.1 Verifikasjon av kranbrudragerens dimensjonering

Tabell 7: Oversikt over modellens knutepunkter og opplagring.

Knutepunkt	x-koordinat [mm]	y-koordinat [mm]	z-koordinat [mm]	Opplagring
1	0	0	0	UX, UY, UZ, ROTX
2	1850	0	0	
3	2050	0	0	
4	4000	0	0	UY, UZ, ROTX

Tabell 8: Oversikt over modellens linjer, elementtype og funksjon.

Linje	Knutepunkt 1 – Knutepunkt 2	Elementtype	Del
1	1 - 2	BEAM188	Kranbru drager
2	2 - 3	BEAM188	Kranbru drager
3	3 - 4	BEAM188	Kranbru drager



Figur 58: Skjerm bilde fra ANSYS som viser knutepunktene og linjenes plassering. De røde pilene viser hvor de påsatte kreftene befinner seg.

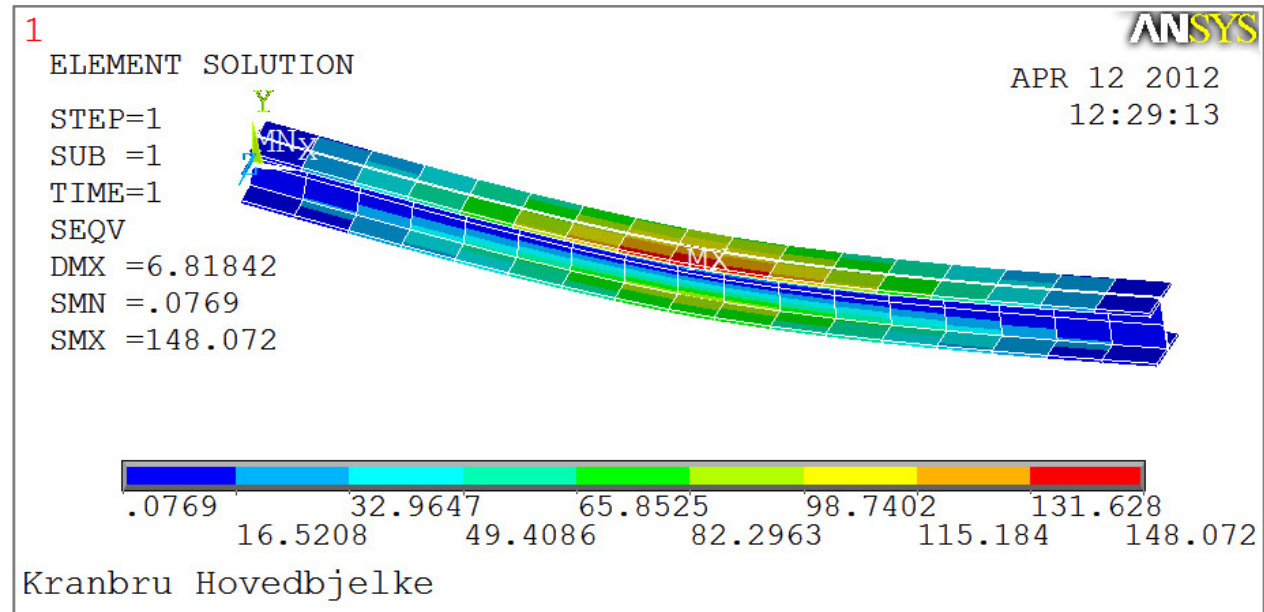
Valg av elementtype:

Beam188 er et to-node bjelkeelement med seks frihetsgrader i hver node; forskyvning i x-, y- og z-retning, og rotasjon om x-, y-, og z-aksen. Elementtypen kan også brukes med et stort utvalg profiler i alle størrelser. Elementstørrelsen er satt til 250 mm.

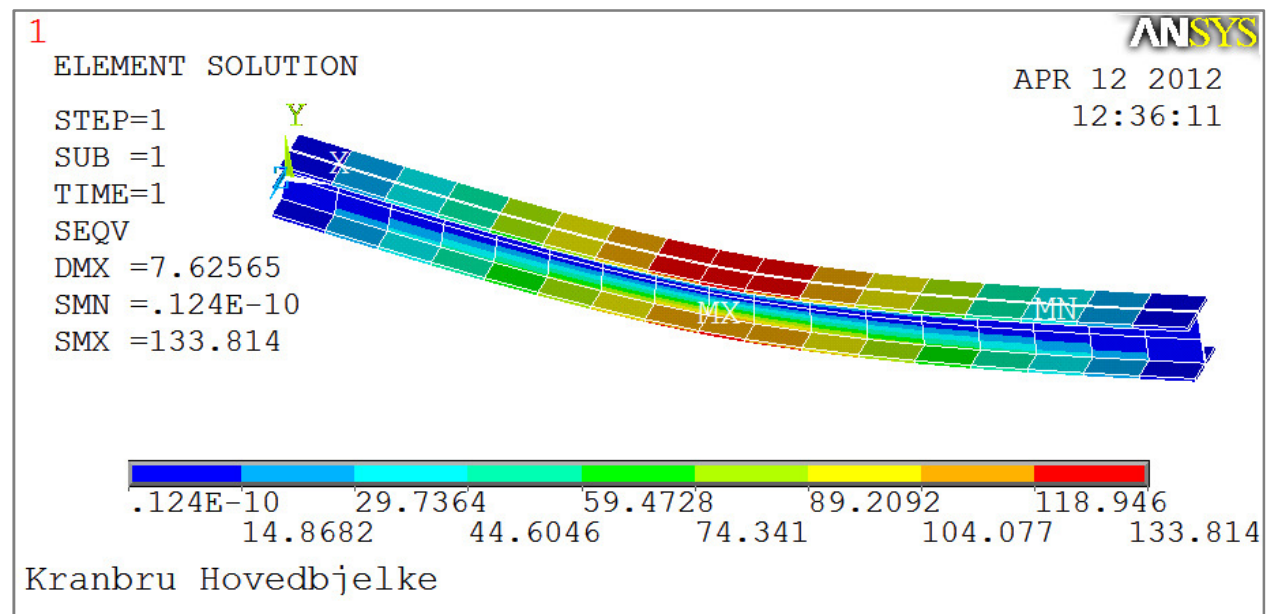
Tabell 9: Oversikt over påsatte laster.

Lasttilfelle	Knutepunkt	Retning	Funksjon	Verdi [N]
1	2	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	66552
	2	-z	Horisontal belastning.	6655
	3	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	66552
	3	-z	Horisontal belastning.	6655
2	2	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	76886
	3	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	76886

Resultater:



Figur 59: Skjermbilde fra ANSYS Classic som viser von-Mises-spenninger i MPa og nedbøyning i mm ved *lasttilfelle 1*, sammen med et plott av modellen og dens elementer. Den største nedbøyningen er på 6,8 mm, og den største spenningen er på 148 MPa. Disse befinner seg ca. på midten av bjelken.



Figur 60: Skjermbilde fra ANSYS Classic som viser von-Mises-spenninger i MPa og nedbøyning i mm ved *lasttilfelle 2*, sammen med et plott av modellen og dens elementer. Den største nedbøyningen er på 7,6 mm, og den største spenningen er på 134 MPa. Disse befinner seg ca. på midten av bjelken.

Sammenlikning mot håndberegninger:

Tabell 10: Oversikt over resultater og sammenlikning mellom håndberegning og FEM-analyse.

Lasttilfelle	Resultattype	Verdi håndberegning	Verdi FEM-analyse	Avvik
1	Von-Mises spenning	144 MPa	148 MPa	4 MPa
	Nedbøyning	5,8 mm	6,8 mm	1 mm
2	Von-Mises spenning	129 MPa	134 MPa	5 MPa
	Nedbøyning	-	7,6 mm	-

Spenningene i denne FEM-analysen er noe høyere en i håndberegningen, med fortsatt godt under den tillatte spenningen. Avvikene kan skyldes at radiene i bjelkeprofilen mellom steg og flens ikke er tatt med i FEM-analysen. Dette fører til et mindre tverrsnitt og en noe høyere spenning. I tillegg er det satt på horisontale krefter som er en tiendedel av de vertikale kreftene, ikke en tiendedel av det vertikale bøyemomentet slik som i håndberegningen. Da den horisontale belastningen er forholdsvis lav antas det at dette er en god nok tilnærming.

De samme forholdene som forklart ovenfor gjelder også avvikene i nedbøyningen, i tillegg til at de horisontale kreftene ikke er tatt med i håndberegningen av nedbøyningen. Når det gjelder lasttilfelle 2, er ikke nedbøyningen håndberegnet da hjulkraften som er brukt er vil oppstå under statisk prøving, og fordi denne nedbøyningen ikke vil påvirke strukturen i noen negativ grad.

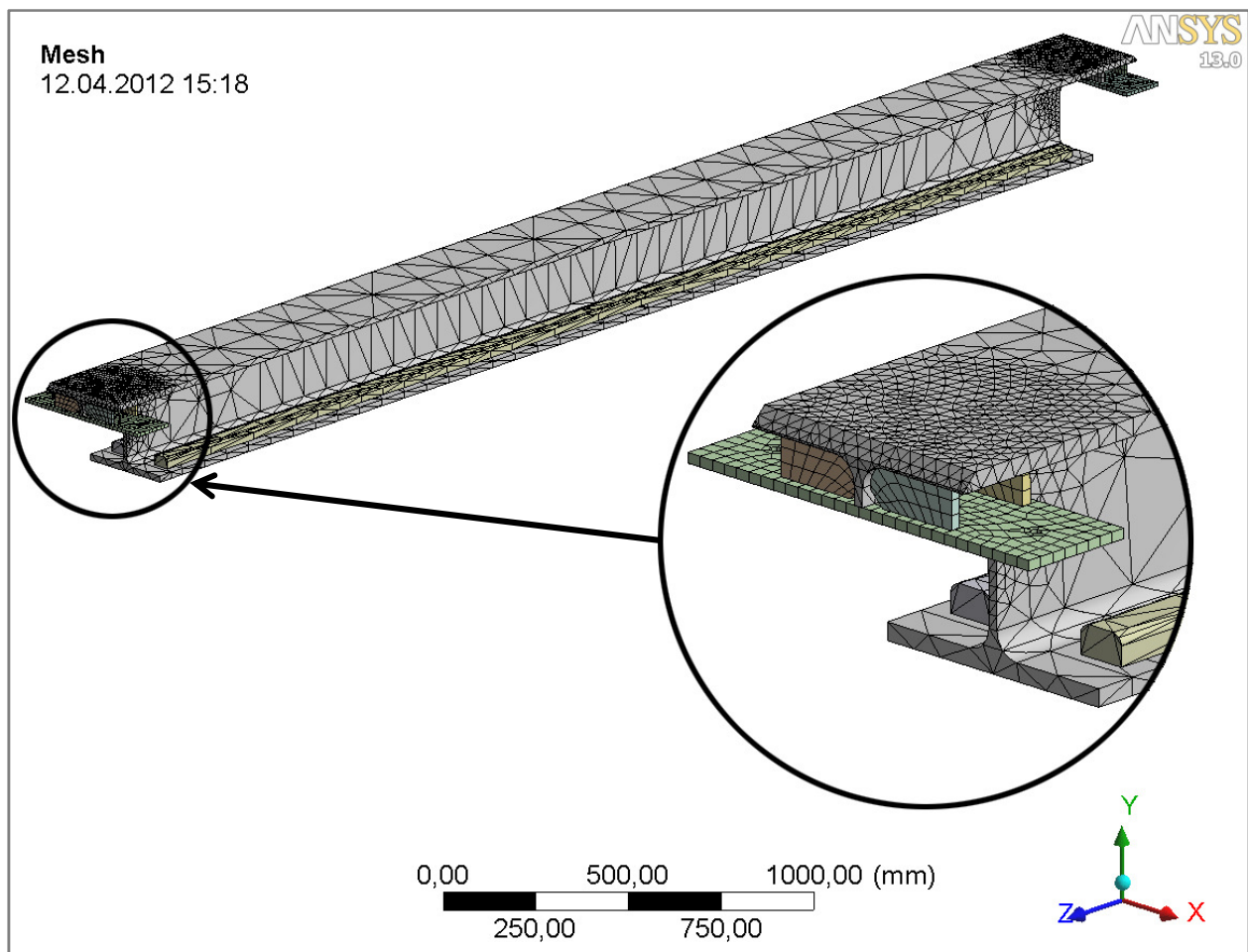
Konkluderer med at resultatene er holdbare på bakgrunn av dette, i tillegg til at det er gjort flere konservative tiltak i beregningen som f.eks. konsekvent opprunding av resultater, og det at den faktiske bjelken vil ikke være hele 4 meter lang.

5.1.2 FEM-analyse av kranbrua

Det er også gjort en detaljert FEM-analyse av kranbrua der det er fokus på detaljene i endene av kranbrudrageren. Dette er gjort for å få et realistisk mulig bilde av belastningssituasjonen, og for å få avdekket uønskede spenningskonsentrasjoner som er vanskelige å forutse eller avdekke ved en håndberegning.

Modellering:

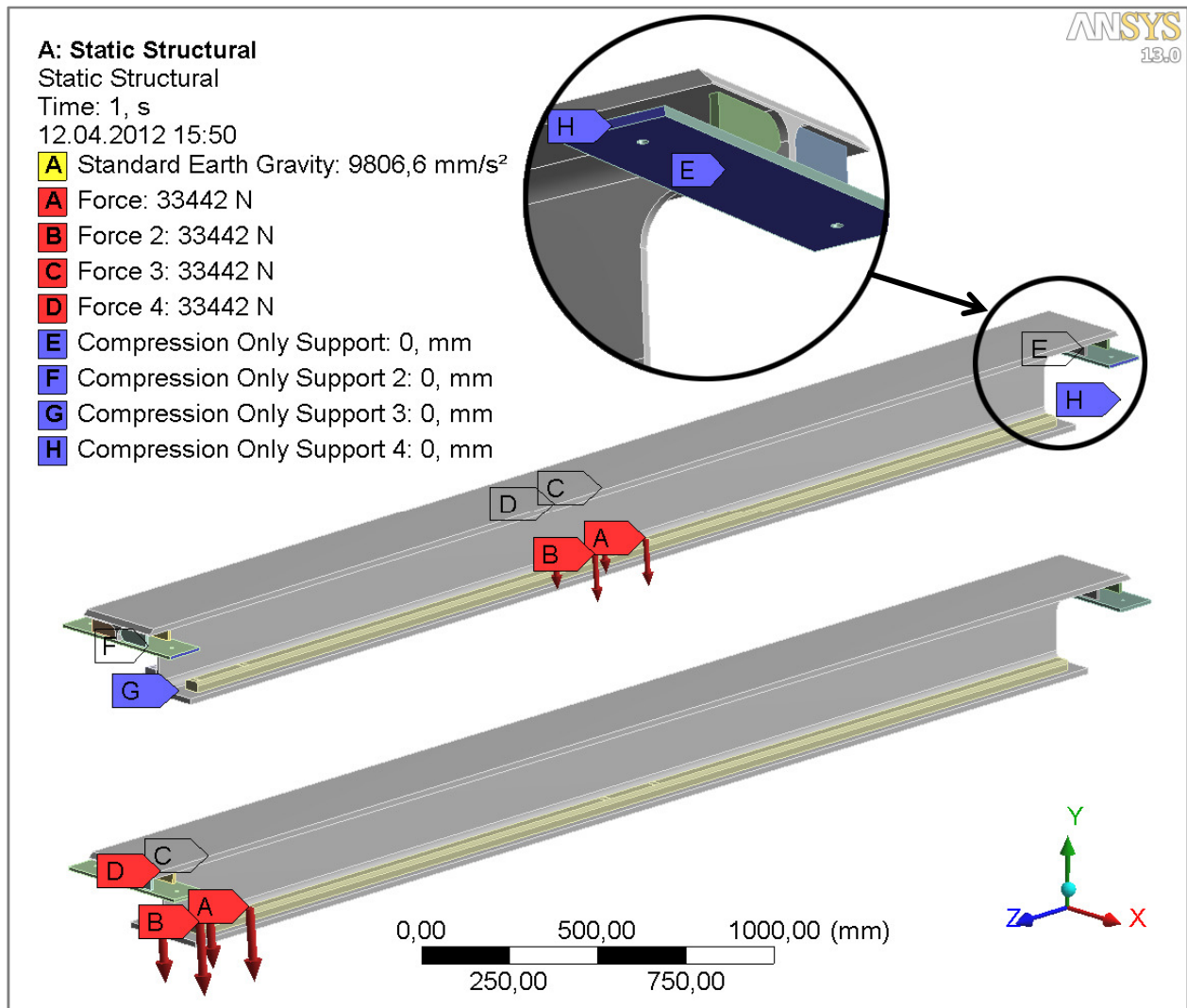
Delen er modellert med de dimensjoner som det ferdige produktet skal ha. Modellen består av selve kranbrudrageren, endestiverne, endeplatene og skinnene. Det er laget små arealer der kraften fra løpekattens hjul skal treffe, og deres plassering er gjort etter samme forutsetninger som er brukt under selve dimensjoneringen. Modellens elementnett er i utgangspunktet ganske grovt, men er gjort finere (elementstørrelse på 15 mm) i endene der den mer kompliserte geometrien befinner seg.



Figur 61: Bilde av modellens elementnett sett fra skrå. Det er vist et utsnitt av kranbruas ende der elementnettet er noe mer detaljerte enn i resten av modellen.

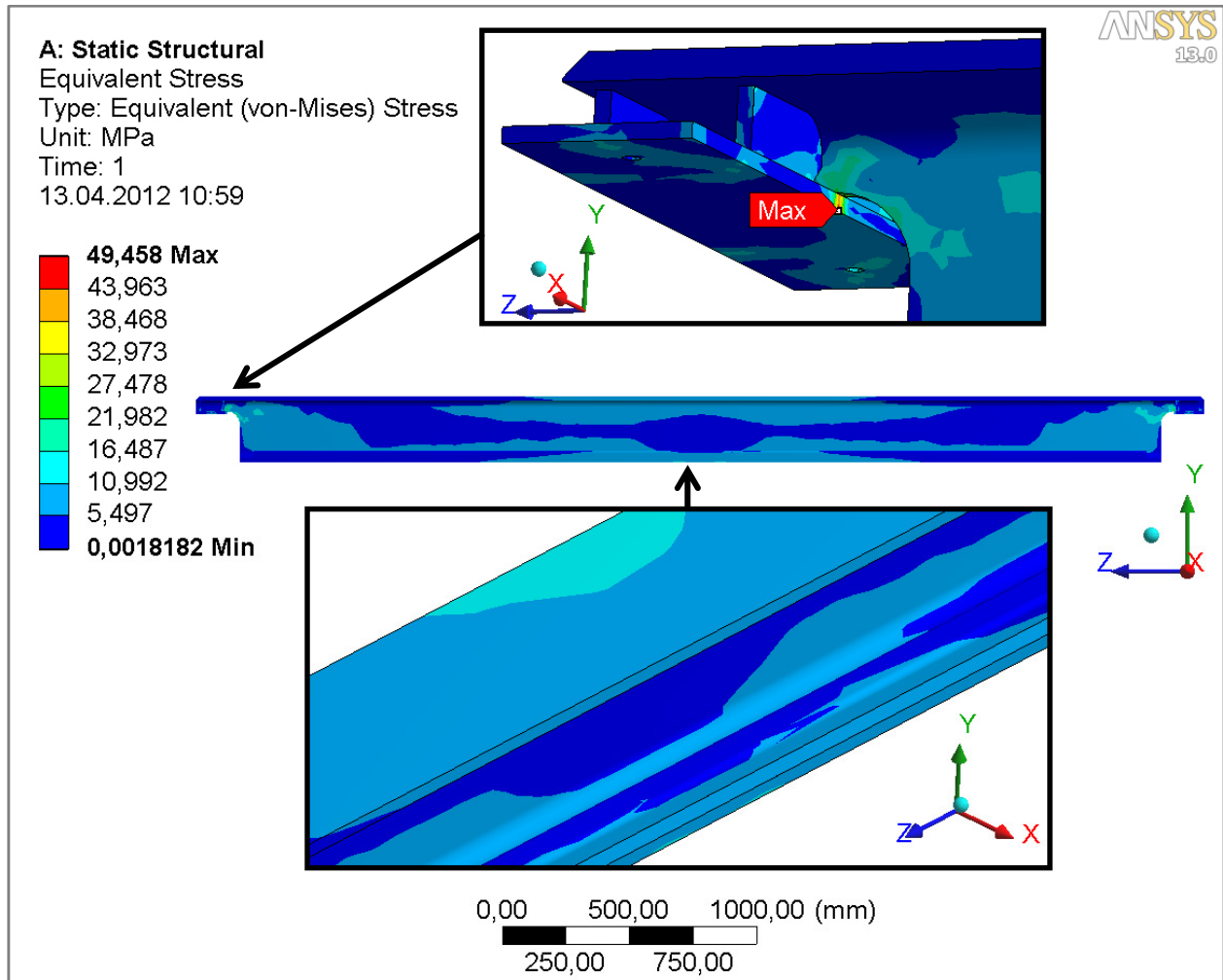
Opplagring og påsatte krefter:

Kranbrua er påført de krefter som er brukt under selve dimensjoneringen. Det er gjort to analyser der den ene tar utgangspunkt i at løpekatten befinner seg litt til siden av midten, og den andre tar utgangspunkt i at løpekatten befinner seg i ytterste stilling. Undersiden av endeplatene er opplagret med en såkalt "Compression Only Support" som best representerer de faktiske forhold. Den oppfører seg som om endeplaten ligger på en flate, men fortsatt kan heve seg fra den. Dette vil i praksis si at endene ikke tar opp moment, men tar opp krefter i negativ y-retning. Det er også påsatt en lik opplagring på endeplatenes kortsider for at modellen skal være i likevekt.



Figur 62: Oversikt over modellens påsatte krefter og opplagring. Øverst vises et utsnitt av opplagringene og hvilke flater de er påsatt, under vises tilfelle 1 der løpekatten står litt til siden for midten, og nederst vises tilfelle 2 der løpekatten står i ytterste stilling. Kraftenes verdier er komponenten av kreftene i x-retning og negativ y-retning, og det vil si at kreftene i hvert punkt er 33276 N nedover og 3328 N bortover.

Resultater tilfelle 1 – løpekatt plassert litt til siden for midten:



Figur 63: Bilde av analyseresultatene fra Ansys Workbench. Bildet viser von-Mises spenningene i kranbrua, og den største spenningen er på ca. 50 MPa. Øverst er et utsnitt av bjelkens ende der den største spenningen befinner seg, i midten vises bjelken sett fra siden, og nederst er et utsnitt som viser midten av bjelken sett skrått ovenfra.

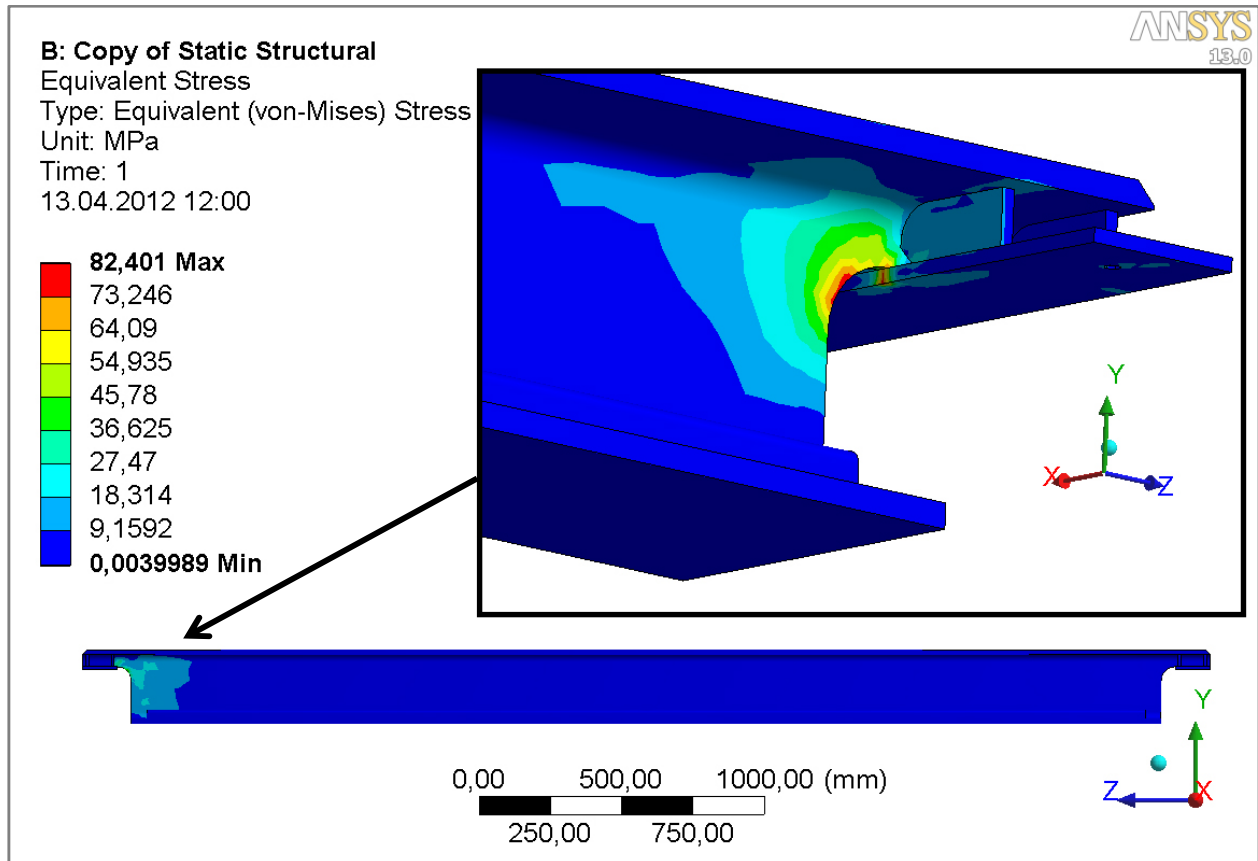
Denne FEM-analysen gav mye lavere spenninger enn håndberegningen. Dette skyldes mest sannsynlig at skinnene fordeler lasten fra løpekatten utover slik at bøyemomentet blir mindre konsentrert på midten av bjelken.

Den største spenningen befinner seg i punktet der kranbrudragerens steg møter endeplata. Uten endestiverne ville mest sannsynlig spenningen bli alt for høy i dette punktet.

Området der kranbrudragerens tverrsnitt vokser, har en spenningskonsentrasjon rundt den buede kurven. Dette er nok en strekkspenning, og dette viser at det kunne ha vært en fare for sprekkvekst i dette området om det hadde vært en spiss vinkel der i stedet.

På midten av kranbrua der flensen møter steget, er det som forventet en spenning på grunn av flensene som blir bøyd nedover av løpekatten. Denne spenningen er uansett alt for lav til å skape noen problemer.

Resultater tilfelle 2 – løpekatt plassert i ytterste stilling:



Figur 64: Bilde av analyseresultatene fra Ansys Workbench. Bildet viser von-Mises spenningene i kranbrua, og den største spenningen er på ca. 82 MPa. Øverst er et utsnitt av bjelkens ende der den største spenningen befinner seg, og under vises bjelken sett fra siden.

I denne analysen befinner de høye spenningene seg som forventet på enden av kranbrudrageren der lastene er påført. Her vises bare det som allerede er beskrevet i tilfelle 1, at den buede kurven i kranbrudragerens steg er nødvendig for å unngå en alt for høy spenningskonsentrasjon og mulig sprekkvekst.

Det vises også at endestiveren fordeler lasten utover endeplata, og at endestiverens dimensjoner er holdbare.

Denne detaljerte FEM-analysen gir et betryggende bilde av hvordan kranbrua takler de påførte kreftene, og resultatene virker fornuftige. På den andre siden så er dette en komplisert analyse med flere deler og mange små elementer, så det er nødvendig å ha håndberegningen og dens verifikasjon i bakhånd.

Det er ikke nødvendig å gjøre denne analysen for lasttilfelle 2 siden den tillatte spenningen økes så mye i forhold til lasten.

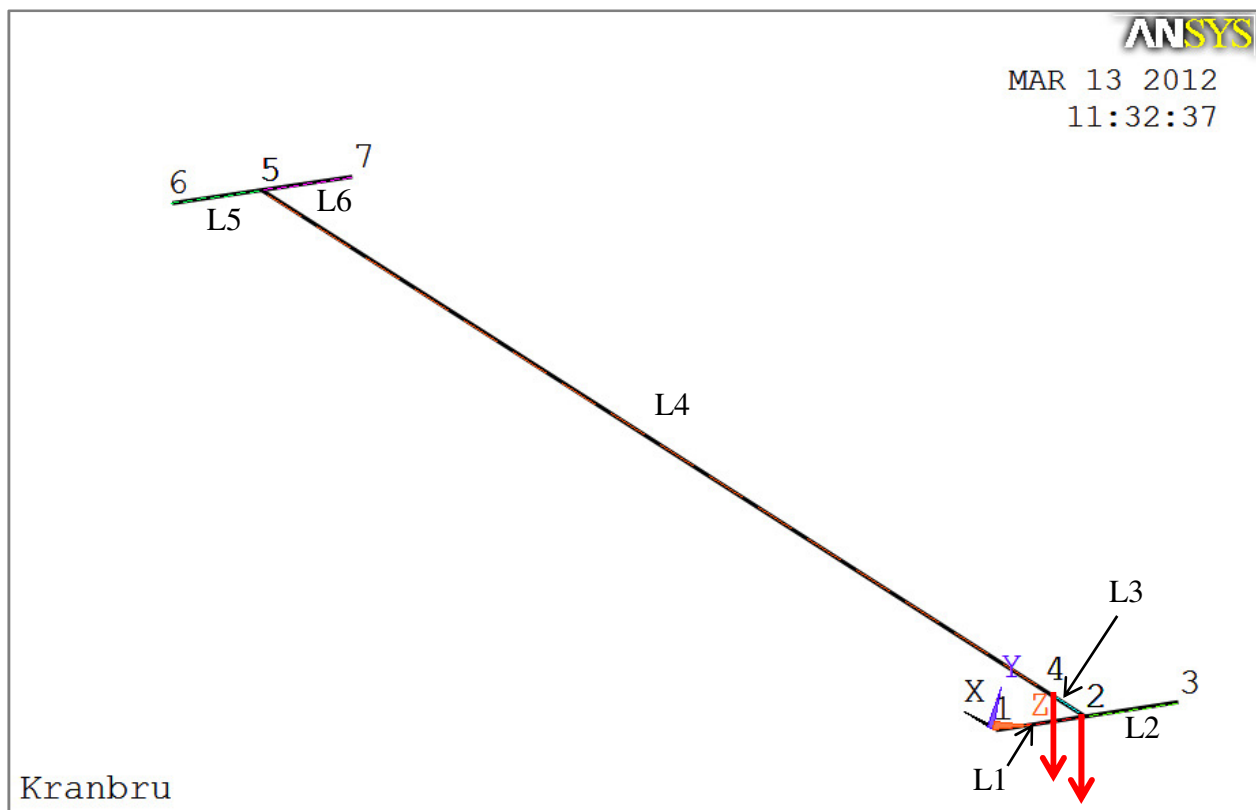
5.1.3 Verifikasjon av bruvognas dimensjonering

Tabell 11: Oversikt over modellens knutepunkter og opplagring.

Knutepunkt	x-koordinat [mm]	y-koordinat [mm]	z-koordinat [mm]	Opplagring
1	0	0	0	UX, UY, UZ, ROTZ, ROTY
2	0	0	350	
3	0	0	700	UX, UY, ROTZ, ROTY
4	200	0	350	
5	4000	0	350	
6	4000	0	0	UX, UY, UZ, ROTZ, ROTY
7	4000	0	700	UX, UY, ROTZ, ROTY

Tabell 12: Oversikt over modellens linjer, elementtype og funksjon.

Linje	Knutepunkt 1 – Knutepunkt 2	Elementtype	Del
1	1 - 2	BEAM188	Kranbru bruvogn
2	2 - 3	BEAM188	Kranbru bruvogn
3	2 - 4	BEAM188	Kranbru drager
4	4 - 5	BEAM188	Kranbru drager
5	6 - 5	BEAM188	Kranbru bruvogn
6	5 - 7	BEAM188	Kranbru bruvogn



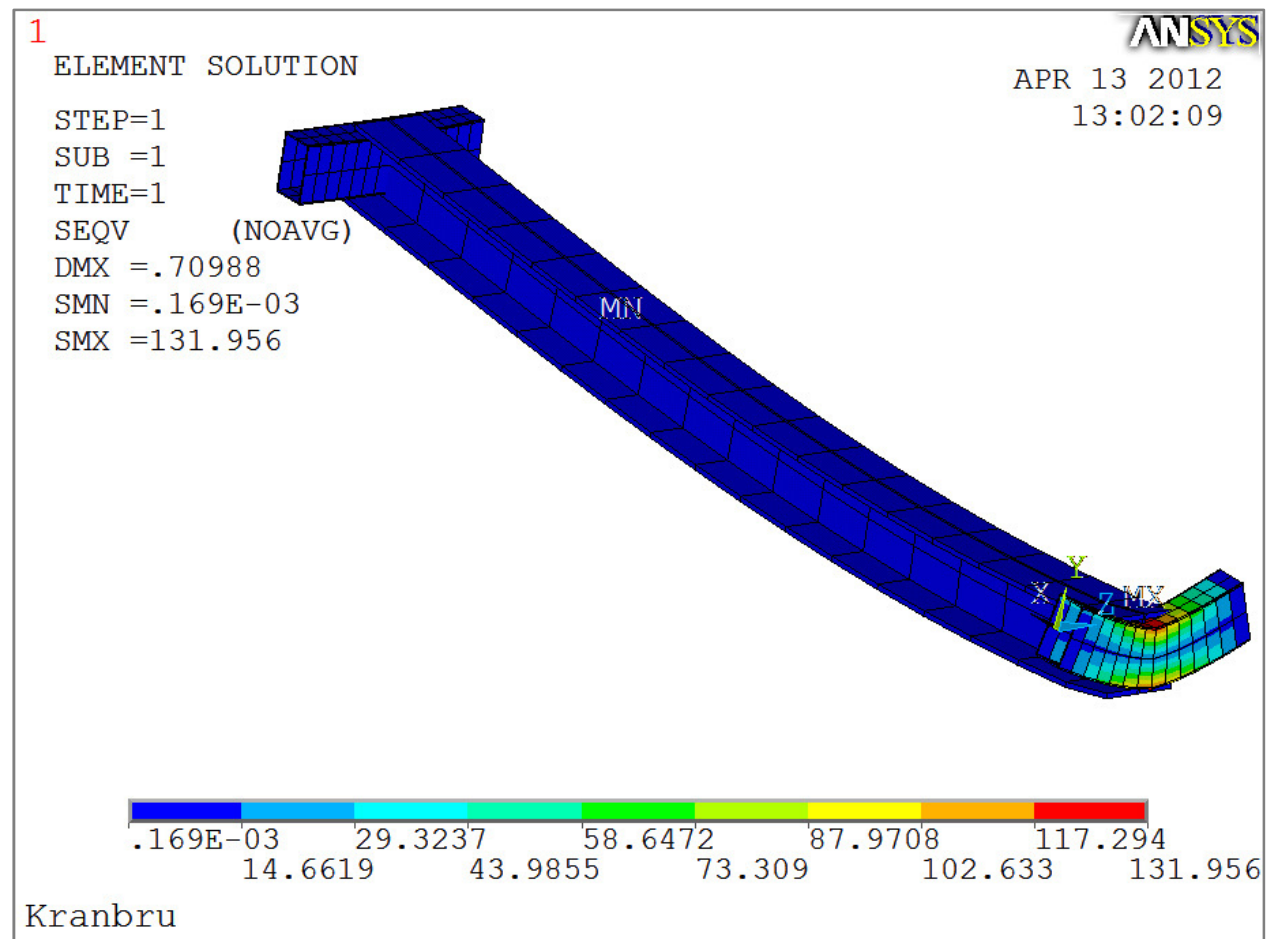
Figur 65: Skjerm bilde fra ANSYS som viser knutepunktene og linjenes plassering. De røde pilene viser hvor de påsatte kreftene befinner seg.

Valg av elementtype:

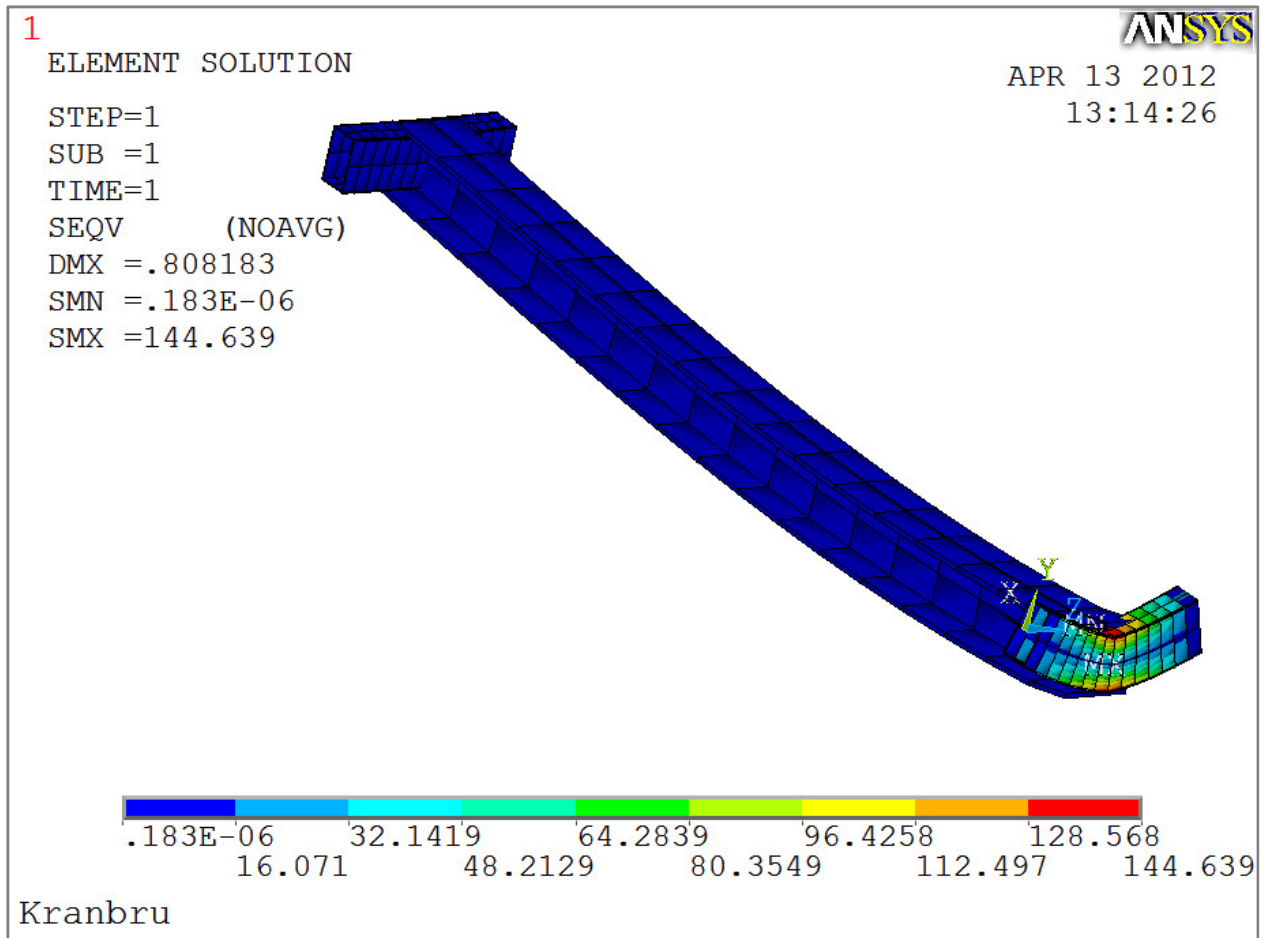
Beam188 er et to-node bjelkeelement med seks frihetsgrader i hver node; forskyvning i x-, y- og z-retning, og rotasjon om x-, y-, og z-aksen. Elementtypen kan også brukes med et stort utvalg av profiler i alle størrelser. Elementstørrelsen er satt til 250 mm på bruvognas drager og 50 mm på bruvognene.

Tabell 13: Oversikt over påsatte laster.

Lasttilfelle	Knutepunkt	Retning	Funksjon	Verdi [N]
1	2	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	66552
	2	-z	Horisontal belastning.	6655
	4	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	66552
	4	-z	Horisontal belastning.	6655
2	2	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	76886
	4	-y	Vertikal belastning fra 2 x hjulkraft.	76886



Figur 66: Skjermbilde fra ANSYS Classic som viser von-Mises-spenninger i MPa og nedbøyning i mm ved **lasttilfelle 1**, sammen med et plott av modellen og dens elementer. Den største nedbøyningen er på 0,7 mm, og den største spenningen er på 132 MPa. Den største spenningen befinner seg på midten av bruvogna nærmest lasten.



Figur 67: Skjerm bilde fra ANSYS Classic som viser von-Mises-spenninger i MPa og nedbøyning i mm ved *lasttilfelle 2*, sammen med et plott av modellen og dens elementer. Den største nedbøyningen er på 0,8 mm, og den største spenningen er på 145 MPa. Den største spenningen befinner seg på midten av bruvognen nærmest lasten.

Sammenlikning mot håndberegninger:

Tabell 14: Oversikt over resultater og sammenlikning mellom håndberegning og FEM-analyse.

Lasttilfelle	Resultattype	Verdi håndberegning	Verdi FEM-analyse	Avvik
1	Von-Mises spenning	141 MPa	131 MPa	10 MPa
	Nedbøyning	0,3 mm	0,7 mm	0,4 mm
	Hjulkraft	65799 N	65880 N	81 N
2	Von-Mises spenning	158 MPa	145 MPa	13 MPa
	Nedbøyning	0,3 mm	0,8 mm	0,5 mm
	Hjulkraft	75876 N	75962 N	86 N

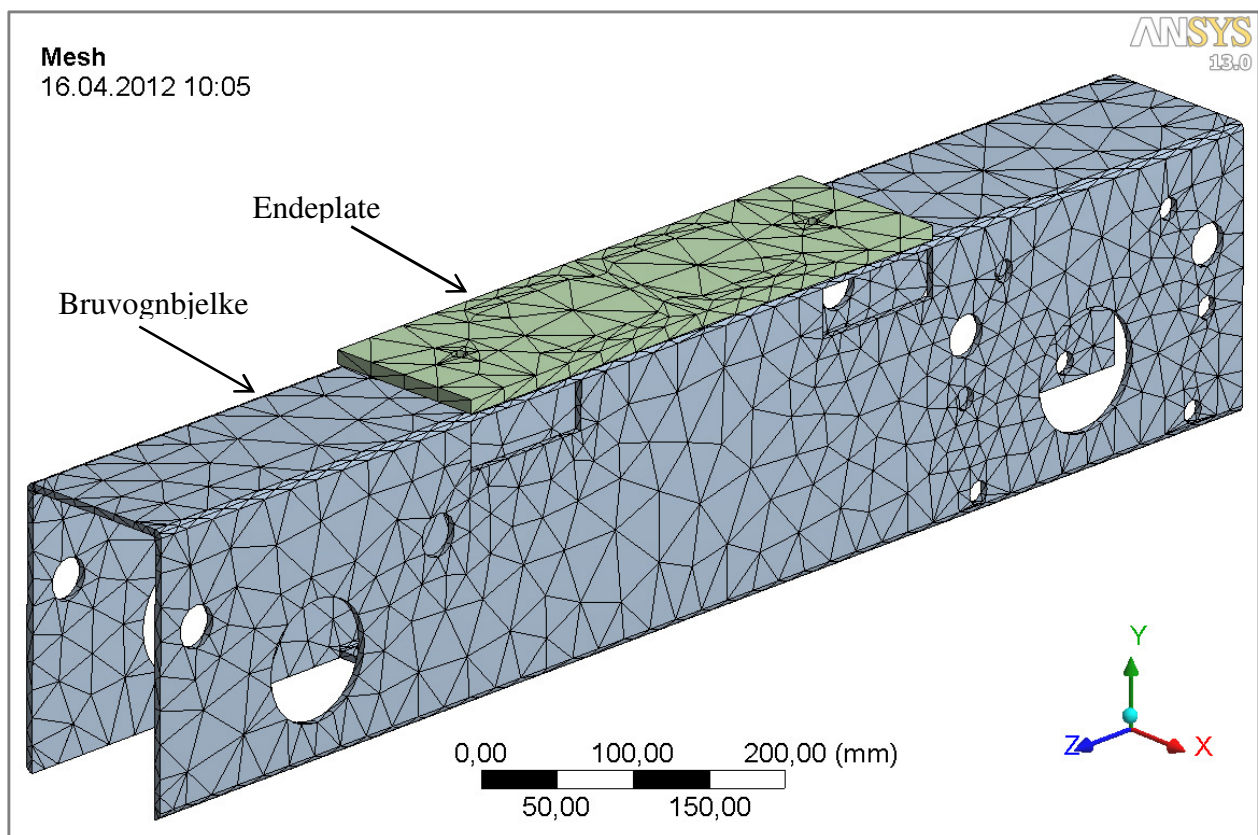
Spenningene er noe lavere enn i håndberegningen, og er godt under den tillatte spenningen. Avvikene kan skyldes at de statiske verdiene for bjelkeprofilene som er tatt fra tekniske tabeller er mer riktige enn hva ANSYS regner seg fram til selv. De samme forenklingene som er gjort i kranbruas dimensjonering når det gjelder den horisontale lasten, er gjort i denne analysen også. Det konkluderes med at resultatene er godt under det tillatte, og at de er rimelige i forhold til hverandre med tanke på forskjellene i beregningsmodellen og håndberegningen.

5.1.4 FEM-analyse av bruvognen

Det er gjort en detaljert FEM-analyse av bruvognas bjelke. Dette var nødvendig da det er gjort flere tilpasninger på bruvognbjelken slik at den skal kunne passe de andre komponentene. Disse tilpasningene (skruehull, akselhull osv.) er ikke med i håndberegningen, men de vil egentlig svekke bjelkens/tverrsnittets styrke noe.

Modellering:

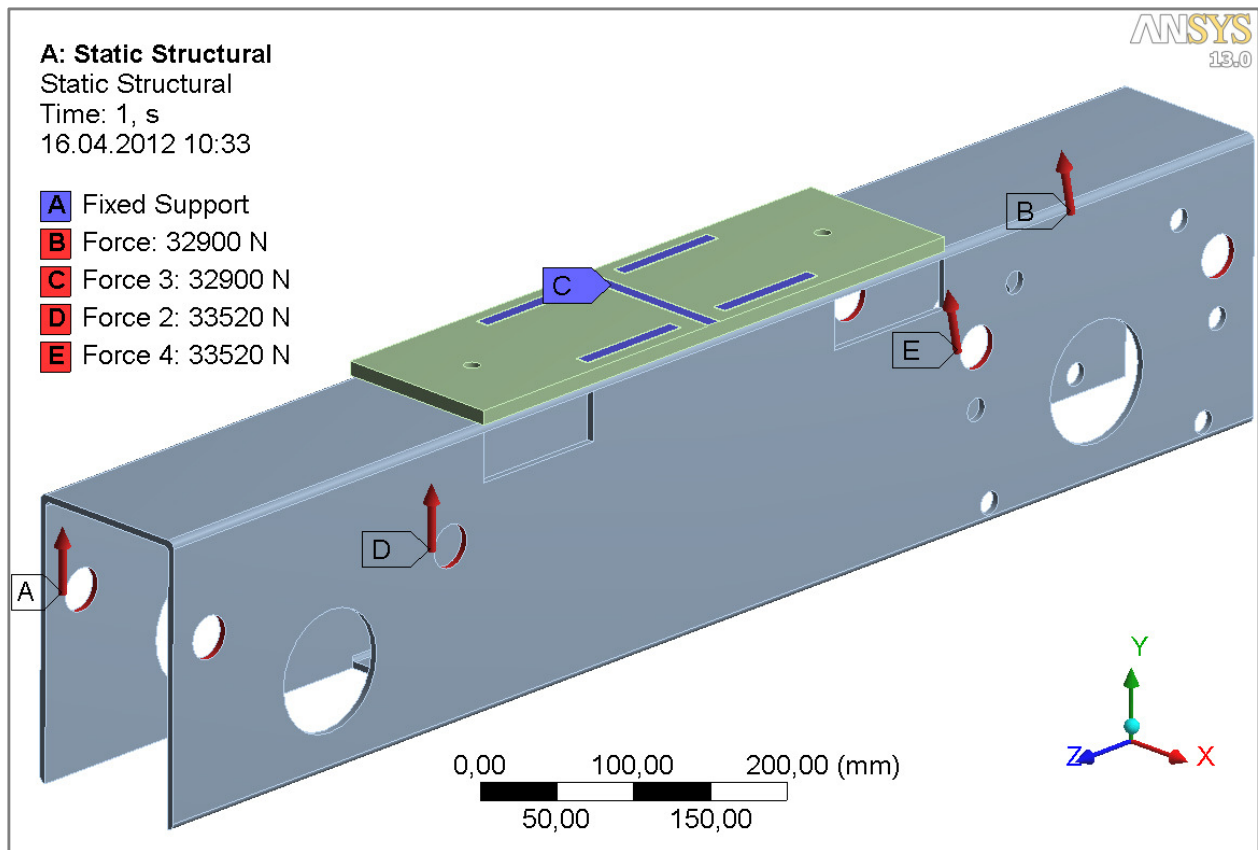
Delen er modellert med de dimensjoner og tilpasninger som det ferdige produktet skal ha. Det er valgt ikke å ha med andre komponenter i analysen annet enn endeplata, som er tatt med for å få et realistisk bilde av hvordan lasten fra kranbrudrageren påføres. Arealene der det er kontakt imellom endeplaten, kranbrudrageren og endestiverne er tatt med i modellen.



Figur 68: Bilde av modellens elementnett. Bildet viser endeplata og selve bruvognbjelken.

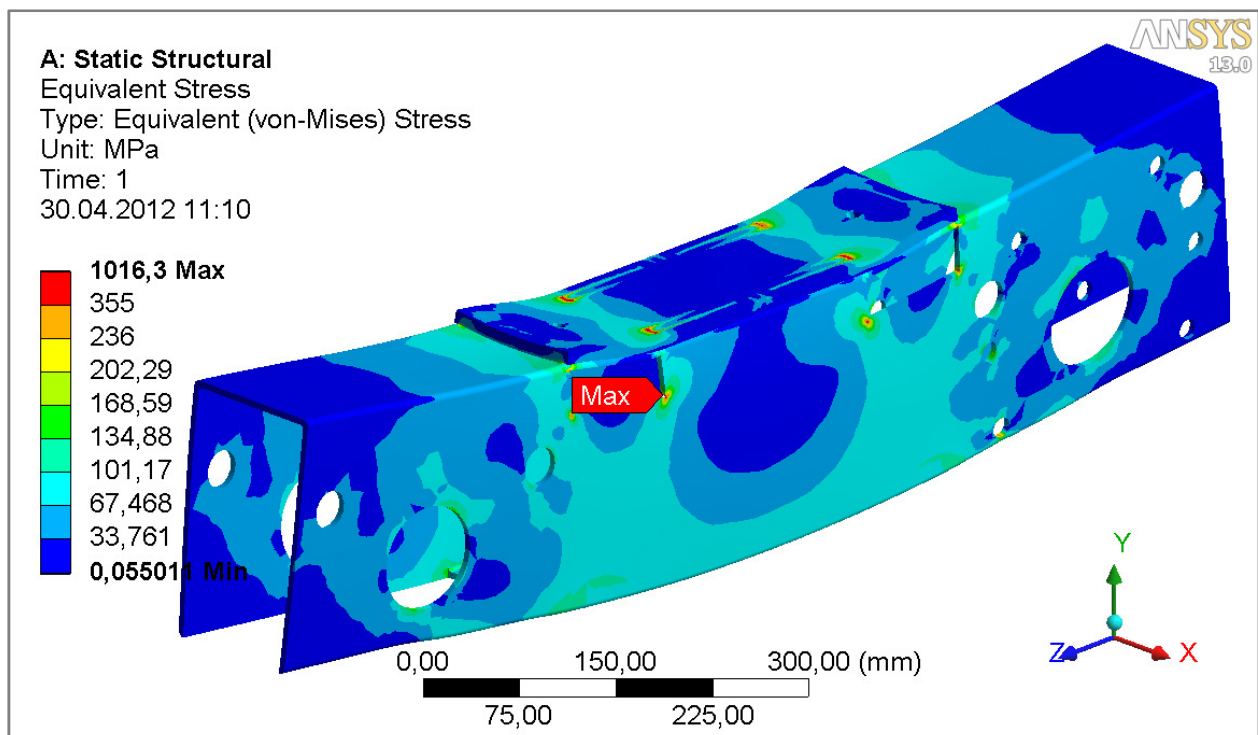
Opplagring og påsatte krefter:

Bruvognen er påført de krefter som er brukt under selve dimensjoneringen. For å få en riktig analyse, er det hele snudd litt på hodet på den måten at modellen er fast innspent i arealene der kraften ifra kranbrudrageren møter endeplaten, og hjulkraften er påført bolthullene som hjulblokkene festes i. Den horisontale kraften som kan oppstå ved oppbremsing er også tatt med på den ene enden. Flaten imellom endeplata og bruvognbjelken sitter helt fast i hverandre, og dette er en god nok tilnærming. I virkeligheten vil de sitte sammen kun i skruehullene.

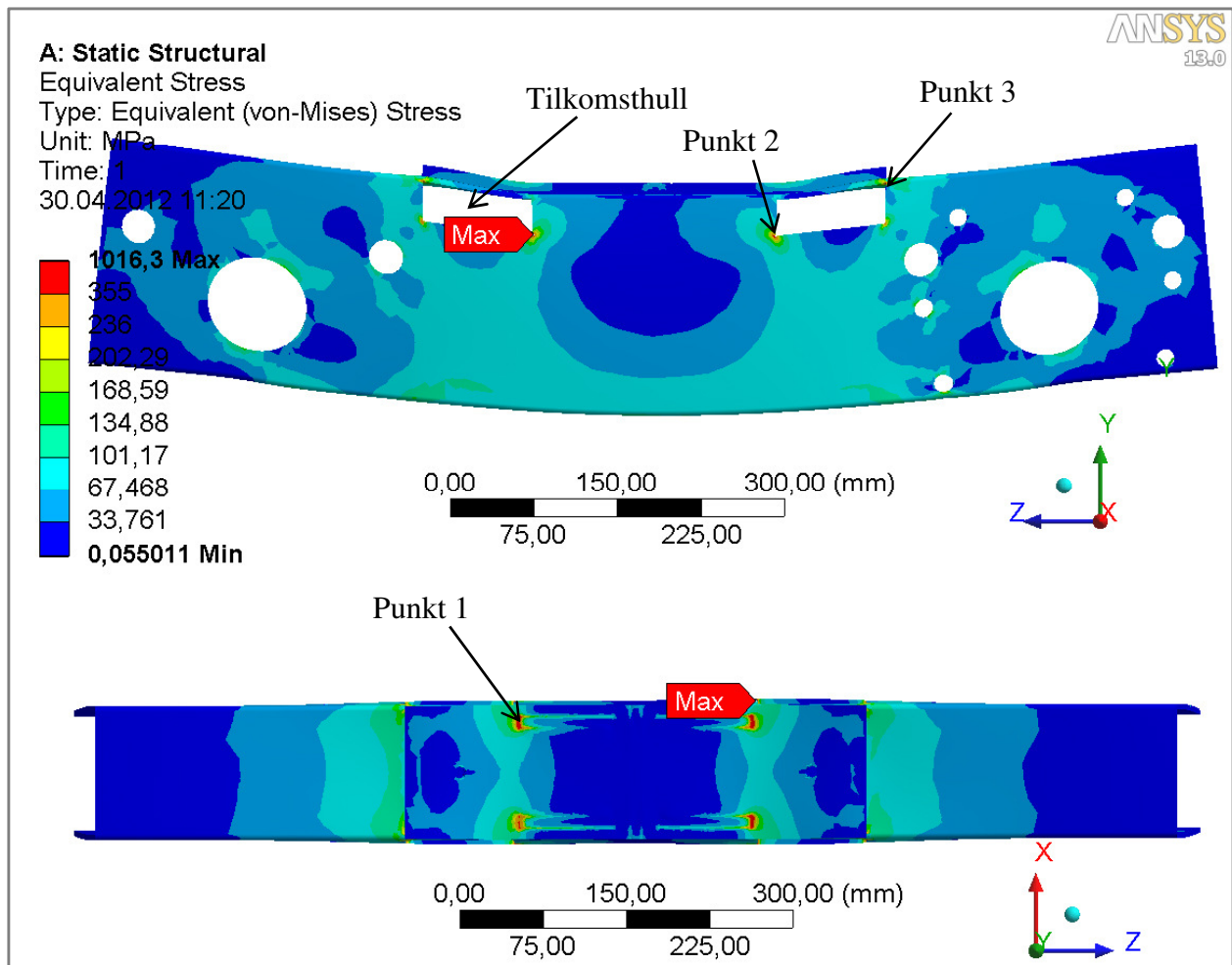


Figur 69: Oversikt over modellens påsatte krefter og opplagring. Kraftene B, C, D og E virker i bolthullene på begge langsider av profilet selv om dette ikke vises så godt på bildet. Kraftene B og C består til sammen av hele hjulkraften på 65799 N, og kraftene D og E består av det samme i tillegg til den horisontale kraften på 12836 N i z-retning.

Resultater:



Figur 70: Bilde 1 av analyseresultatene fra Ansys Workbench.



Figur 71: Bilde 2 av analyseresultatene fra Ansys Workbench. Bildet viser von-Mises spenningene i bruvognen, og den største spenningen er på 1016 MPa. Øverst er modellen sett fra siden, og under er modellen sett ovenfra. Deformasjonen er forstørret 81 ganger.

Denne FEM-analysen ga mye høyere spenninger enn håndberegningen. Dette skyldes singulariteter i form av spisse kanter i modellen, noe som gir unaturlig høye spenninger i dette tilfellet. De reelle spenningene som er gjennomgående i materialet ligger på imellom 70 og 100 MPa. De unaturlig høye spenningene befinner seg ytterst der endestiverne treffer endeplaten (punkt 1, bilde 2), og i hjørnene på tilkomsthullene (punkt 2, bilde 2). Disse spenningene er veldig lokale og vil i verste fall føre til noe lokal flyt i materialet.

Et problemområde kan være i hjørnene der endeplaten treffer bruvognbjelken (punkt 3, bilde 2). Siden endeplaten er stivere enn toppen av bruvognbjelken kan dette føre til høye spenninger lokalt i dette området. Dette er veldig nært spenningskonsentrasjonen i hjørnet av tilkomsthullet, og det er mulig at dette kan utgjøre en risiko med tanke på sprekkvekst ved varierende belastning. Mener at dette ikke vil bli noe problem da det egentlig vil være radier i hjørnene på tilkomsthullene.

Konkluderer med at bruvognbjelken er holdbar. Må spesifisere på konstruksjonstegningene at det skal være en radius i hjørnene av tilkomsthullene. Endeplaten bør også forlenges med 1 cm i hver ende slik at dens endekant ikke ligger akkurat over kanten til tilkomsthullet.

5.1.5 FEM-analyse av kranbanebjelken

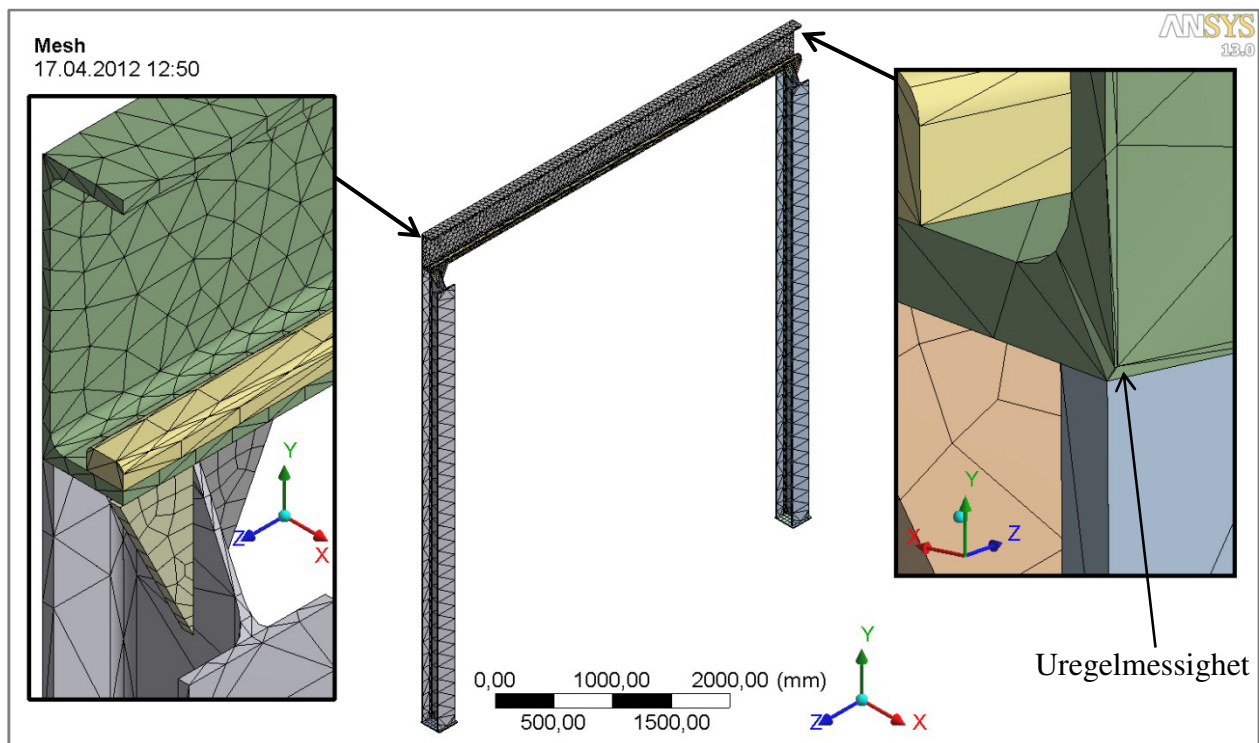
Det gjøres ingen verifikasjon av kranbanebjelkens dimensjonering da den bygger på allerede verifisert data (hjulskraft fra bruvognen). Det er heller valgt å gjøre en detaljert FEM-analyse i Ansys Workbench siden dette vil gi et riktigere bilde av bjelkens opplagring enn det som er mulig med en forenklet simulering i Ansys Classic.

Det som er ønskelig er å få oversikt over den samlede spenningen fra av bøyemomentet på grunn av belastning midt på bjelken, torsjon som følge av at kraften ikke treffer i bjelkeprofillets skjærsenter sammen med at den blir opplagret i bakkant, og spenningen som vil oppstå innerst ved steget på den nederste flensen i området der hjulkraften er.

Modellering:

Det er sett på ett av kranbanens største spenn. Dette er en konservativ forenkling siden det største spennet egentlig vil ha en opplagring på midten som sikrer bjelken fra å rotere slik at det oppstår torsjonsspenninger. Men da noen av de kortere spennene ikke har denne opplagringen, velges det å gjøre det på denne måten. For å få en realistisk opplagring, er søylene som kranbanebjelken står på tatt med i beregningen. Dette gjør modellen noe mer komplisert, men gir en tilnærmet riktig fleksibilitet i kranbanebjelkens opplagring.

Det er laget små arealer der hjulkraften fra kranbrua treffer, og deres plassering er gjort etter samme forutsetninger som er brukt under selve dimensjoneringen. Det er også lagd et tynt areal langs den nederste kanten bak på kranbanebjelkens steg, i tillegg til langs kortsidene. Dette er gjort for kunne simulere veggens tilstedeværelse. Modellens elementnett er i utgangspunktet ganske grovt og uryddig, men er gjort finere på selve kranbanebjelken siden det er denne delen det er fokus på.

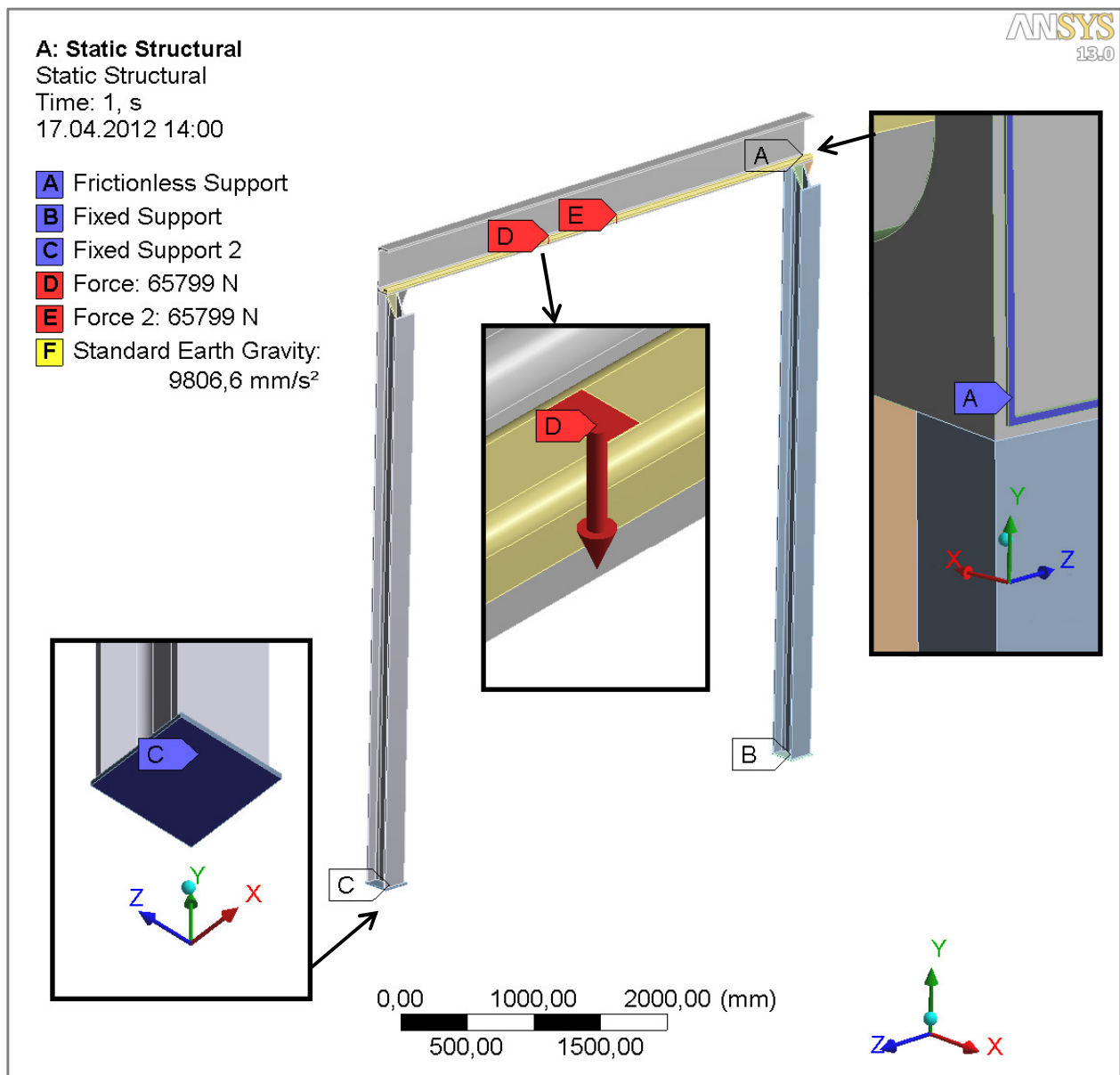


Figur 72: Bilde av modellens elementnett, med to detaljutsnitt. Utsnittet til venstre gir et bedre bilde av elementnettets detaljnivå, mens utsnittet til høyre viser uregelmessigheter i kranbanebjelkens elementnett som oppstår som følge av det tynne arealet langs kantene bak på steget.

Opplagring og påsatte krefter:

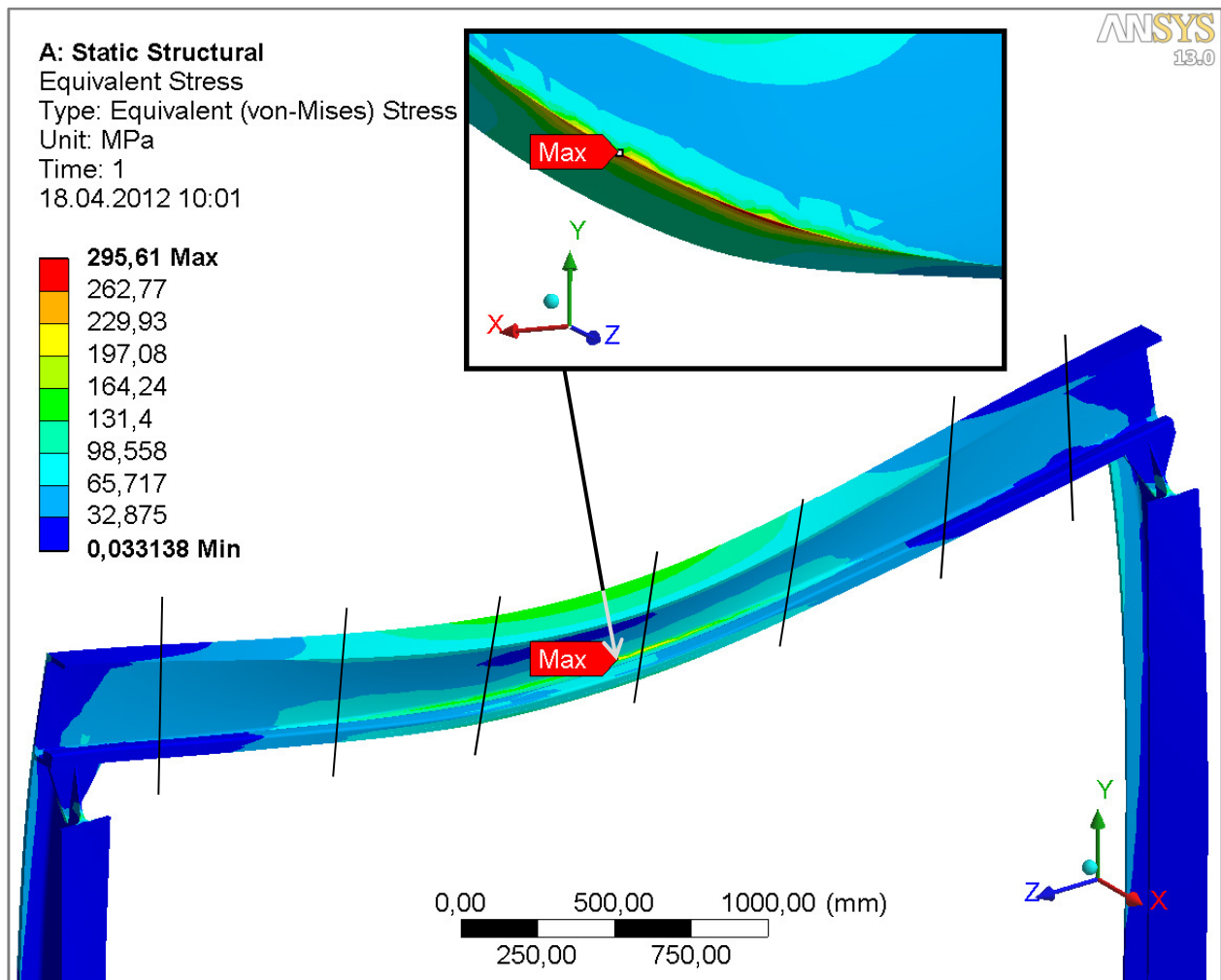
Kranbrua er påført de krefter som er brukt under selve dimensjoneringen, og søylene er fastspent i underkant.

Det er satt på en friksjonsfri opplagring på det tynne arealet som følger sidekantene og den nederste kanten på baksiden av kranbanebjelkens steg. Dette vil hindre bjelken i å rotere inn i veggen, men fortsatt la den rotere utover, og samtidig la bjelken bøye seg nedover. Da dette teknisk sett er en litt "stygg" tilnærming av situasjonen, kan det forventes noe urealistiske og høye lokale spenninger der denne opplagringen befinner seg. Det ble først prøvd å bruke et "Compression Only Support" på stegets bakkant, men dette ga urealistisk lave spenninger, og fungerte tydeligvis ikke som ønsket.



Figur 73: Oversikt over modellens påsatte krefter og opplagring. Det vises også utsnitt av de forskjellige opplagringene og kreftene for å gi en bedre oversikt. Hjulkreftene på 65799 N er plassert med 700 mm avstand imellom seg, litt til siden for midten av bjelken, akkurat på samme måte som i håndberegningen. Utsnittet til venstre viser den faste opplagringen av søylens underside, og utsnittet til høyre viser hvordan den friksjonsfrie opplagringen sitter på kranbanebjelkens steg.

Resultater:

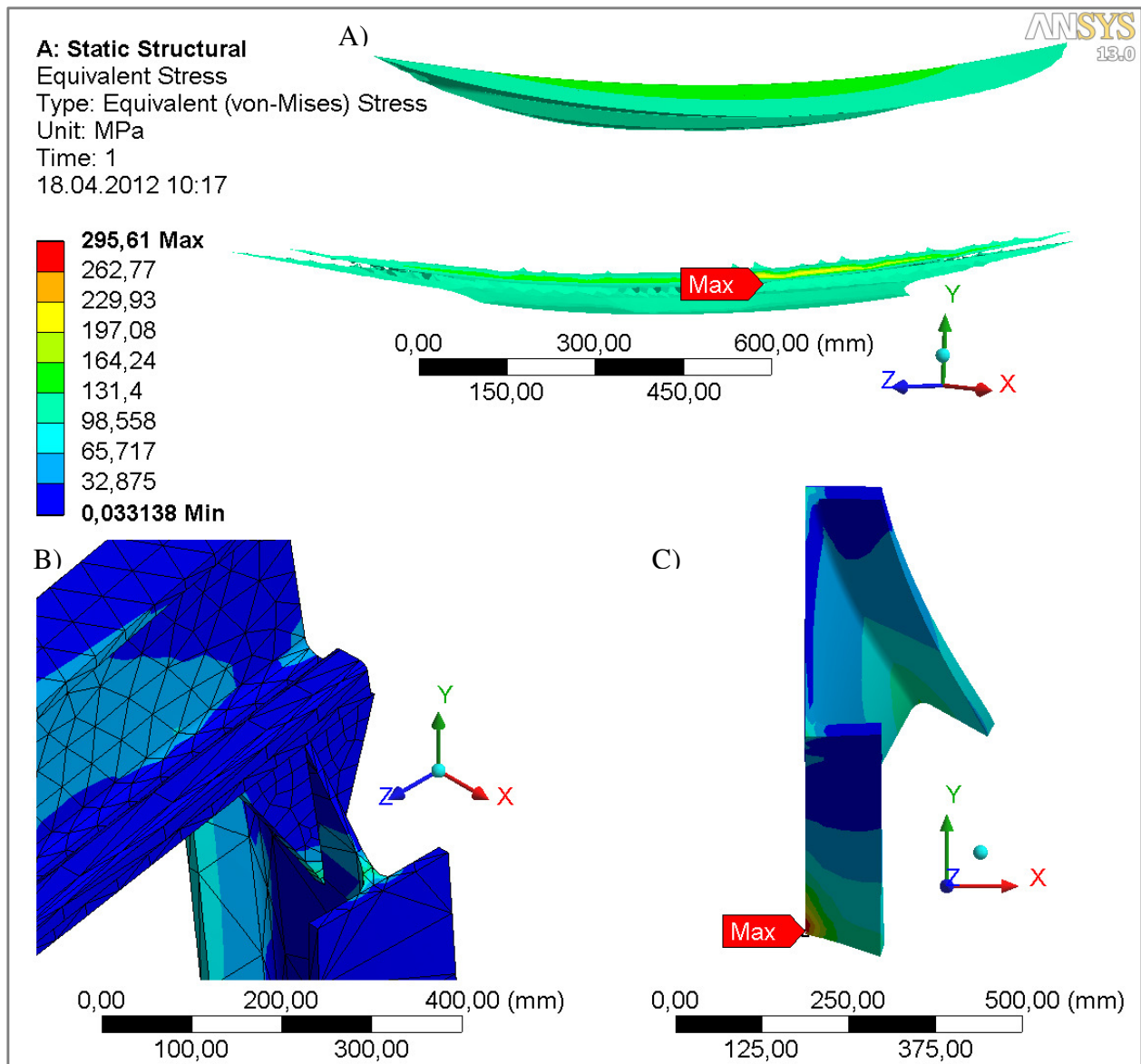


Figur 74: Bilde av analyseresultatene fra Ansys Workbench. Bildet viser von-Mises spenningene i kranbanespennet, og den største spenningen er på ca. 296 MPa. I tillegg er deformasjonen forstørret 44 ganger for å vise at kranbanebjelken får en rotasjon innover i rommet. De tynne strekene er ment å forsterke bildet av bjelkens rotasjon. Øverst vises et utsnitt av den maksimale spenningen som befinner seg nederst bak på midten av kranbanebjelken.

Den maksimale spenningen på 296 MPa oppstår der den friksjonsfrie opplagringen befinner seg. Dette er en veldig lokal og egentlig ikke-eksisterende spenning som oppstår fordi et lite areal ikke slipper opplagringen, og den høye spenningen var egentlig forventet.

De høyeste gjennomgående spenningene som oppstår ligger på imellom 150 og 210 MPa. Disse befinner seg innerst ved steget på den nederste flensen, og innerst mot veggen i den øverste kanten av bjelken. Førstnevnte er mest sannsynlig en kombinasjon av strekkspenning på midten av bjelken, torsjonen, og spenningen på grunn av belastningen av den nederste flensen. Sistnevnte er da en kombinasjon av trykkspenning og torsjonspenningen.

Spenningsnivået virker logisk med tanke på at bøyepeningene alene i håndberegningen var på 143 MPa. I denne analysen vil torsjonspenningen gi en del høyere spenning, mens den stivere opplagringen sammen med skinnas stivhet fører til en noe lavere bøyepening.



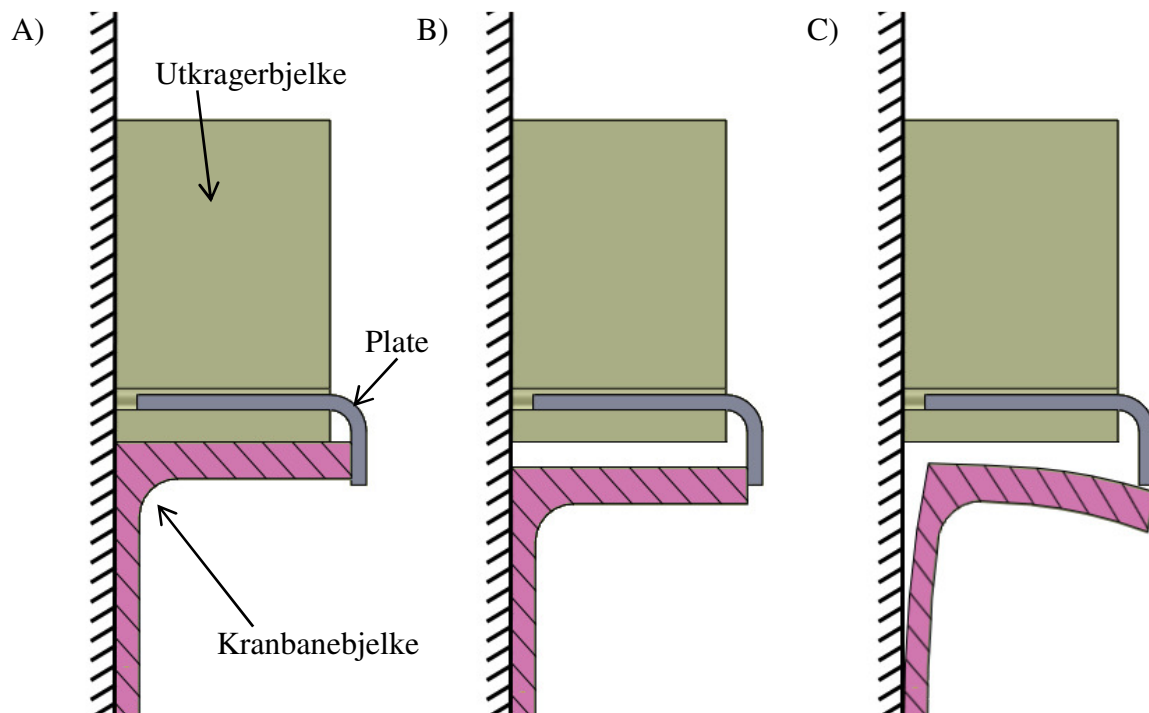
Figur 75: Analyseresultat. Figur A viser alle elementene på kranbanebjelkens midtrel som opplever spenninger på over 100 MPa, figur B viser toppen av søylen til venstre, og figur C viser kranbanebjelken sett fra siden. Deformasjonen er forstørret 44 ganger, og elementnetter er tatt med i figur B for å tydeliggjøre skillet imellom de forskjellige komponentene.

Selv om kranbanebjelken var fokuset i denne analysen, ble det gjort en observasjon av en ugunstig utforming på toppen av søylene (figur B). De påsveidede stiverne hjelper lite på fordelingen av krafta fra kranbanen utover søylens tverrsnitt, dog uten at dette blir noen kritisk dårlig utforming. En mulig løsning er å droppe stiverne, og heller la flensen fortsette langs den skrå enden på steget. Denne delen vil da fordele kraften og bøyemomentet fra kranbanen ut til den ytterste flensen på søylen.

Konkluderer med at denne analysen gir et godt og konservativt bilde av spenningene som kranbanen vil oppleve ved maksimal belastning, og dimensjonene viser seg å være holdbare.

Det er også et par forhold som må utforskes vedrørende dimensjoneringen av opplagerplata som holder kranbanebjelken fra å bevege seg/rotere inn i rommet.

Siden denne plata kun holder kranbanebjelken fra å bevege seg inn i rommet, er det ingenting som hindrer bjelken i å få en nedbøyning nedover. Om denne nedbøyningen er blitt for stor så kan bjelken glipe under denne opplagringen, og dette kan i verste fall føre til at kranbanen mister sin opplagring fra å velte inn i rommet, noe som kan få store konsekvenser.



Figur 76: Opplagring av kranbanebjelke sett fra siden. Figur A viser et snitt av kranbanebjelken i ubelastet tilstand, figur B viser kranbanebjelken når den har fått en nedbøyning, og figur C viser kranbanebjelken når den har fått en for stor nedbøyning og har blitt "vippet" ut fra opplagringen.

Geometrien tilsier at det ikke vil være noen fare så lenge nedbøyningen holder seg under 20 mm. Det er derfor gjort enda en analyse der det er satt på en friksjonsfri opplagring midt på bjelken som holder den fra å rotere utover. Den maksimale nedbøyningen viser seg å være på ca. 7 mm, noe som er holdbart selv med tanke på usikkerheten som ligger i materialets elastisitetsmodul. I tillegg befinner det seg ingen utkragerbjelker akkurat på midten av de største spennene, så det vil aldri bli en så stor nedbøyning akkurat der som denne opplagringen befinner seg.

Denne analysen ga lavere spenninger enn den foregående analysen. Spenningsfordelingen var noe annerledes, men det var ingen radikale forskjeller som det er nødvendig å gå inn på.

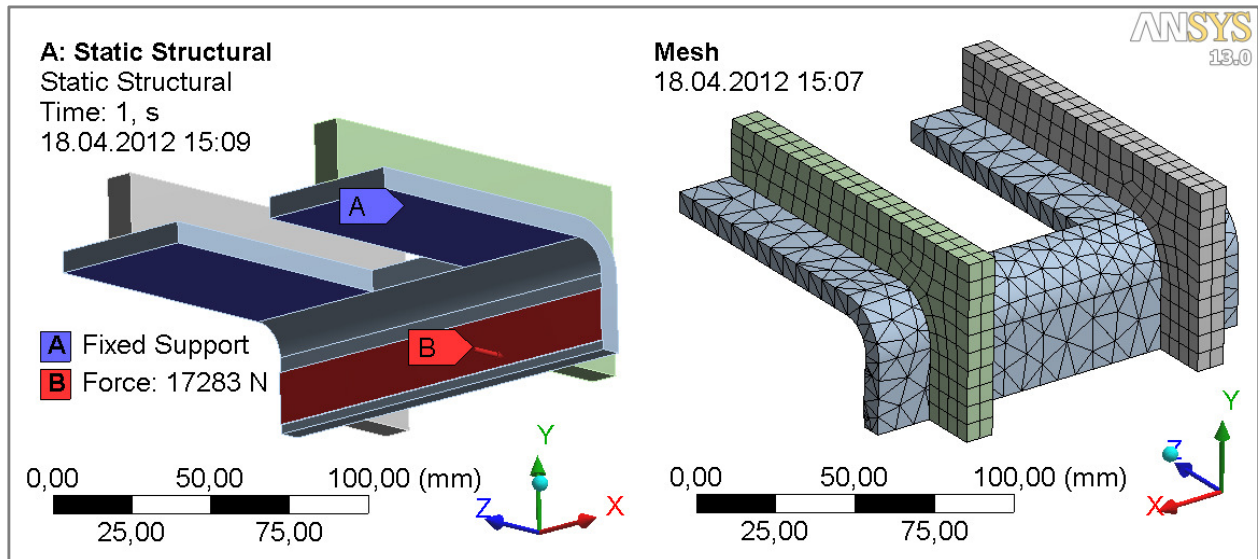
Torsjonsmomentet som skapes i kranbanebjelken fører med seg en kraft som opplagerplata må tåle. Denne er ifølge analysen på 17 283 N, og dette er brukt som utgangspunkt i opplagerplatas dimensjonering.

5.1.6 FEM-analyse av opplagerplaten

Under punkt 3.3.7 – "Dimensjonering av opplagerplate" kom det fra at platas dimensjoner ikke var robuste nok til å tåle de belastninger den er utsatt for. Det er derfor gjort endringer på denne komponenten, og dette sjekkes i Ansys Workbench.

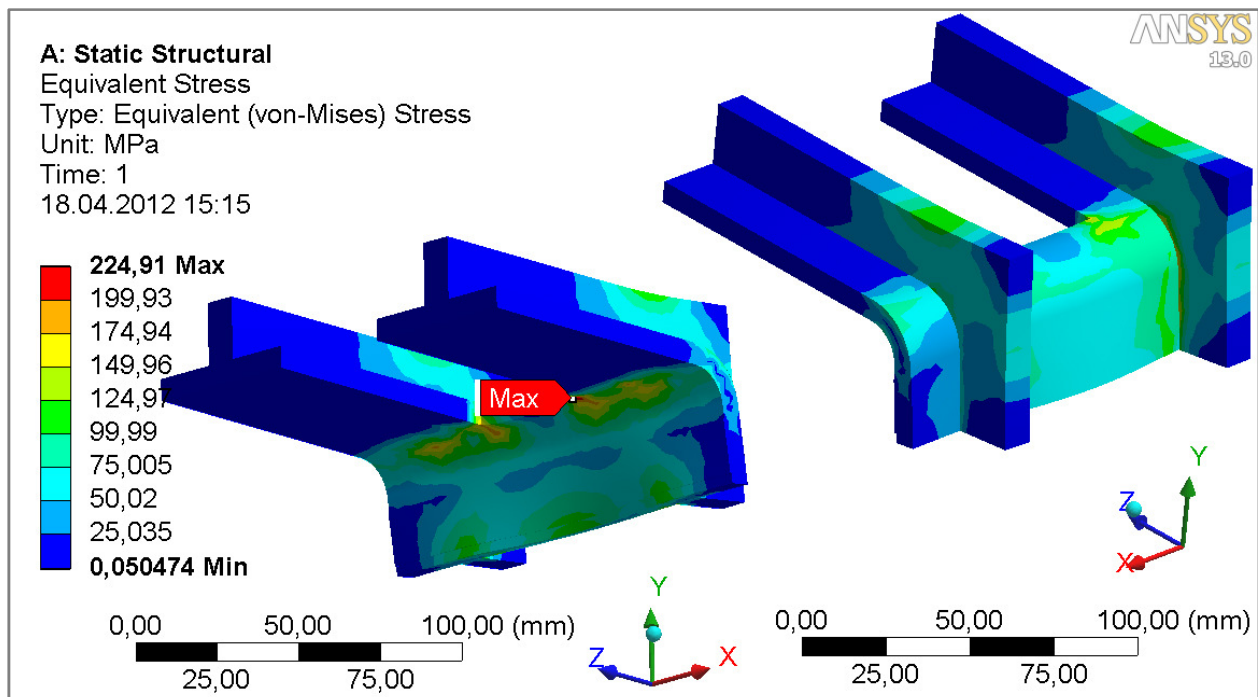
Modellering, opplagring og påsatte krefter:

Opplagerplaten er modellert med de dimensjoner og tilpasninger som det ferdige produktet skal ha. Modellen er fast innspent der den er i kontakt med utkragerbjelken, og kraften på 17 283 N er påført der den øverste flensen til kranbanebjelken vil ligge imot.



Figur 77: Til venstre vises modellens opplagring og påsatt kraft. Flater farget blått er opplagring, og flater farget rødt er der kraften virker. Til høyre vises modellens elementnett.

Resultater:

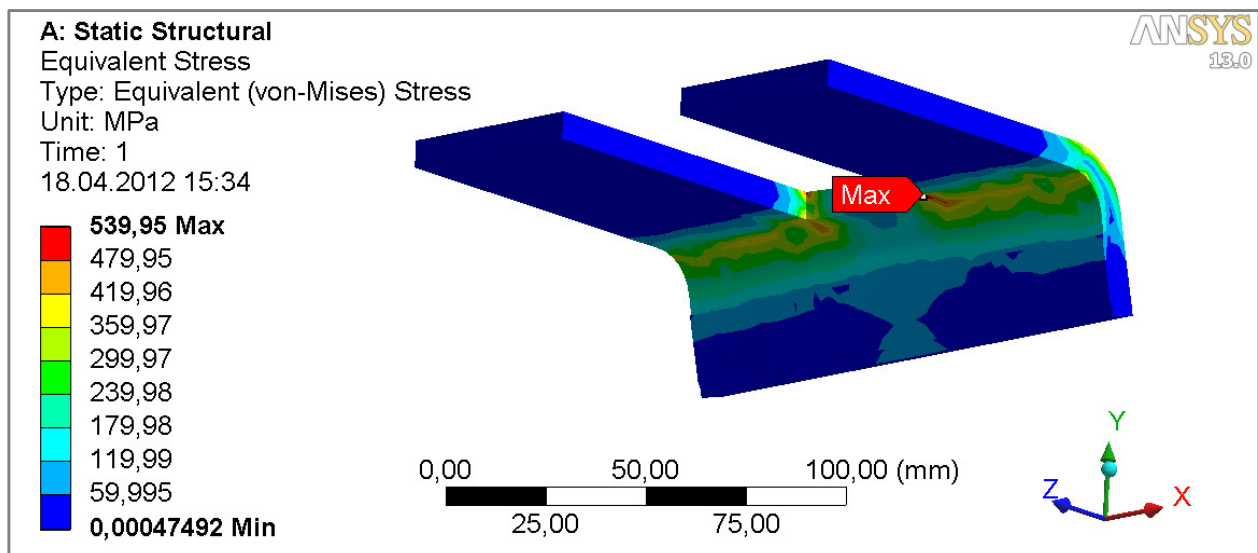


Figur 78: Analyseresultater fra Ansys Workbench. Høyeste von-Mises spenning er 225 MPa.

Høyeste spenning oppstår i et skarpt hjørne og kommer som følge av en singularitet i modellens elementnett. De høyeste gjennomgående spenningene ligger imellom 100 og 150 MPa, og de befinner seg langs radien i modellen. Deformasjonen er på under 1 mm og er neglisjerbar.

Det er også gjort en analyse for å få verifisert håndberegningen i punkt 3.3.7 – " Dimensjonering av opplagerplate". Her er forsterkningsplatene utelatt fra analysen, men ellers er alt likt.

Resultat:



Figur 79: Analyseresultater fra Ansys Workbench. Høyeste von-Mises spenning er 540 MPa.

Den høye spenningen på 540 MPa oppstår også i dette tilfellet som et resultat av en singularitet i modellen. Dette er bevist ved å minke elementstørrelsen, for så å se at spenningsverdien i dette punktet divergerer mot uendelig mens resten av spenningen forholder seg lik.

Den høyeste gjennomgående spenningen ligger i underkant 400 MPa, noe som virker fornuftig med tanke på at den forenklede håndberegningen gav en bøyenspenning på 408 MPa.

5.2 Materialvalg

Ved valg av materialer brukt i løpekranstrukturen er konstruksjonsstål det åpenbare valget. Dette har sine fordeler først og fremst på grunn av stålets styrke, men også på grunn av dens sveisbarhet, slagseighet, pris og tilgjengelighet.

Aluminium kunne vært et alternativ på grunn av sin lavere vekt, ekstruderingsmulighetene og dets evne til å absorbere energi fra støt. I dette tilfellet er nyttelasten på ti tonn så stor at løpekranstrukturens egenvekt ikke har så stor innvirkning på utformingen. Hadde løpekranen vært på f.eks. en båt og ikke stått rett på gulvet i en verkstedhall, kunne det ha vært viktigere å få redusert egenvekta, og aluminium hadde blitt vurdert sterkere. I tillegg har stål en mye høyere elastisitetsmodul enn aluminium (ca. 210 000 MPa mot 70 000 MPa), og da deformasjonen viser seg å være dimensjonerende i noen av beregningene, utelukker dette bruk av aluminium.

Ved utformingen av løpekrankonstruksjonen og ved valg av profiler er Norsk Stål sin produktkatalog tatt i bruk for å komme fram til realistiske/rimelige løsninger.⁽¹³⁾ Her finnes det en oversikt over vanlige og tilgjengelige stålprodukter, sammen med annen informasjon som er nyttig. Produktenes tilgjengelighet vil bidra til å holde kostnadsnivået nede ved at de innkjøpte profilene vil være masseproduserte (dermed billige), og ved at det forenkler tilvirkningsprosessen fordi man slipper å sveise egne profiler.

Det er tydelig utfra produktkatalogen til Norsk Stål at bjelker av stålqualiteten S355 er veldig utbredt, og dens flytegrense på rundt 355 MPa har derfor vært utgangspunkt ved flere av beregningene. Stålqualiteten virker også mest hensiktsmessig med hensyn på styrkekravene sammen med utformingen.

En annen egenskap ved stålet som er viktig i dette tilfellet er slagseigheten. Sprøbrudd kan være en fare i løpekrankonstruksjonen siden det kan oppstå plutselige deformasjoner og spenninger som følge av at nyttelasten får et rykk eller henger seg fast i noe. Tendensen til sprøbrudd i et materiale avdekkes igjennom skårslagsprøver der slagseigheten bestemmes, og krav til denne egenskapen gis i stålbetegnelsen. Et tett stål som S355J2+N vil gi en noe større kostnad, men vil til gjengjeld gi ekstra god sveisbarhet og slagseighet samtidig med den relativt høye fastheten. Dette vil si at den kan sveises med vanlige metoder og tilsetningsmaterialer uten spesielle tiltak, og at materialet skifter fra å være seigt til å være sprøtt ved $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ med et slagarbeid på 27,5 J.

Når det gjelder resirkulering og miljøhensyn så er stål det mest resirkulerte materiale i Amerika ifølge SRI – Steel Recycling Institute, og i 2010 ble ca. 98 prosent av all strukturstål resirkulert.⁽³¹⁾ Dette antyder noe om graden av resirkulering av stål i resten av verden. Resirkulering av stål kan spare rundt 75 prosent av energien som brukes til å lage stål av råmaterialer i følge Earth911.com.⁽³²⁾

5.3 Bearbeiding og utforming

5.3.1 Overflatebehandling

Selv om løpekranen skal befinne seg innendørs kan den bli utsatt for fukt og andre påkjenninger som kan føre til korrosjon. Dette kan motvirkes blant annet ved bruk av coating i form av maling. I tillegg til overflatebeskyttelse kan coatingen også gi konstruksjonen et bedre estetisk uttrykk ved hjelp av farger.

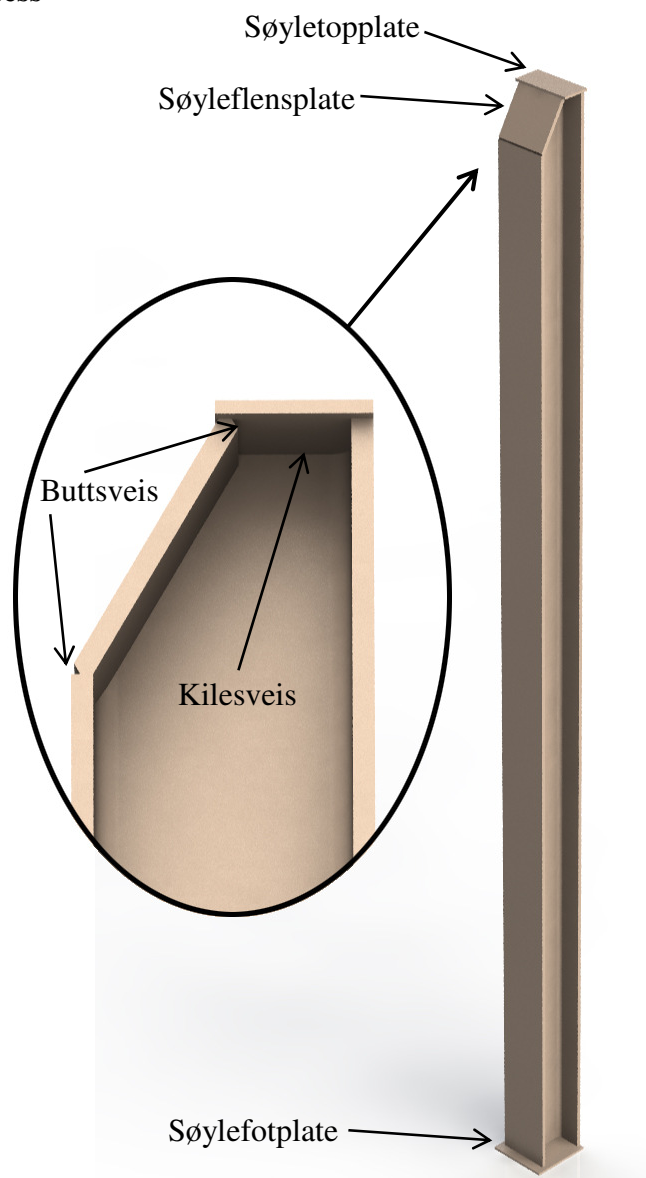
Det velges å bruke maling med gulffarge på hele kranbrua og dens komponenter eksklusiv de innkjøpte komponentene. Dette vil trekke oppmerksomhet til kranbrua slik at den muligens blir mer brukt, og at folk passer seg når de lettere kan se at den er i bevegelse.

Kranbanen kan males med en farge som passer med verkstedhallens veggfarge.

5.3.2 Framstilling- og monteringsprosess

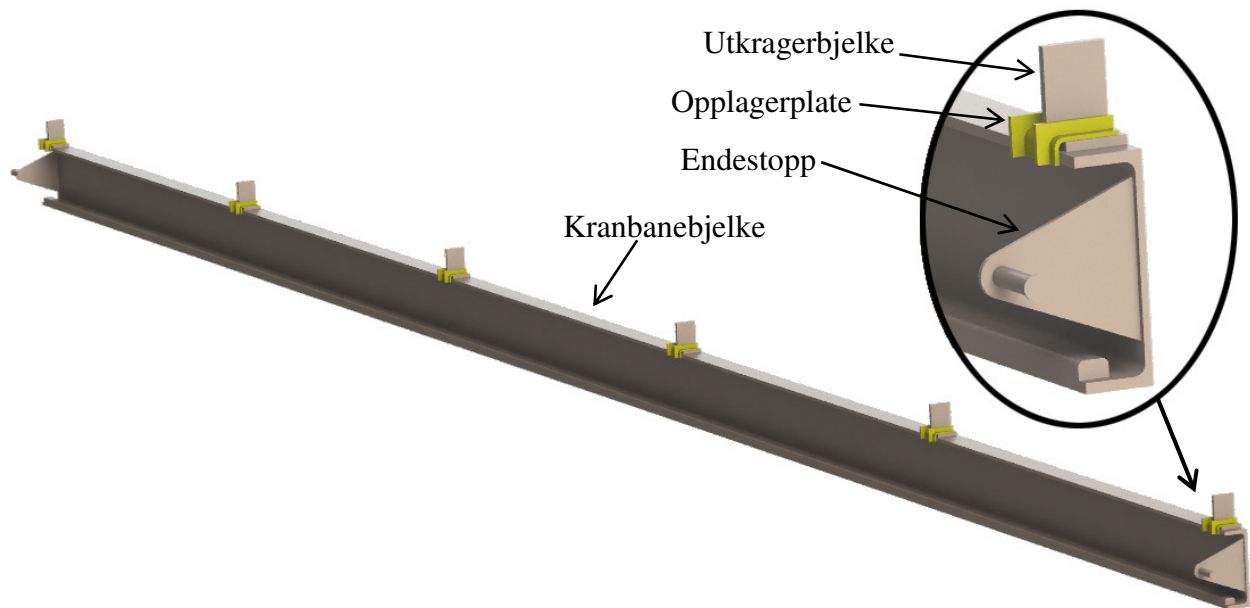
Søylene

- Søylebjelken kappes i riktig lengde, og kappes til med riktig form i toppen.
- Søylefotplaten, søyletopplaten og søyleflensplaten kappes til.
- Søyleflensplatens kanter slipes skrå som anvist i konstruksjonstegningene for å gi plass til buttsveiser.
- Søyletopplaten og søyleflensplaten sveises fast til søylebjelken.
- Søylene heises opp oppå søylefotplaten før den sveises fast i den. Dette gir mulighet til å ta ned søylen for å tilpasse lengden om det viser seg at dette skulle være nødvendig.
- Søyletopplaten sveises fast i kranbanebjelken.
- Skarpe kanter slipes for å unngå personskader.



Figur 80: Rendrering av en av søylene.

Kranbanen

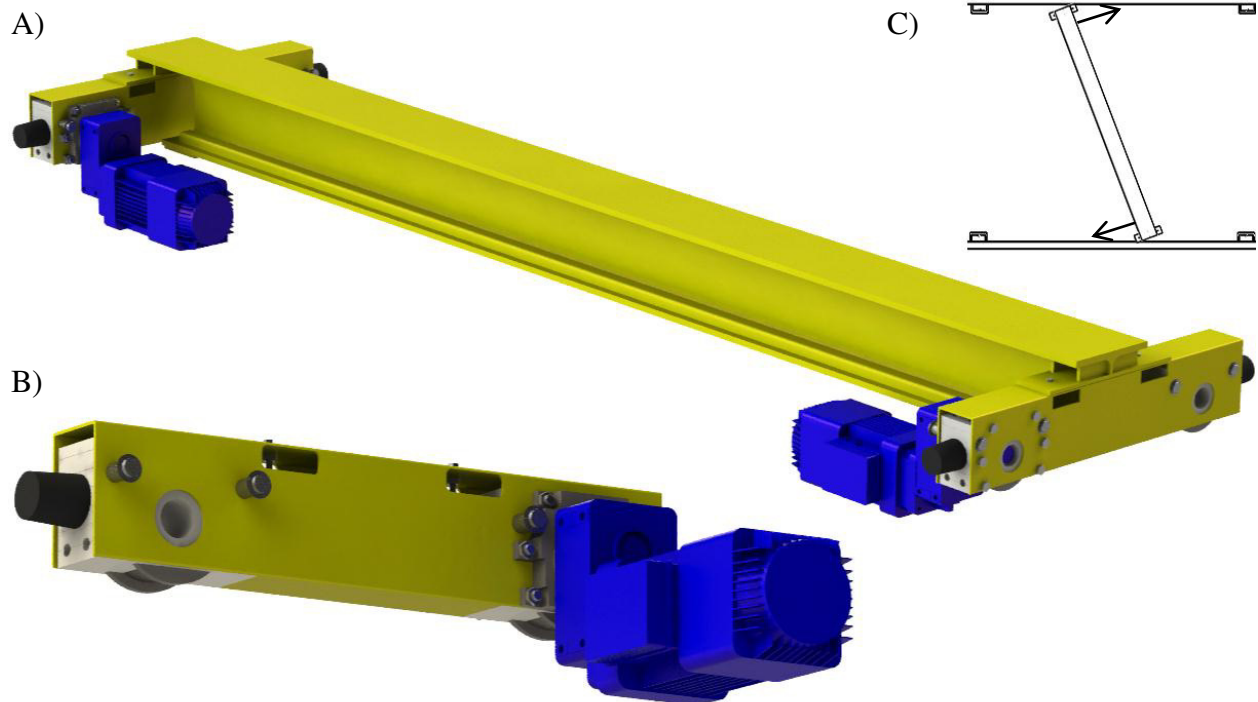


Figur 81: Rendring av den sørlige kranbanen.

- Kanalstål sveises sammen til riktig lengde. Sammenføyningspunktene må befinne seg over et opplagerpunkt (vertikal opplagring fra søyler).
- Kranbanebjelken heises opp og fastlåses til utkragerbjelkene med en midlertidig fastlåsning.
- Søylene plasseres og heises opp på riktige plasser. Søylene sveises fast til kranbanebjelken.
- Opplagerplatene monteres og sveises fast til utkragerbjelkene.
- Kranbaneskinnen sveises sammen til riktig lengde og punktsveises fast til kranbanebjelken. Her er det mulig å gjøre tilpasninger slik at spennet holder seg likt over hele lengden.
- Endestoppenes plassering tilpasses slik at de ligger inntil veggen, og sveises deretter fast til kranbanebjelken.

(Det å forhåndsmontere hele kranbanen før den heises vil være umulig siden maskinhallens bredde er mindre enn kranbanens høyde. Rammen som avgrensner maskinhallen på nordveggen ville være i veien. I tillegg kan det være at gulvet ikke er helt jevnt slik at avstanden imellom utkragerbjelkene og gulvet ikke er helt nøyaktig, og det dermed blir nødvendig å tilpasse søylenes lengde underveis. Dette kan eventuelt måles på hver utkragerbjelke med lasermåler.)

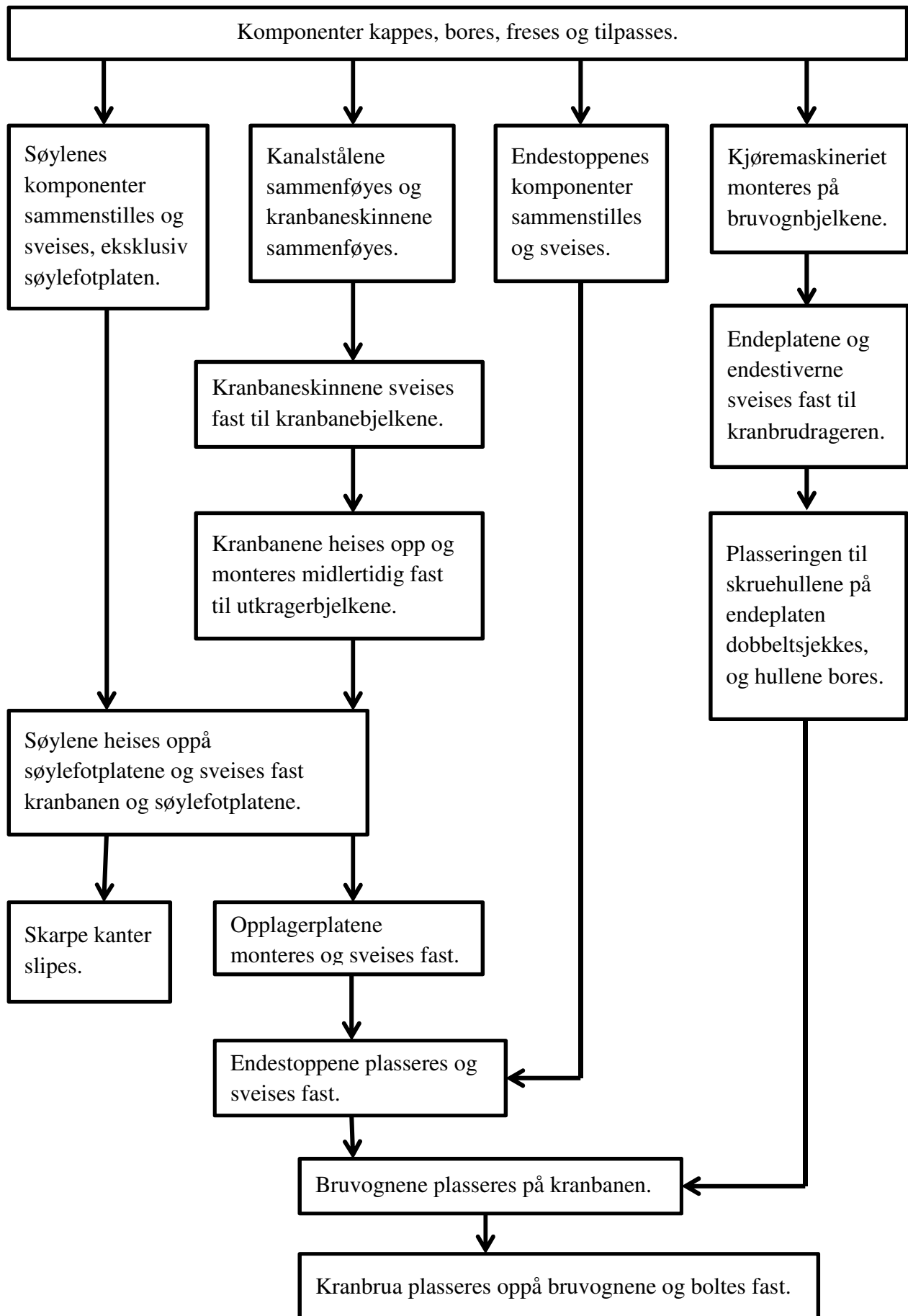
Kranbrua



Figur 82: Rendring av kranbrua. Figur A viser hele kranbrua, og figur B viser den nordlige bruvognen. Figur C illustrerer en del av monteringsprosessen til kranbrua.

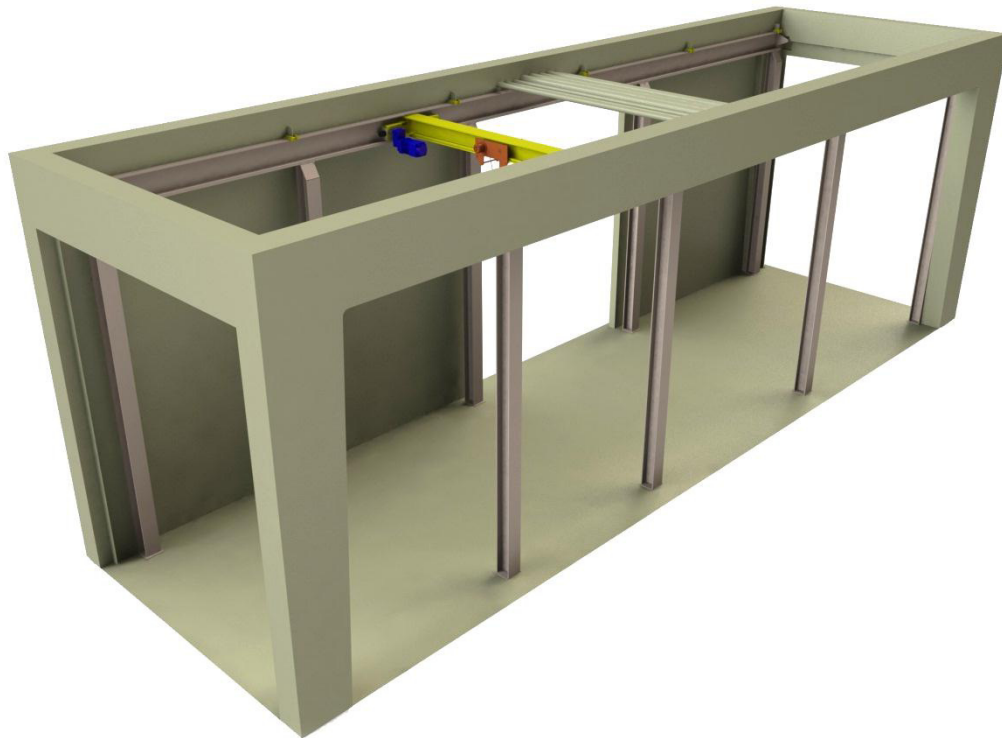
- Bruvognbjelkene kappes i riktig lengde. Hull bores, freses eller vannskjæres ut. Her er det spesielt viktig at skruehullene på toppen går i en parallell linje med selve bjelken.
- Kjøremaskineriet monteres og festes med festebolter.
- Kranbrudrageren kappes i riktig lengde og endene kappes til som anvist i konstruksjonstegningene.
- Endeplatene og endestiverne kappes etter fastsatte mål.
- Endeplatene og endestiverne sveises til kranbrudrageren.
- Skruehullene på endeplatene bores. Her er det spesielt viktig at linjen imellom skruehullene står normalt på selve kranbrudrageren.
- Bruvognene plasseres på kranbanen og kranbrua heises opp. Avstanden imellom hjørnene på endeplatene er mindre enn avstanden imellom veggene på kranbanebjelkene, slik at det skal gå an å vri kranbrua inn imellom kranbanebjelkene som vist i figur 82-C. Om dette viser seg å bli problematisk er det ingenting i veien for å slippe ned litt av kantene på endeplatene for å gi bedre plass til denne operasjonen.
- Kranbrua legges oppå bruvognene og skrues fast.

Flytskjema for monteringsprosessen

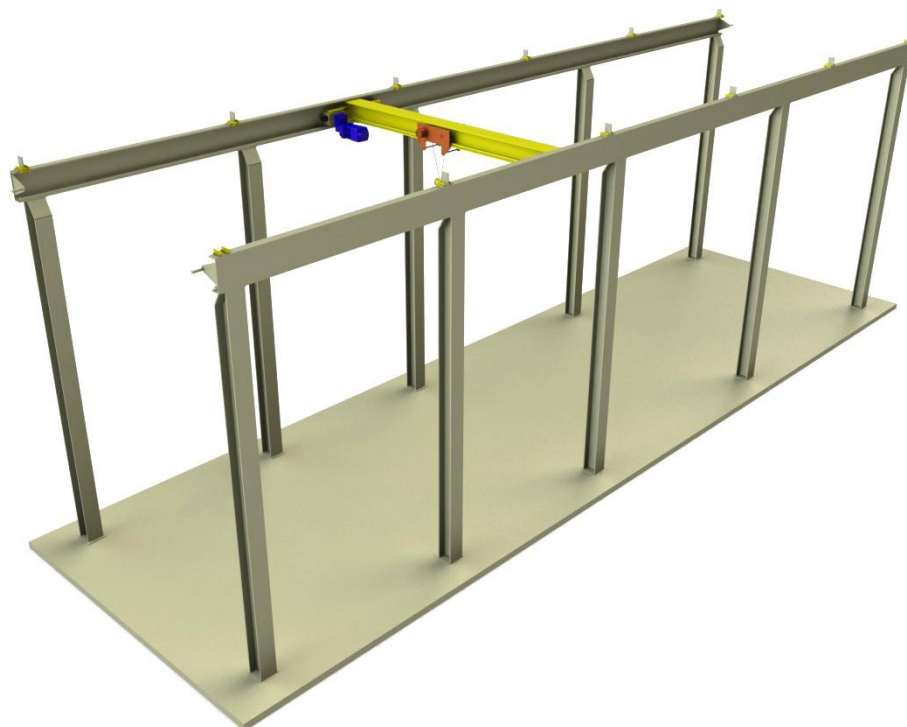


6. LØSNINGSPRESENTASJON

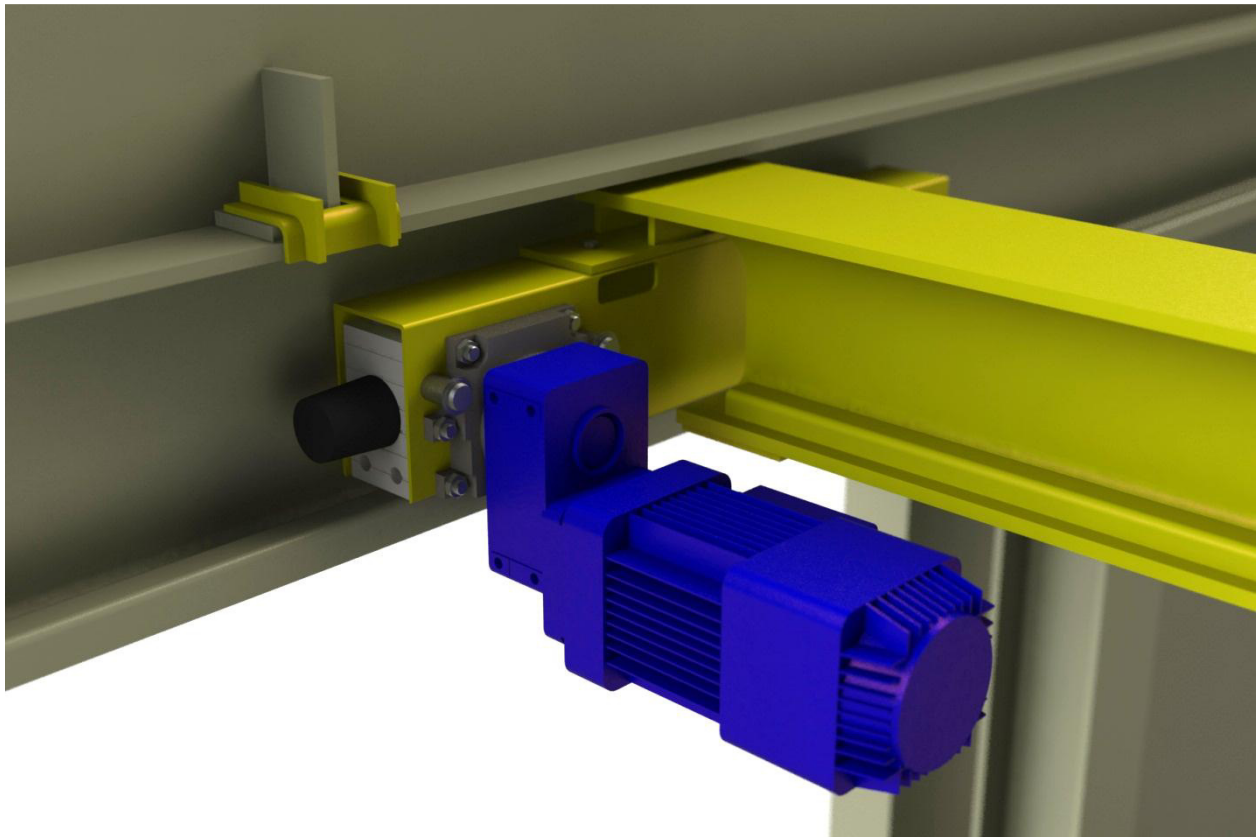
6.1 Visualisering



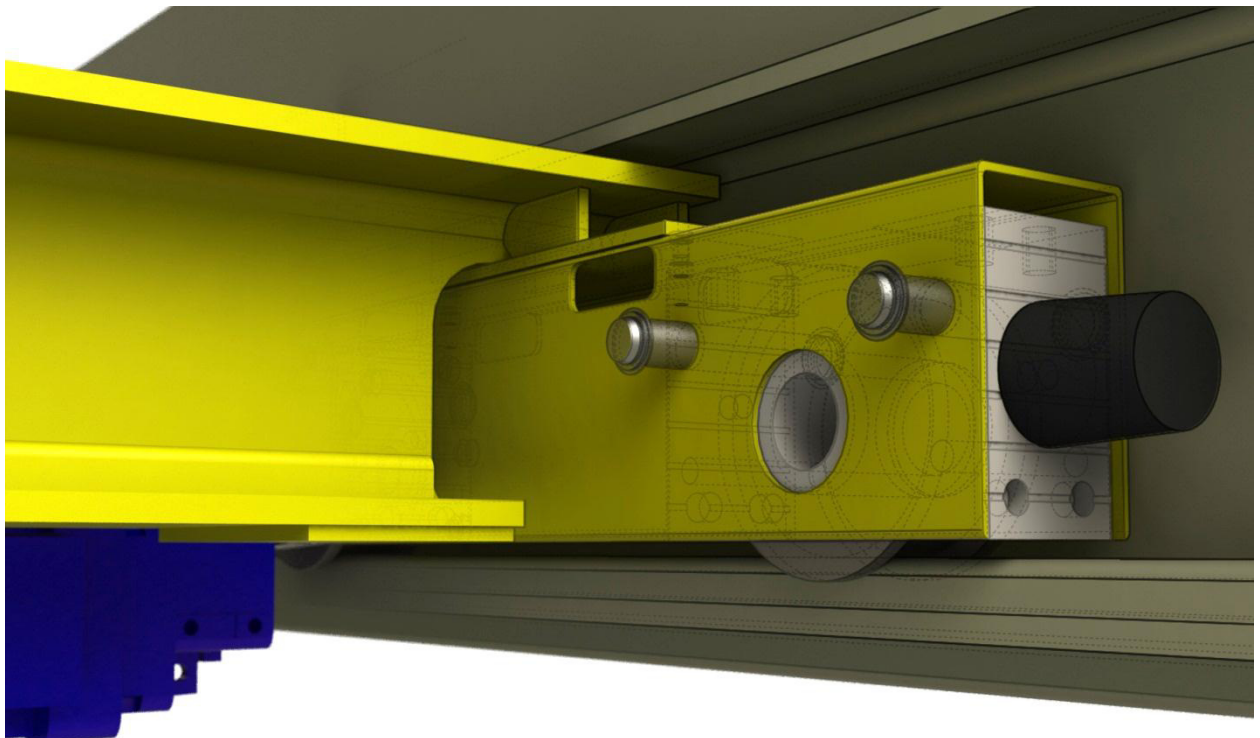
Figur 83: Visualisering av hele løpekranen med noe av bygningsstrukturens vegger.



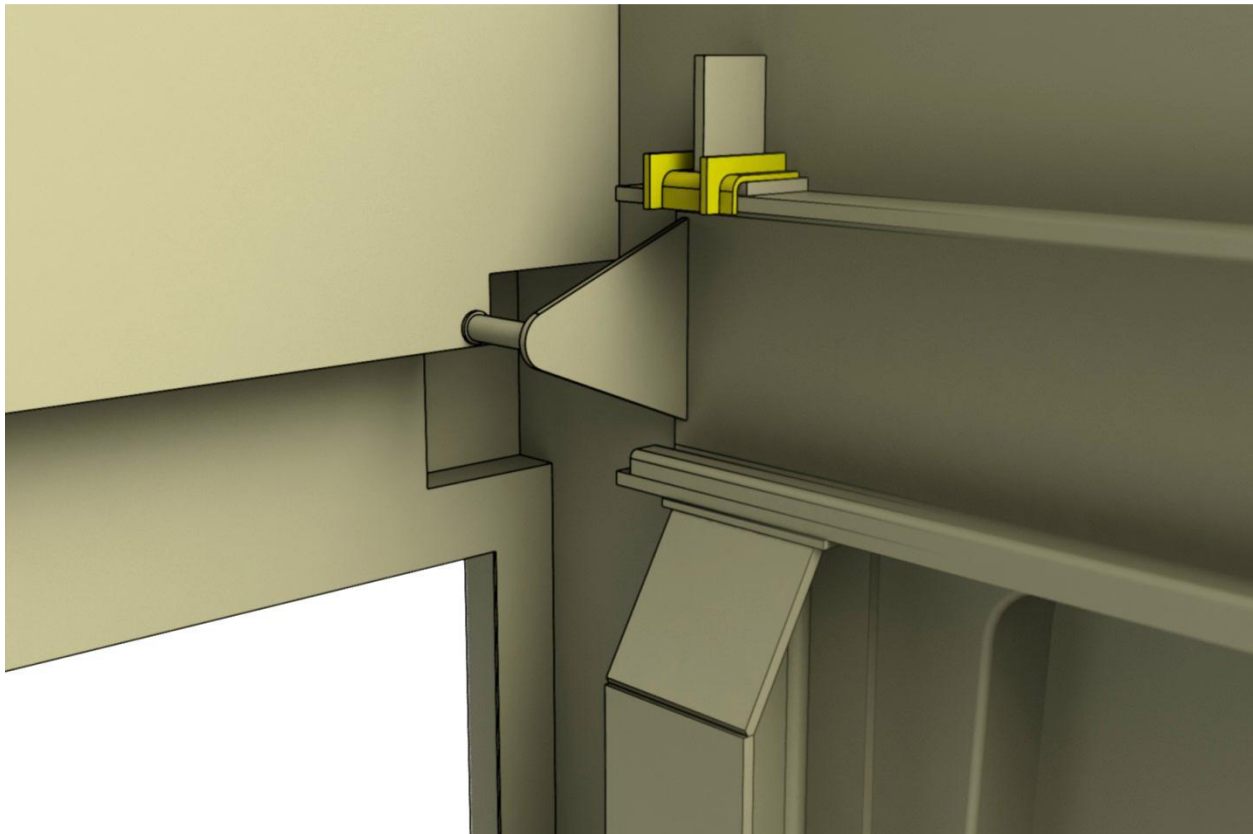
Figur 84: Visualisering av hele løpekranen med gulv. Konstruksjonen er sett fra nordøst.



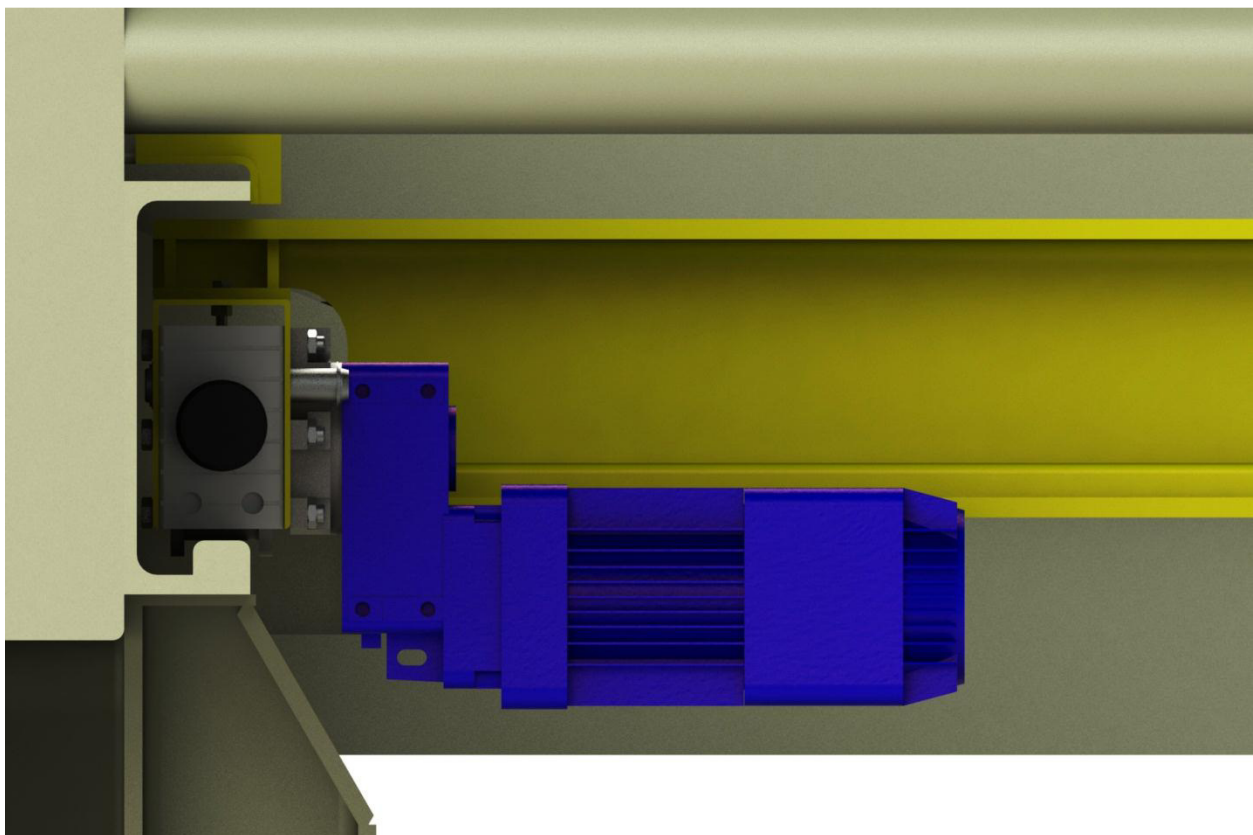
Figur 85: Visualisering av løpekranen med fokus på bruvognen og dens kjøremaskineri.



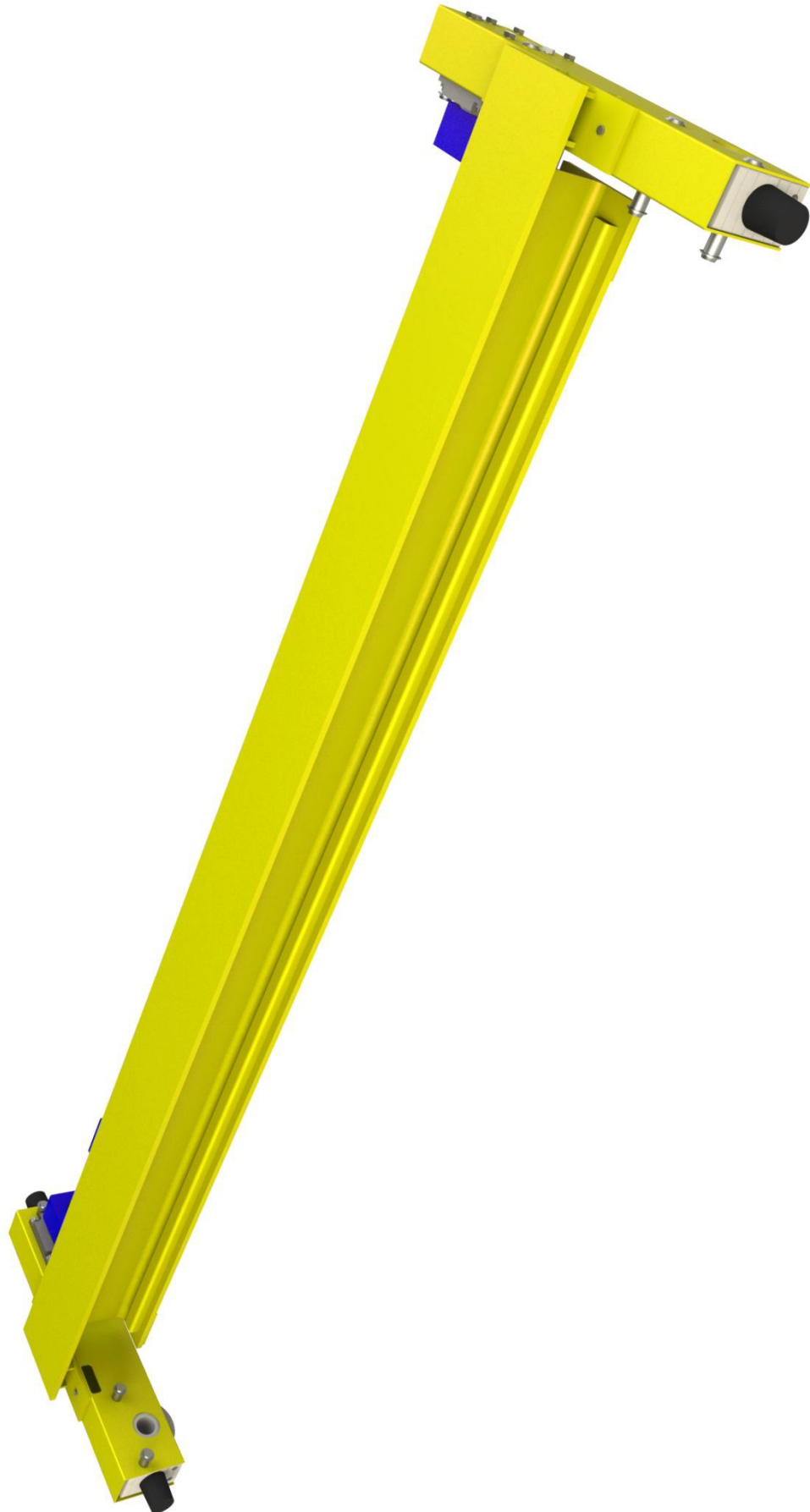
Figur 86: Visualisering av løpekranen. Bildet viser hvordan bruvognen ligger oppå kranbaneskinna.



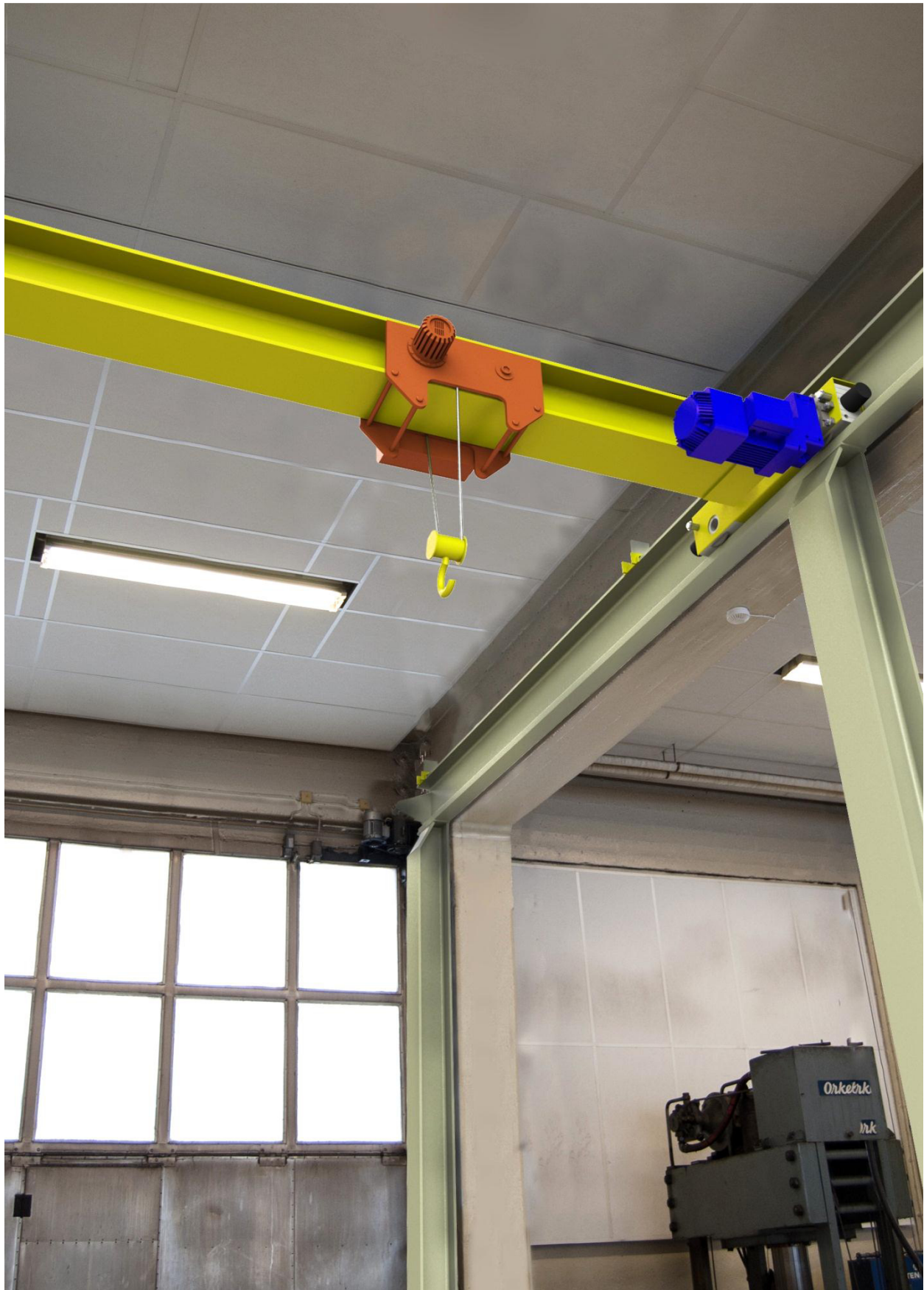
Figur 87: Visualisering som viser et endestopp sammen med søyletopp og horisontal opplagring.



Figur 88: Visualisering av løpekransen med et tverrsnittskutt på midten. Her kan en se hvordan det er blitt noe avgrenset plass til utstikkende skruer på siden av bruvognen. Avstanden fra siden til kranbrubjelken og til steget på kranbanebjelken er 14 mm.



Figur 89: Visualisering av hele kranbrua uten løpekatt. Bildet er rotert 90 grader mot klokka.



Figur 90: Visualisering av ny løpekranløsning plassert i verkstedhallen. Løpekatten er kun for syns skyld og er modellert deretter.

6.2 Merking, inspeksjonsintervall og viktige dimensjoner

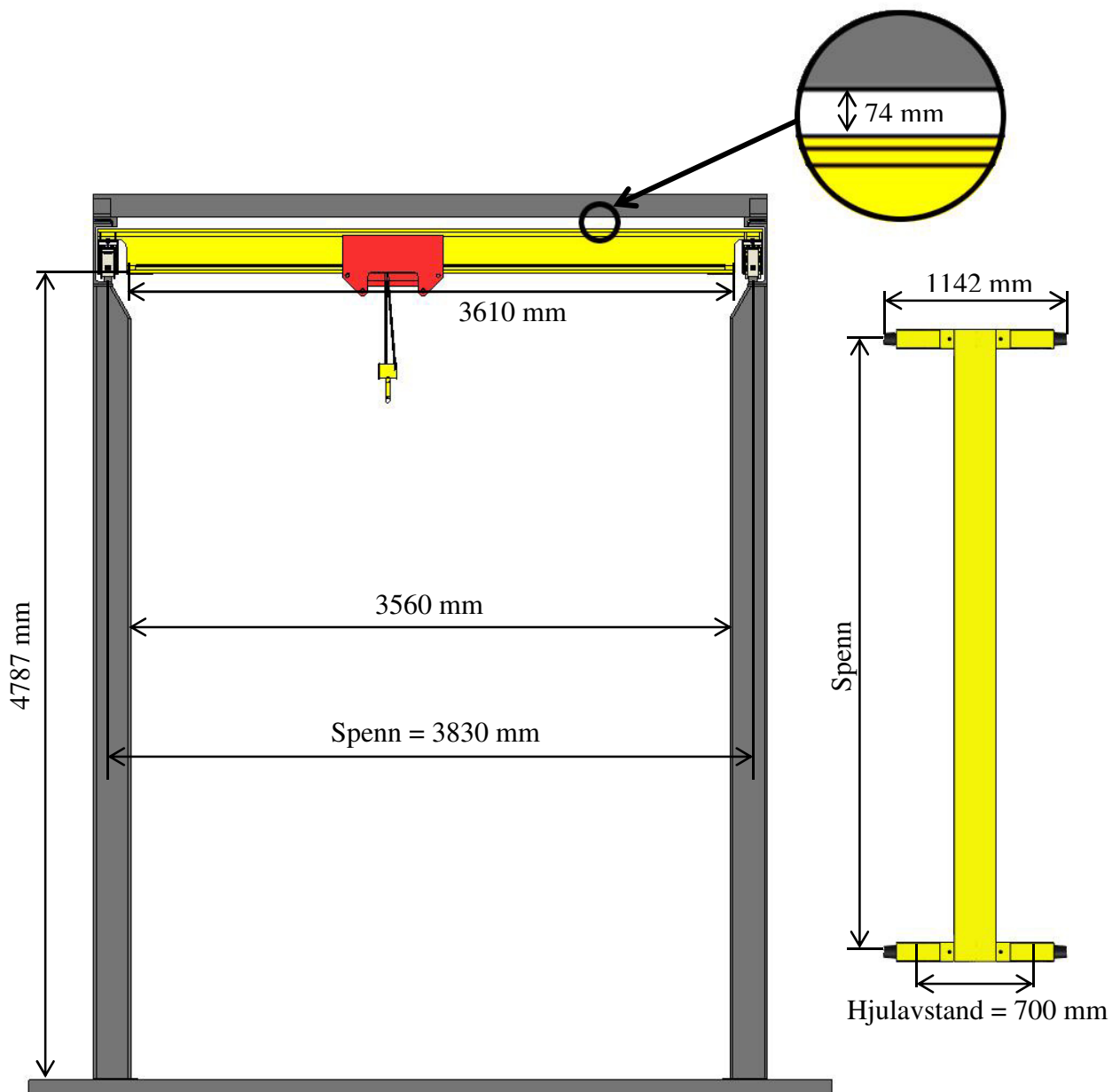
Merking

Kranbrua skal tydelig merkes med maksimal tillatt last 10 tonn. Dette bør også komme klart fram på eventuelle styremekanismer til løpekranen. Konstruksjonen bør også merkes med produksjonsår.

Inspeksjon

Etter testing skal løpekranen skal inspiseres etter en måneds bruk, deretter en gang i året. Løpekranen skal vaskes og kontrolleres visuelt for sprekker og synlige deformasjoner. Viktige elementer som må inspiseres er alle sveiste forbindelser, opplagerplatene, den buede kanten på enden av kranbrudrageren og bruvognbjelken.

Viktige dimensjoner



Figur 91: Illustrasjon som viser viktige dimensjoner av løpekranen.

6.3 Material- og produksjonskostnader

Tabell 15: Estimat av løpekransstrukturens kostnad. Estimatet er gjort i samarbeid med verkstedsjef Bjørn Brenna, og materialpriser er utarbeidet på grunnlag av vekt- og prislister fra Norsk Stål sin produktkatalog. ⁽¹³⁾ Skruer og muttere er utelatt da dette utgjør en veldig liten del av hele kostnaden, og vil være lite hensiktsmessig å ta med tanke på usikkerheten i estimatet.

I. MATERIAL- OG TILVIRKNINGSKOSTNADER						
Komponent	Pris	Mengde	Tilvirkningskostnad	Tid [timer]	Kvanta	Sum [kr]
Søylebjelke	40 kr/kg	342,6 kg	650 kr/t	0,5	10	140 290
Søylefotplate	53 kr/kg	5,5 kg	650 kr/t	0,1	10	3 565
Søyletopplate	53 kr/kg	2,3 kg	650 kr/t	0,1	10	1 869
Søyleflensplate	53 kr/kg	7,9 kg	650 kr/t	0,4	10	6 787
Kranbanebjelke	45 kr/kg	936,0 kg	650 kr/t	1	2	85 540
Kranbaneskinne	74 kr/kg	176,4 kg	650 kr/t	0,5	2	26 757
Kranbrudrager	40 kr/kg	374,9 kg	650 kr/t	0,7	1	15 451
Endeplate	53 kr/kg	4,2 kg	650 kr/t	0,4	2	965
Endestiver	53 kr/kg	0,3 kg	650 kr/t	0,1	8	647
Kranbruskinne	74 kr/kg	41,3	650 kr/t	0,5	2	6 762
Avstiverplate	53 kr/kg	3,0 kg	650 kr/t	0,1	2	448
Bruvognbjelke	53 kr/kg	29,8 kg	650 kr/t	3	2	4 218
Opplagerplate	53 kr/kg	1,4 kg	650 kr/t	0,5	12	4 790
Endestopplate	53 kr/kg	5,1	650 kr/t	0,1	4	1 341
Endestoppsylinder	315 kr/kg	0,8 kg	650 kr/t	0,1	4	1 268
Endestoppørørende	206 kr/kg	0,2 kg	650 kr/t	0	4	165
Hjulblokk dreven	3 863	-	-	-	2	7 726
Hjulblokk udreven	3 197	-	-	-	2	6 394
Elektromotor	9 468	-	-	-	2	18 936
Delsum komponenter						333 919
II. MONTERING						
Del	Kostnad	Tid [timer]	Annet (Lastebil, lift osv...)		Sum [kr]	
Søyler	650 kr/t	16	-		10 400	
Kranbane	2 000 kr/t	8	9000 kr		25 000	
Bruvogn	1 000 kr/t	16	7000 kr		23 000	
III. OVERFLATEBEHANDLING						
Maling	400 kr/t	16	-		6 400	
Sliping	650 kr/t	2	-		1 300	
III. TOTALKOSTNAD LØPEKRANSSTRUKTUR					400 000	

6.4 Forbedringer

Under dette punktet er det valgt å omtale konkrete feil eller mangler i oppgaven som er oppdaget lang inn i prosessen, og som var for omfattende å rette opp med den tidsbegrensningen som var.

- Under dimensjoneringen av opplagerplatene er de gitt en bredde slik at det skal være plass til kilesveiser på sidene med 5 mm a-mål. Her er det tenkt feil, og det er bare plass til kilesveiser med i overkant av 3 mm a-mål. Da sveisene her er beregnet til å oppleve forholdsvis lave spenninger, har dette små konsekvenser.
- NS 5514 sier at last fra konstruksjonens egenvekt S_G også skal multipliseres med tilleggsfaktoren M . I oppgaven har S_G kun blitt brukt for lasten fra løpekatten, og last fra konstruksjonselementer som f.eks. kranbrudrageren er ikke blitt multiplisert med tilleggsfaktoren M . Siden M i dette tilfellet er veldig liten og konstruksjonens egenvekt er lav i forhold til nyttelasten, har dette små konsekvenser.
- I punkt 2.4.2 - "Designelementer ved bruvognen" på side 21 skrives det at det er gjort tidlige beregningsestimater som viser at kranbanebjelkens dimensjoner ikke begrenser bruvognens størrelse. Dette estimatet tok kun hensyn til kranbanebjelkens høyde, og det viste seg dens bredde ble noe begrensende når det gjelder bruvognen sin utforming. Det var da ikke tenkt på at det måtte komme diverse festebolter og muttere ut på siden av bruvognbjelken. Selv om dette viste seg å bli noe begrensende under utformingen, har det ingen konsekvenser for det endelige resultatet.
- Valget av platetykkelse til opplagerplaten gjøres utfra en tabell fra en tysk standard. Der er tydeligvis innholdet misforstått siden det viser seg at det ikke er vanlig med stålplater av 7 mm tykkelse. Verdierne i tabellen er bare en anbefaling, og det skal fint kunne la seg gjøre å gå opp til 8 mm tykkelse og samtidig beholde knekkradiusen, uten at dette vil ha noen konsekvenser på resten av konstruksjonen.
- Det skulle vært brukt mer tid på verifikasjon av torsjonsspenningen som oppstår i kranbanebjelken. Da de samlede spenningene i denne komponenten kun er utforsket i en FEM-analyse, etterlater dette seg noe usikkerhet rundt bjelkens kapasitet. I tillegg er ikke torsjonen tatt med under vippingskontrollen av bjelken, og metoden ble sett på som konservativ fordi den neglisjerer blant annet bjelkens torsjonsstivhet, og det ble derfor brukt en lav sikkerhetsfaktor i denne beregningen. Det kan tenkes at bjelken er for liten.
- I punkt 5.1.5 - "FEM-analyse av kranbanebjelken" skrives det at det ble forsøkt å bruke en "Compression only" opplagring, men at dette ikke fungerte godt og ga rare og urimelige resultater. Denne opplagringstypen er brukt i punkt 5.1.2 - "FEM-analyse av kranbrua", og det førstnevnte tilfellet kan dermed antyde at disse resultatene ikke er helt holdbare, selv om de ble vurdert som rimelige. Konkluderer med at det burde vært holdt seg til opprinnelige/vanlige opplagringsmetoder, og eventuelt byttet om last- og opplagringsplassering for å få en ønsket lastsituasjon. Det kan ha vært en litt for liten forståelse for "Compression only" opplagringen til at det var forsvarlig å bruke denne.
- Bruvognen skulle ha vært noe lengre for ikke å avgrense utformingen til løpekatten. Slik den er nå ville noen løpekatter ikke kunne kjøre helt ut til enden av kranbrua uten å kolliderer med kjøremotoren. Dette kan eventuelt justeres ved å vri motoren 90 grader slik at den peker en litt annen vei.

7. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

I denne masteroppgaven er det blitt utviklet en løpekran for det mekaniske verkstedet på Universitetet for Miljø- og Biovitenskap. Løpekranen er dimensjonert for en nyttelast på 10 tonn, og den er utformet for og best mulig passe den gjeldende verkstedhallen og de forutsetninger den gir. Dimensjonering er gjort hovedsakelig etter NS 5514 og med veiledning fra boka "Løfte- og transportmaskiner". Løpekranen er utviklet etter beste skjønn i henhold til Maskinforskriften, og dette innebærer i praksis at konstruksjonen ikke skal være til fare for mennesker eller materiell.

For å redusere material- og tilvirkningskostnaden er det lagt vekt på bruk av standardprofiler og komponenter som er lett tilgjengelige. Totalkostnaden for løpekranstrukturen er estimert til å bli rundt 400 000 kr, og hele kranbrua med dens komponenter utgjør i ca. $\frac{1}{4}$ av denne kostnaden. I en prisforespørsel på en traverskran med lignende egenskaper fra Demanor ble det gitt en pris på 215 000 kr, og dette inkluderte kun kranbrua med alle dens komponenter, og montering. Denne oppgavens prisestimat virker derfor fornuftig med tanke på at den ikke tar hensyn til utviklingskostnader, prototypekostnader, skatt og avgifter slik som en leverandør som Demanor må ta hensyn til ved salg av produkter.

7.1 Anbefalinger

- Løpekranen er utviklet i samråd med funksjons- og utformingskrav fra oppgaveteksten, veileder og det gjeldende verkstedet.
- Diverse faktorer og tillatte verdier er tatt fra enten tekniske tabeller eller relevante standarder.
- Viktige konstruksjonselementer og forbindelser er dimensjonert, og detaljnivået står i forhold til tidsbegrensningen.
- Konstruksjonen er utformet på en måte som gjør det mulig å gjøre eventuelle nødvendige tilpasninger ved montering i verkstedhallen.
- Løpekranens montering- og fremstillingsprosess er beskrevet, i tillegg til at detaljerte konstruksjonstegninger er vedlagt.

7.2 Videre arbeid

- All elektronikk og automasjon må prosjekteres og tilpasses løpekranen.
- Dimensjonering og dokumentasjon, eventuelt valg av ferdig løpekatt med heisemaskineri gjenstår.
- Bruksanvisning og sikkerhetsbestemmelser vedrørende bruk av løpekranen må gjennomgås/lages.
- Dimensjonering av detaljer rundt skjøting av bjelker (kranbane, kranbaneskinne) må gjøres.
- Eventuell fastbolting av søylefot til gulv bør utforskes.
- Detaljer rundt fastlåsing av skinner må beskrives.
- Beregninger/dimensjonering og konstruksjonstegninger av endestopp må gjøres/lages.
- Dimensjonering av sveiser og konstruksjonselementer på toppen av søylene må gjøres.
- Dimensjonering av sveiser på opplagerplatene må gjøres.

8. REFERANSER

Litteratur/Skriftlige kilder

- 1 - Bøe, Jan Kåre, 2010: Produktutvikling og Produktdesign, Kompendium til emnet TIP200, Universitetet for Miljø- og Biovitenskap, Ås, 218 sider.
- 2 - Bøe, Jan Kåre, 2011: Konsept- og Produktrealisering, Kompendium til emnet TIP300, Universitetet for Miljø- og Biovitenskap, Ås, Kompendium under arbeid.
- 3 - Norsk Standard, 1978: NS 5514 - Kraner og løfteutstyr - Stålkonstruksjoner - Beregninger, 2. utgave, 117 sider.
- 4 - Helgesen, Helge, 1980: Løfte- og transportmaskiner, Universitetsforlaget, Oslo, ISBN 82-00-27515-9, 278 sider.
- 5 - Johannessen, Jarle, 2009: Tekniske Tabeller, 2. utgave og 7 opplag, J.W. Cappelens Forlag, ISBN 82-02-16822-8, 158 sider.
- 6 - DNV, 2011: DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures, 176 sider.
- 7 - Terjesen, Geir: Torsjon og vipping, Undervisningsforedrag i emnet TMP301, Universitetet for Miljø- og Biovitenskap, Ås, 55 slides, 28 sider.
- 8 - Tilbudstegning fra Norconsult, UMB Verkstedbygning 512, Plan 1, Ventilasjon, Oppdragsnummer 5014378, Tegningsnummer V36-PL01-002, 28.9.2010.

Nettkilder

- 9 - Lovdata, Produktansvarsloven: <http://www.lovdata.no/all/tl-19881223-104-001.html> (Besøkt 1.2.2012)
- 10 - Lovdata, Produktkontrollloven: <http://www.lovdata.no/all/tl-19760611-079-0.html> (Besøkt 1.2.2012)
- 11 - Lovdata, Arbeidsmiljøloven: <http://www.lovdata.no/all/tl-20050617-062-001.html> (Besøkt 1.2.2012)
- 12 - Lovdata, Forskrift om maskiner: <http://www.lovdata.no/for/sf/ad/td-20090520-0544-001.html> (Besøkt 1.2.2012)
- 13 - Norsk Stål, Produktkatalog: <http://www2.norskstaal.no/varekatalog/> (Besøkt 5.3.2012)
- 14 - Norsk Stål, Dimensjoner, masse og statiske verdier for varmformede hulprofiler: <http://www2.norskstaal.no/varekatalog/tabell.aspx?tabellID=1160&vgr=53&del=1&mode=show> (Besøkt 12.3.2012)
- 15 - Norsk Stål, Dimensjoner, masse og statiske verdier for UPE-profiler: <http://www2.norskstaal.no/NR/rdonlyres/7D7071CF-8820-45C4-AEBF-27DD6830F91D/0/VVUPE.pdf> (Besøkt 11.4.2012)
- 16 - Norsk Stål, Produktkatalog, Flate kranskiner: http://www2.norskstaal.no/varekatalog/varekatalog.aspx?varegr=33_1# (Besøkt 27.3.2012)

- 17 - Abus Crane Systems, Produktbilde:
http://www.abuscranes.co.uk/var/abus/storage/images/produkte/laufkrane/laufkrane_bilder/zweitraegerlaufkran_kampf/35513-2-ger-DE/Zweitraegerlaufkran_Kampf_info_banner.jpg (Besøkt 15.2.2012)
- 18 - Abus Crane Systems, Wire rope hoists:
<http://www.abuscranes.co.uk/var/abus/storage/original/application/966954119ece03d4977109c007e4c597.pdf> (Besøkt 21.2.2012)
- 19 - Crane Tec, produktbilde:
http://www.overheadcraneskentucky.com/Brandt_Pictures_004_op_648x486.jpg
(Besøkt 15.2.2012)
- 20 - Dearborn Overhead Crane, Generell informasjon:
http://www.dearborncrane.com/crane_buyers_guide/bridge_cranes.htm
(Besøkt 17.2.2012)
- 21 - Munck Cranes, Top Running, Single Girder Overhead Cranes:
<http://www.munckcranes.com/documents/Trsg.pdf> (Besøkt 23.2.2012)
- 22 - Munck Cranes, Kranguide: <http://www.munckcranes.com/documents/Trsg.pdf>
(Besøkt 15.2.2012)
- 23 - RM Hoist, Spacemaster SX wire rope hoists:
<http://www.rmhoist.com/downloads/DIV14SPEC/DIV14%20Appendix.pdf>
(Besøkt 23.2.2012)
- 24 - Harrington Hoists, RH Three Phase Wire Rope Hoists:
http://www.harringtonhoists.com/products/pdf/catalog/RH-A_SS.pdf
(Besøkt 23.2.2012)
- 25 - Demanor, Produktbilde:
<http://www.demanor.no/Portals/Demanor/PropertyAgent/1953/Images/196.jpg>
(Besøkt 29.2.2012)
- 26 - Demanor, Produktbilde:
<http://www.demanor.no/Portals/Demanor/PropertyAgent/1953/Images/103.jpg>
(Besøkt 29.2.2012)
- 27 - Demanor, Produktbilde:
<http://www.demanor.no/Portals/Demanor/PropertyAgent/1953/Images/101.jpg>
(Besøkt 26.4.2012)
- 28 - Demanor, Hjemmeside: <http://www.demanor.no>
- 29 - Demag, Drive designer: <http://www.drives.demag-designer.de> (Besøkt 12.4.2012)
- 30 - Tingstad, Teknisk katalog:
http://www.tingstad.no/upload_images/3BCAAB409548472FBEB17D7EB7E49D9E.pdf
(Besøkt 24.4.2012)
- 31 - Steel Recycling Institute, Steel Recycling Rates for Steel: <http://www.recycle-steel.org/en/Recycling%20Resources/~media/Files/SRI/Media%20Center/2010RateSheetWeb.ashx> (Besøkt 26.4.2012)
- 32 - Earth911, Facts About Steel Recycling: <http://earth911.com/recycling/metal/steel/facts-about-steel-recycling/> (Besøkt 27.4.2012)

9. VEDLEGG

A – Refleksjonsnotat

B – Oppgavetekst

C - Oversikt over bjelkeprofiler og deres statiske verdier

D – Fremdriftsplan med milepæler

E – Spesifikasjoner på kjøremaskineri fra Demag

F – Konstruksjonstegninger

F.1 - Sammenstilling Kranbru	Tegning nr. 1
F.2 - Eksplosjonstegning Kranbru	Tegning nr. 2
F.3 - Sammenstilling Bruvogn	Tegning nr. 3
F.4 - Eksplosjonstegning Bruvogn	Tegning nr. 4
F.5 - Sammenstilling Kranbane	Tegning nr. 5
F.6 - Eksplosjonstegning Kranbane	Tegning nr. 6
F.7 - Konstruksjonstegning Søylebjelke, Søylefotplate, Søyletopplate og Søyleflensplate	Tegning nr. 7
F.8 - Konstruksjonstegning Kranbanebjelke, Kranbaneskinne og Kranbruskinne	Tegning nr. 8
F.9 - Konstruksjonstegning Kranbrudrager, Endeplate, Endestiver og Avstiverplate	Tegning nr. 9
F.10 - Konstruksjonstegning Bruvognbjelke	Tegning nr. 10
F.11 - Konstruksjonstegning Opplagerplate	Tegning nr. 11

Vedlegg A

Refleksjonsnotat

Refleksjonsnotat

Underveis i prosjektet har jeg prøvd å ta fornuftige og gjennomtenkte avgjørelser og komme med løsninger som er gjennomførbare og hensiktsmessige. Nå, ved veis ende, ser jeg flere ting ved resultatet som gjerne skulle ha vært noe annerledes, uten at jeg mener at gjennomføringen/arbeidet var dårlig. Tiden som har vært tilgjengelig har satt noen begrensninger på hvor grundig de forskjellige løsningene i konseptdrøftingen kunne bli utforsket, og dette har resultert i at jeg muligens ikke har kommet frem til det jeg mener er den ultimate løsningen nå.

Noe jeg tenker er at en toppkjørende traverskran kunne ha vært en bedre løsning enn den jeg har konkludert med. Bruk av kanalstål som kranbane viste seg å føre med seg noe usikkerhet/vanskeligheter i beregninger, og ikke minst gi begrensninger på bruvognas utforming. I ettertid mener jeg at disse negative konsekvensene veier tyngre enn de utfordringene som en toppkjørende løsning fører med seg, og som jeg har beskrevet i oppgaven.

Uansett så reflekterer jo dette en realistisk "arbeidssituasjon" der det videre arbeidet ville ha vært å gjøre de endringer som er erfart i løpet av dette arbeidet, og fått et enda bedre resultat.

Det var nødvendig igjennom prosessen å begrense hva jeg skulle bevege meg inn på. Det å gå inn på detaljer som f.eks. å dimensjonere kjøremaskineri (hjul, aksling, kulelager osv....) er noe som jeg skal ha forutsetningene for, men arbeidsmengden ville ha blitt mye større, og prosjektrapporten ville ha blitt mindre konkret.

Et prosjekt som dette fører med seg at en må gjøre masse designvalg. Her har jeg prøvd å være selvstendig, og ikke spurt veiledere eller andre for mye. Det har vært noen møter med veileder der jeg har fått råd og tips, men etter jeg fikk følelsen, eller det ble antydning at jeg var på rett spor, valgte jeg å prøve å være mest mulig selvstendig.

En erfaring jeg har fått bekreftet ytterligere er fordelene med å være flere som samarbeider, ved at man blir mer kreativ og får diskutert ideer og løsninger. På en annen side så har det å jobbe aleine gitt større utfordringer og ansvar, i tillegg til god trening i selvstendighet.

Jeg mener at jeg har fått utforsket mange av de aspektene som er nødvendig for designe en traverskran, og denne oppgaven kan forhåpentligvis legge grunnlaget for en videre utvikling av en komplett traverskran.

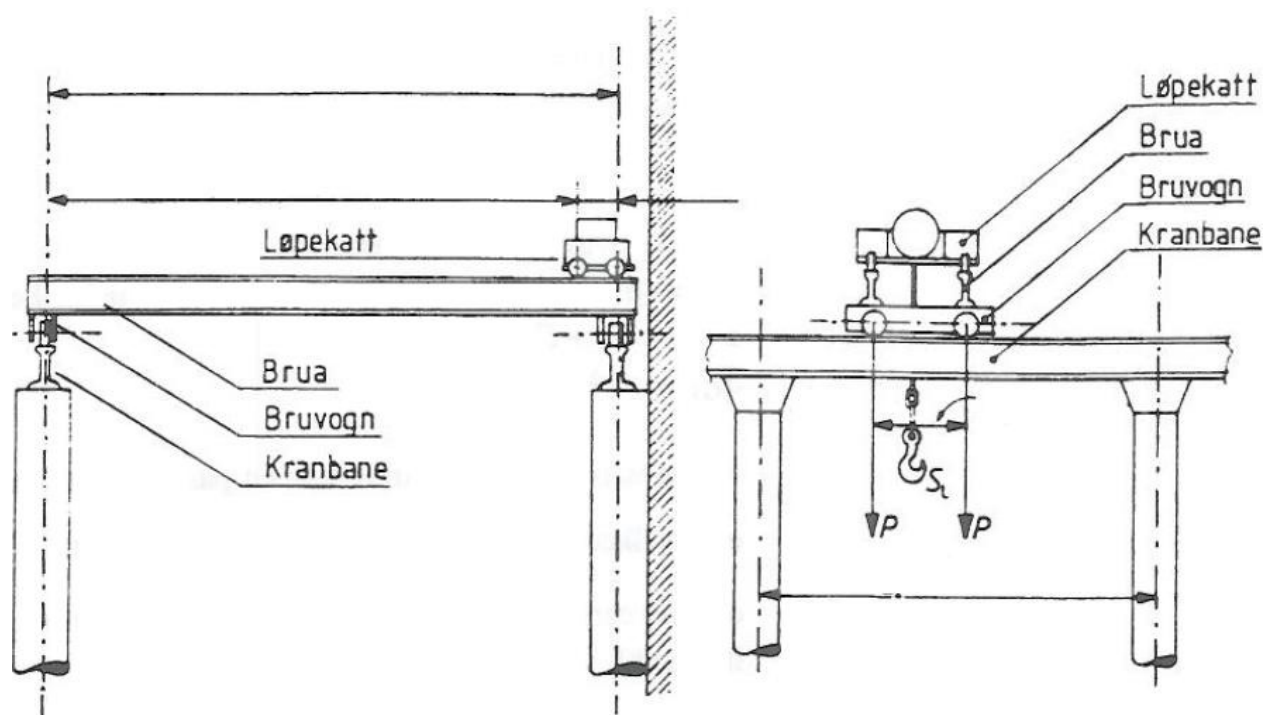
Vedlegg B

Oppgavetekst

Prosjekt: 10 tonns løpekran til UMB verksted

Bakgrunn

Verkstedet ved UMB har behov for en større løpekran for å kunne ta større oppdrag. Kranen skal plasseres i verkstedfløy 2. I denne maskinhallen er det i dag er en løpekran med 2 tonns kapasitet. Denne skal byttes ut med en 10 tonns løpekran. Kranen skal dimensjoneres og dokumenteres i henhold til gjeldene lover og forskrifter.



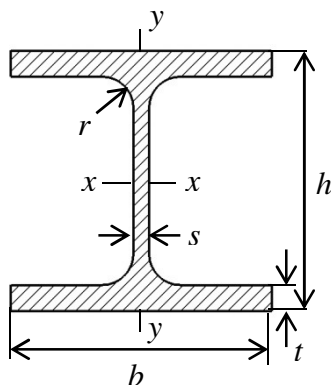
Momenter ved dimensjonering og valg av komponenter

- Valg av materiale og profiltyper
- Styrkeberegning
- Utmattingsberegning
- Dimensjonering av bjelker, søyler med mer.
- Sveise/skrueforbindelser
- Valg av motor, heiseutstyr og andre deler.
- Hvilke standarder gjelder?
- Hvilke sikkerhetshensyn/forskrifter gjelder?
- Lag prisliste på alle komponenter.
- Kranen skal tilpasses hallens mål.
- Kranen skal ha gode tekniske løsninger.

Vedlegg C

Bjelkeprofiler og deres dimensjoner, masse og andre statiske verdier

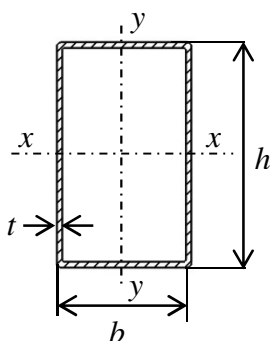
HE-B-profiler:



Tabell X-1: Oversikt over dimensjoner, masse og noen statiske verdier for HE-B-profiler brukt i utregninger. Verdiene er hentet fra tekniske tabeller. ^(5, side 84)

Betegnelse	Dimensjoner [mm]					Tverrsnitt [mm^2] $\cdot 10^3$	Vekt per meter [kg/m]	Last per meter [N/m]	Tverrsnittsmodul om sterk akse [mm^3] $\cdot 10^3$	Annet arealmoment om sterk akse [mm^4] $\cdot 10^6$	Tverrsnittsmodul om svak akse [mm^3] $\cdot 10^3$	Annet arealmoment om svak akse [mm^4] $\cdot 10^6$
	h	b	s	t	r	A	G	q	W_x	I_x	W_y	I_y
HE200B	200	200	9	15	18	7,81	61,3	601	570	57,0	200	20,0
HE220B	220	220	9,5	16	18	9,1	71,5	701	736	80,9	258	28,4
HE260B	260	260	10	17,5	24	11,8	93,0	912	1150	149,2	395	51,3

Hulprofiler:



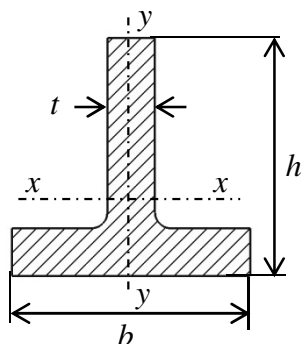
Tabell X-2: Oversikt over dimensjoner, masse og noen statiske verdier for hulprofilet brukt i utregninger. Verdiene er hentet fra Norsk Stål. ⁽¹⁴⁾

Betegnelse	Dimensjoner [mm]			Tverrsnitt [mm^2] $\cdot 10^3$	Vekt per meter [kg/m]	Last per meter [N/m]	Tverrsnittsmodul om sterk akse [mm^3] $\cdot 10^3$	Annet arealmoment om sterk akse [mm^4] $\cdot 10^6$	Tverrsnittsmodul om svak akse [mm^3] $\cdot 10^3$	Annet arealmoment om svak akse [mm^4] $\cdot 10^6$
	h	b	t	A	G	q	W_x	I_x	W_y	I_y
200x120	200	120	5	3,07	24,1	236,4	168	16,85	127	7,62

Vedlegg C

Bjelkeprofiler og deres dimensjoner, masse og andre statiske verdier

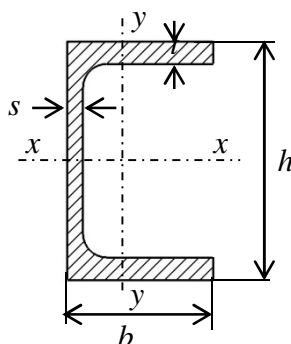
T-profiler/utkragerbjelkene:



Tabell X-3: Oversikt over dimensjoner, masse og noen statiske verdier for hulprofilet brukt i utregninger. Verdiene er målt og utregnet for hånd.

Betegnelse	Dimensjoner [mm]			Tverrsnitt [mm^2] · 10^3	Vekt per meter [kg/m]	Last per meter [N/m]	Annet arealmoment om sterk akse [mm^4] · 10^6	Avstand fra profilets bunn og opp til tyngdepunktsaksen [mm]
	h	b	t	A	G	q	I_x	y
T 150	150	150	15	4,28	33,4	327,3	9,11	43

UPE-profiler:

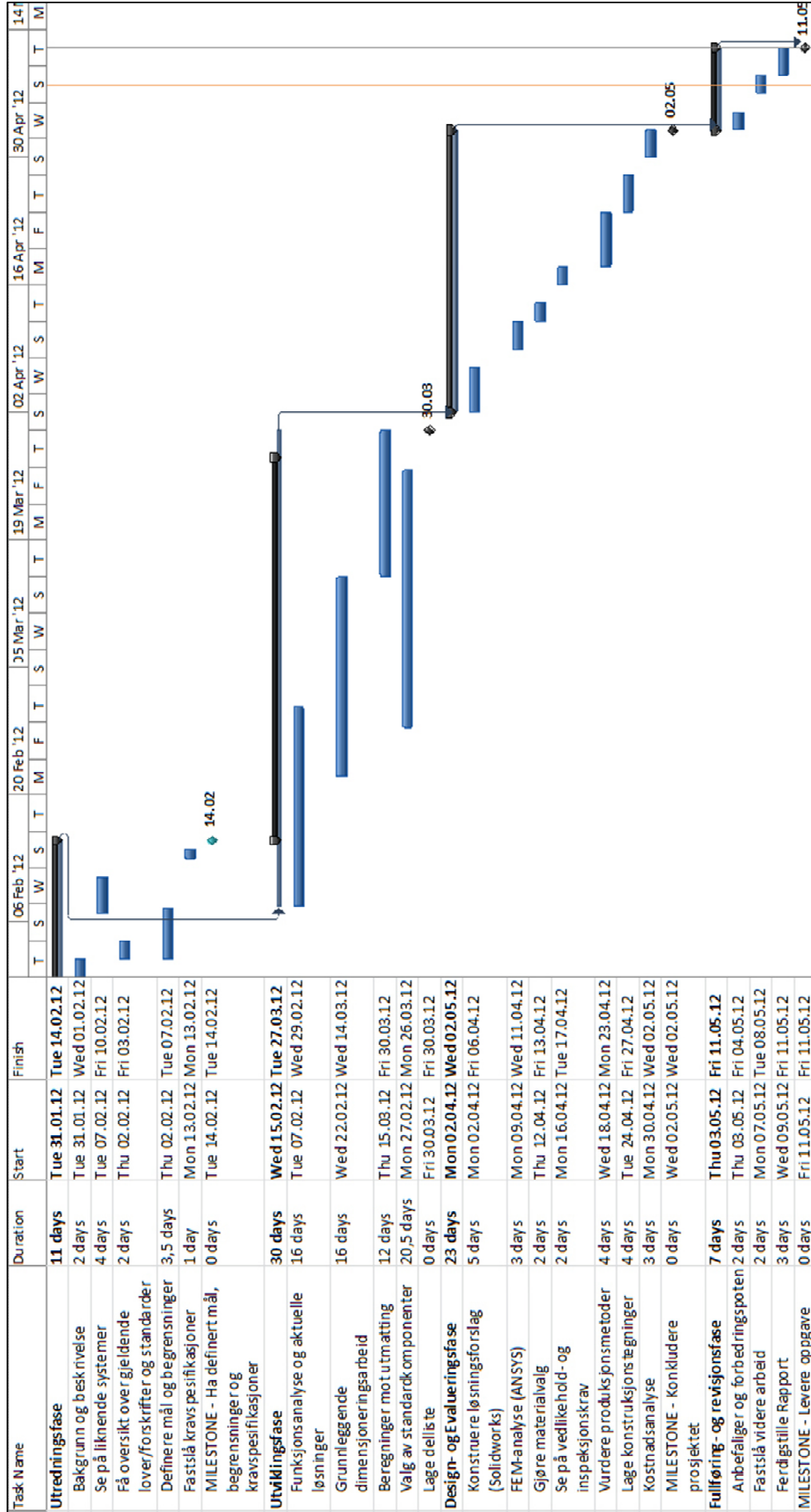


Tabell X-4: Oversikt over dimensjoner, masse og noen statiske verdier for UPE-profilene brukt i utregninger. Verdiene er hentet fra Norsk Stål. ⁽¹⁵⁾

Betegnelse	Dimensjoner [mm]					Tverrsnitt [mm^2] · 10^3	Vekt per meter [kg/m]	Last per meter [N/m]	Tverrsnittsmodul om sterk akse [mm^3] · 10^3	Annet arealmoment om sterk akse [mm^4] · 10^6	Tverrsnittsmodul om svak akse [mm^3] · 10^3	Annet arealmoment om svak akse [mm^4] · 10^6
	h	b	s	t	r	A	G	q	W_x	I_x	W_y	I_y
UPE300	300	100	9,5	15	15	5,66	44,4	436	522	78,2	75,6	53,8
UPE360	360	110	12	17	18	7,79	61,2	600	824	148,2	105	84,4

Vedlegg D

Fremdriftsplan med milepæler



Erfaringer: Selv om prosjektplanen gav et godt utgangspunkt og en fin oversikt over prosjektets gjøremål, viste den seg ikke å være hensiktsmessig med tanke på tidsfordelingen. Erfaringen ble at de forskjellige oppgavene ble mye mer overlappende og mindre adskilt enn denne prosjektplanen gir uttrykk for. Milepælene ble hovedsakelig fulgt og sikret en viss fremgang i prosjektet. Selv om selve tidsplanen ikke ble fulgt, er det ikke opplevd noe spesielt tidspress i noen deler av prosjektperioden. Arbeidsfordelingen har vært ganske jevn hele tiden.

Vedlegg E

Spesifikasjoner på kjøremaskineri fra Demag

Technical description

Item 1

1 Demag offset geared brake motor AME 30 DD-M0-45-1-55.7 ZBF 90 B 4 B020

The offset geared brake motor is designed according to our publication 203 151 44, which we will send to you upon request.

Note: The motor used is not subject to the EuP Directive.

Technical data:

Mounting code	AME30DD-M0-45-1/55,7 - ZBF 90 B 4-B020
Output speed	24,0 rpm
Motor speed	1335 rpm
Output	0,400 KW
Cyclic Duration Factor	40 %
Type of enclosure of motor	IP 54
Operating temperature	-10 - + 40 °C
Installation altitude	≤ 1.000 m
Transmission ratio	55,70
Terminal box position	right 1
Mounting position	horizontal
Total weight, net approx.	42 kg

Current data:

Voltage	D/Y 133/230 V
Frequency	50 Hz
Current	D/Y 4,00/2,30 A

Technical data of the brake:

Brake torque	4,4 Nm
Voltage	104 V DC
Current	0,39 A
Brake rectifier GE	230V AC

Equipment:

Insulation to temperature class F
Fan disk
Brake rectifier GE
SE current relay
Shaft-mounted
Solid shaft with involute spline profile
Direct input

Colour:

RAL 5009, azure blue

Documentation:

Operating instruction/Installation guide
EU document according to the Machinery Directive

Vedlegg E

Spesifikasjoner på kjøremaskineri fra Demag

Item 2

1 Demag wheel block DRS-160-A45-A-65-B-X-A30

The wheel block is designed according to our publication 203 352 44, which we will send to you upon request.

Technical data:

Driven wheel block	A
Hub profile acc. DIN 5480	N 45
Travel wheel diameter	160 mm
Travel wheel width	89 mm
Travel wheel tread:	65,0 mm
Travel wheel contour	with flanges on both sides
Travel wheel material:	EN-GJS-700-2 spheroidal graphite cast iron
Net weight appr.	18,3 kg

Equipment:

Gearbox size A30
Wheel block prepared for pin connection
Wheel block prepared for torque bracket fitting

Painting:

RAL 7001, silver grey

Documentation:

Operating instruction/Installation guide
EU document according to the Machinery Directive

Item 3

1 Demag wheel block DRS-160-NA-A-65-B-X-X

The wheel block is designed according to our publication 203 352 44, which we will send to you upon request.

Technical data:

Non-driven wheel block	NA
Travel wheel diameter	160 mm
Travel wheel width	89 mm
Travel wheel tread:	65,0 mm
Travel wheel contour	with flanges on both sides
Travel wheel material:	EN-GJS-700-2 spheroidal graphite cast iron
Net weight appr.	18,3 kg

Equipment:

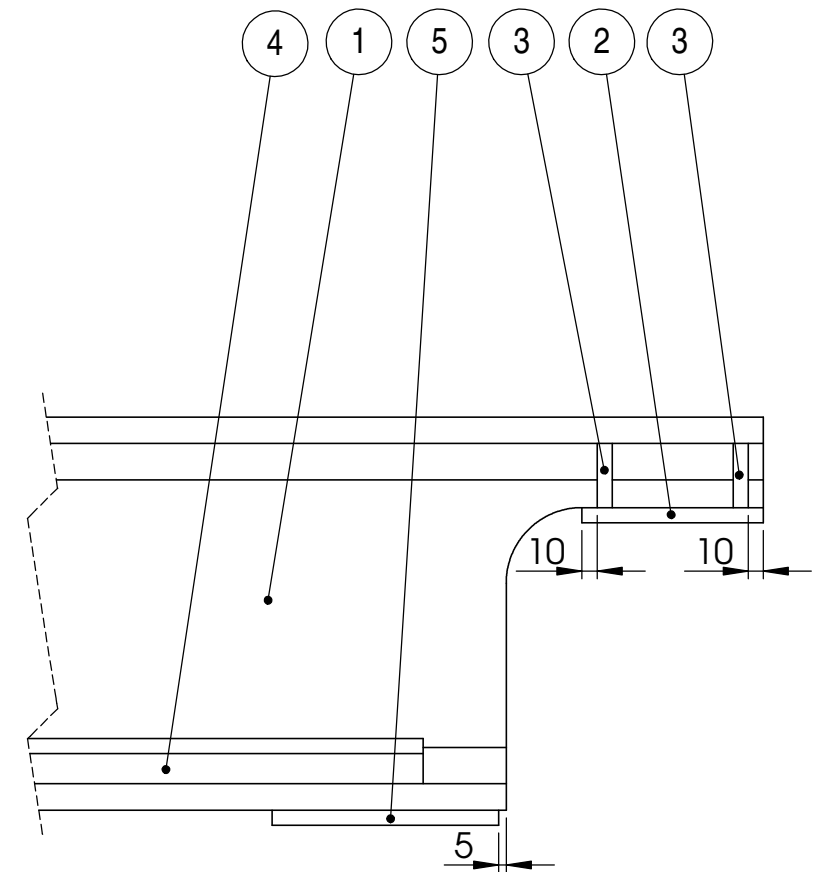
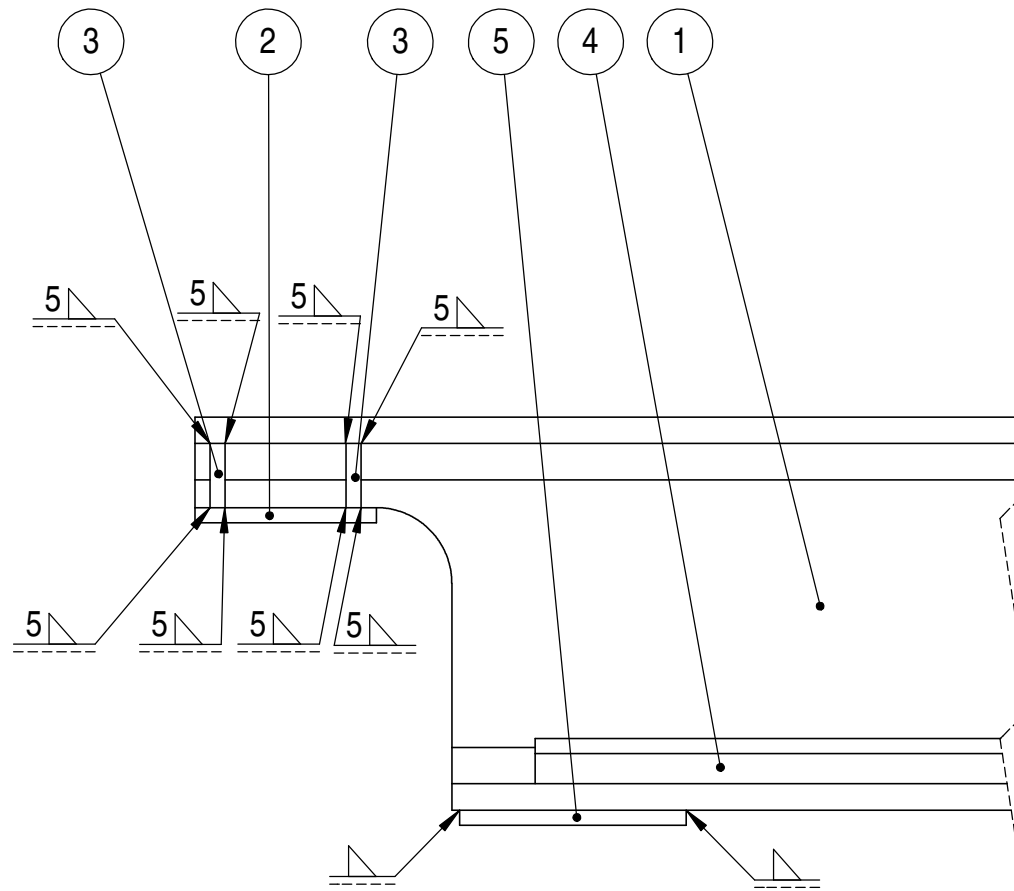
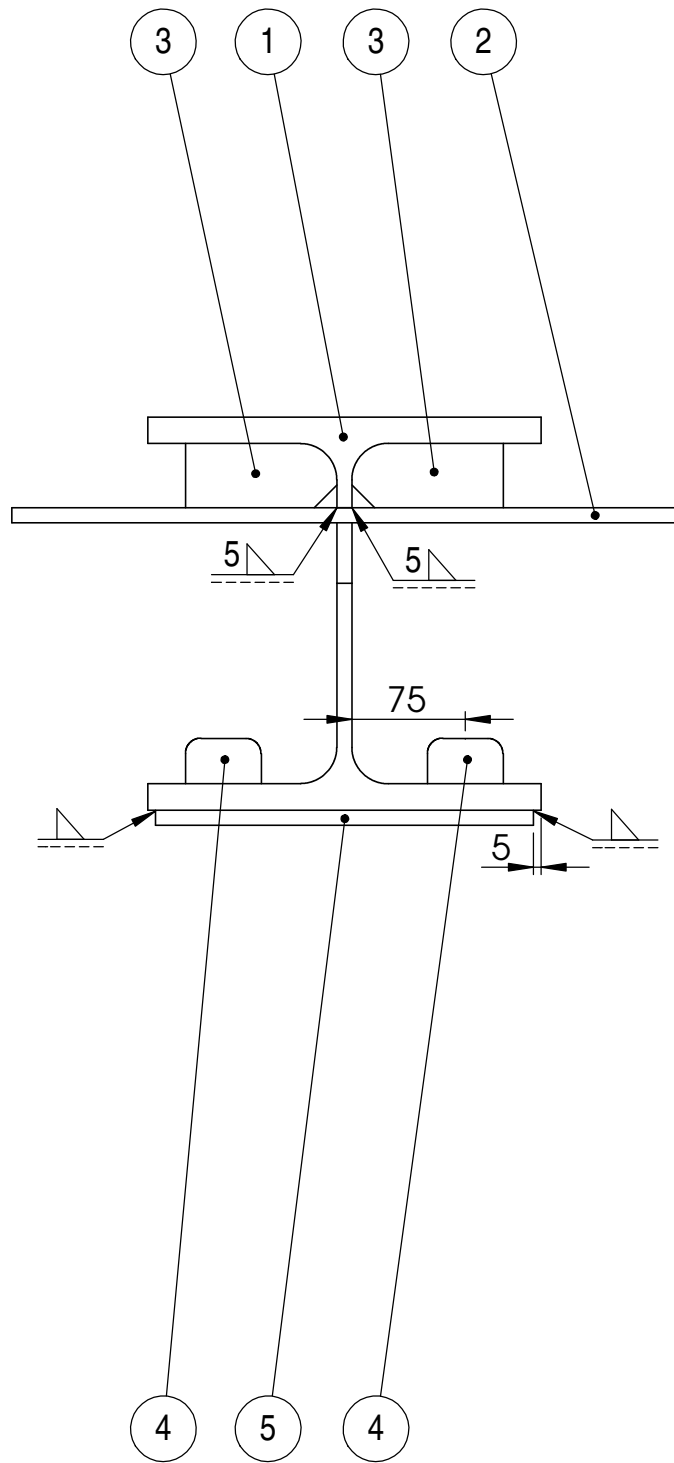
Wheel block prepared for pin connection

Painting:

RAL 7001, silver grey

Documentation:

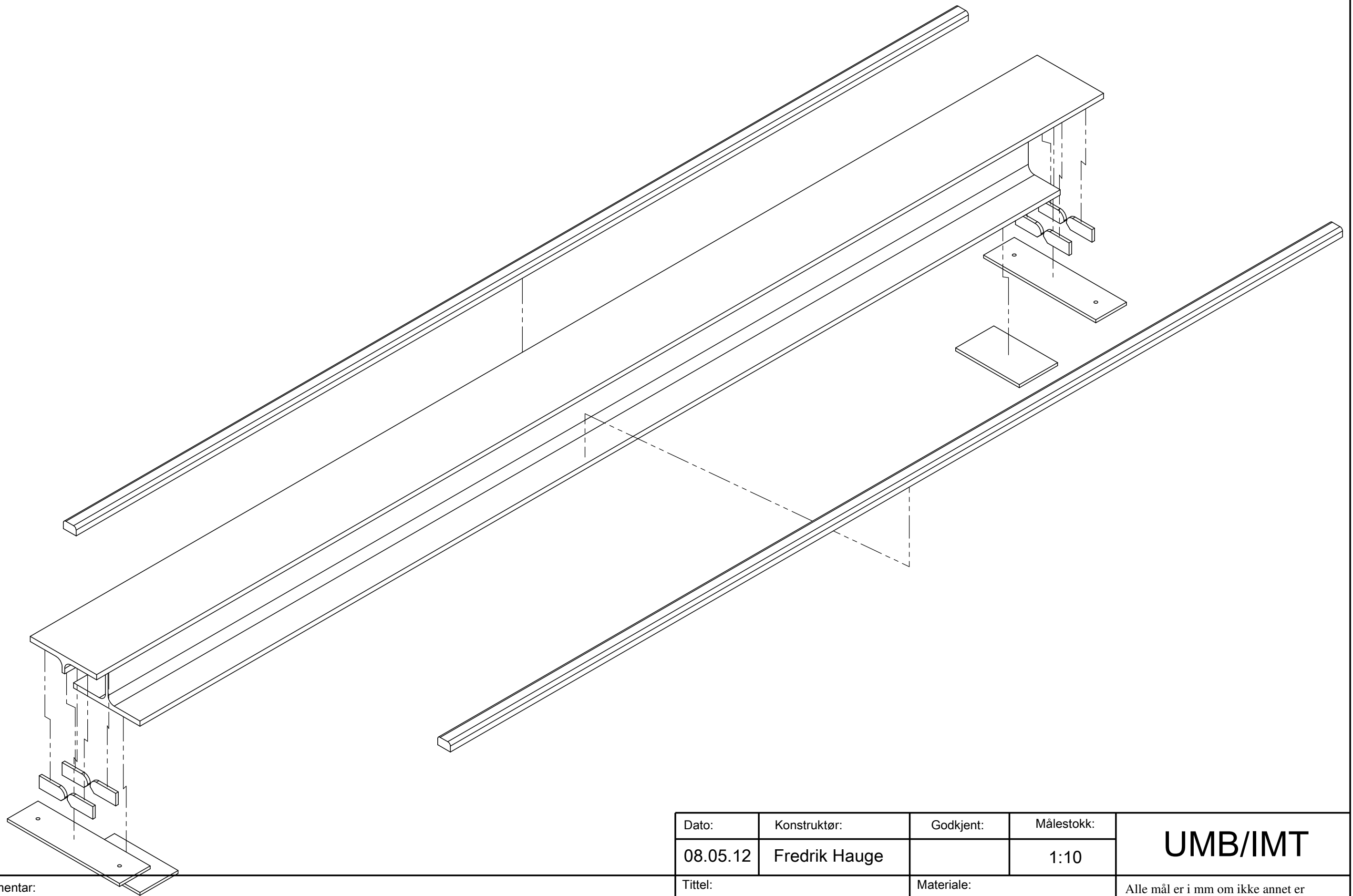
Operating instruction/Installation guide
EU document according to the Machinery Directive



DEL NO.	DELNAVN	MATERIALE	ANTALL
1	Kranbrudrager	S355J2+N	1
2	Endeplate	S355J2+N	2
3	Endestivere	S355J2+N	8
4	Kranbruskinne	S355JO	2
5	Avstiverplate	S355J2+N	2

Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
08.05.12	Fredrik Hauge		1:5	
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Sammenstilling Kranbru		Se delliste		
Vedlegg F.1				Tegning nr. 1

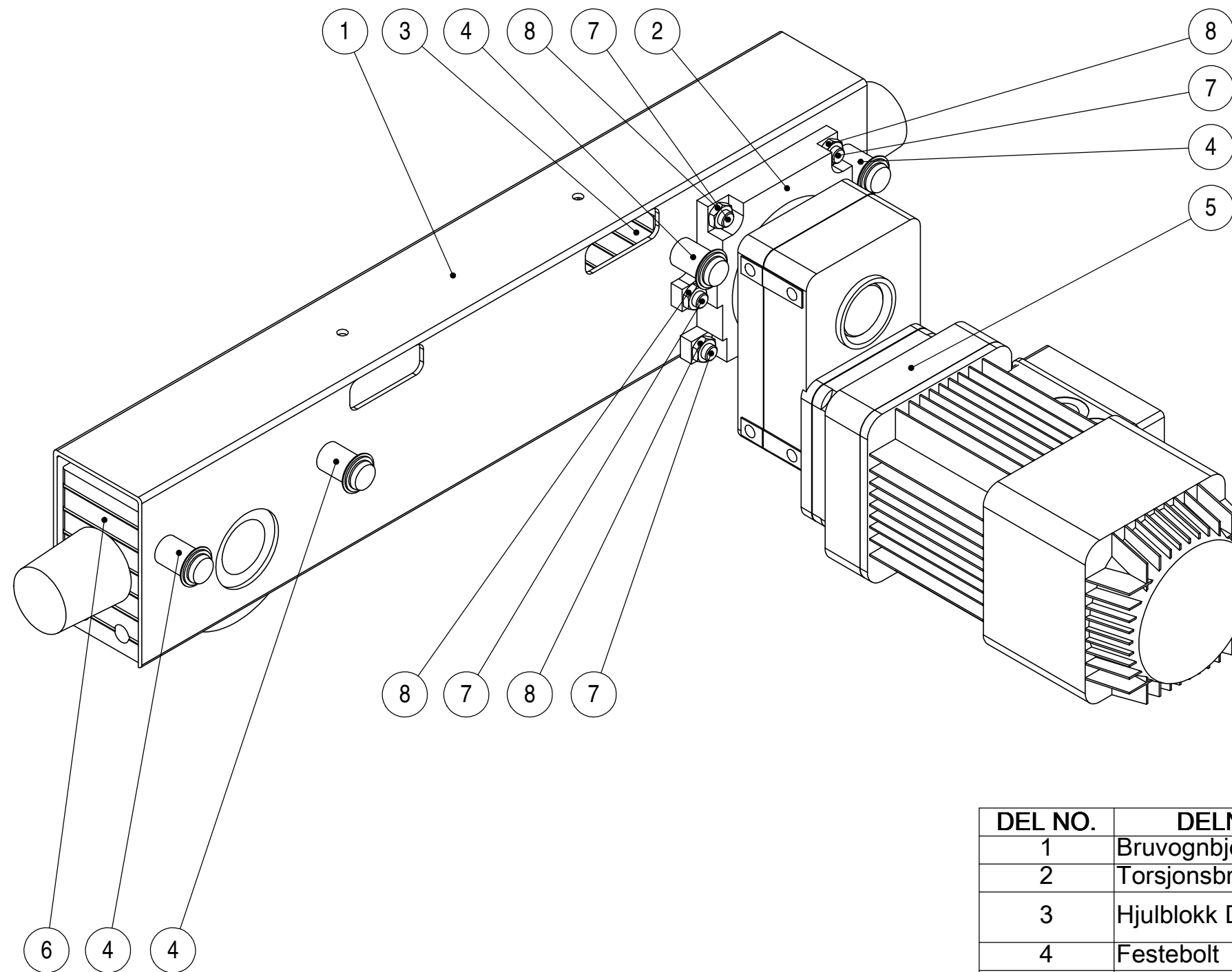
Kommentar:
Vekt ca. 440 kg



Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
08.05.12	Fredrik Hauge		1:10	
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Eksplosjonstegning Kranbru				Tegning nr. 2
Vedlegg F.2				

Kommentar:

Hull i endeplate bør bores etter påsveising for å sikre at hullene blir vinkelrette på kranbruas lengde.



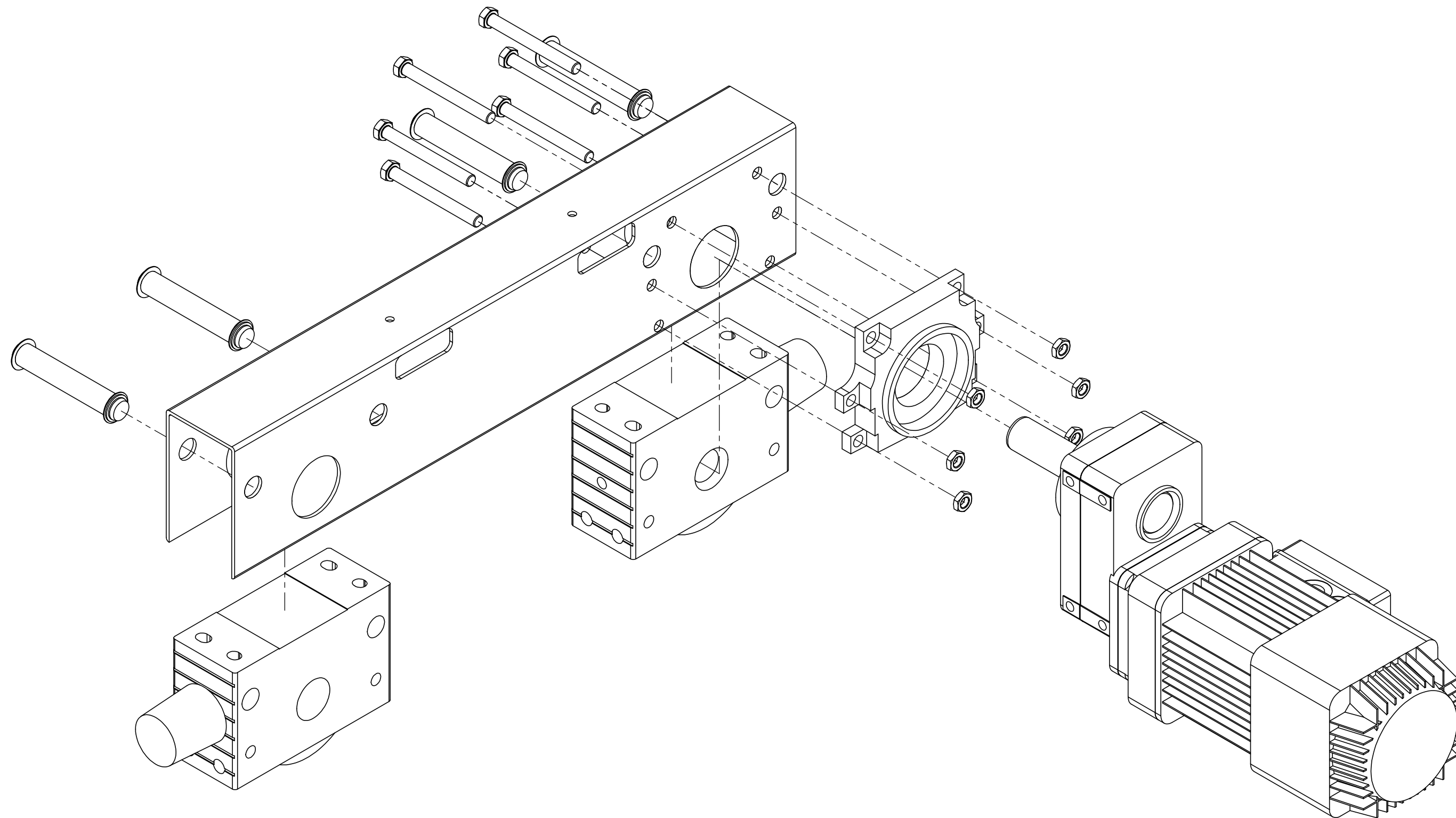
DEL NO.	DELNAVN	MATERIALE	ANTALL
1	Bruvognbjelke	S355J2+N	1
2	Torsjonsbrakett	Diverse - Innkjøpt komponent	1
3	Hjulblokk Dreven	Diverse - Innkjøpt komponent	1
4	Festebolt	Diverse - Innkjøpt komponent	4
5	Kjøremotor	Diverse - Innkjøpt komponent	1
6	Hjulblokk Udreven	Diverse - Innkjøpt komponent	1
7	Bolt M16 x 150	Syrefast stål, fasthetsklasse 80	6
8	Mutter M16	Syrefast stål, fasthetsklasse 80	6

Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
08.05.12	Fredrik Hauge		1:5	
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen Tegning nr. 3
Sammenstilling Bruvogn		Se delliste		
Vedlegg F.3				

Kommentar:

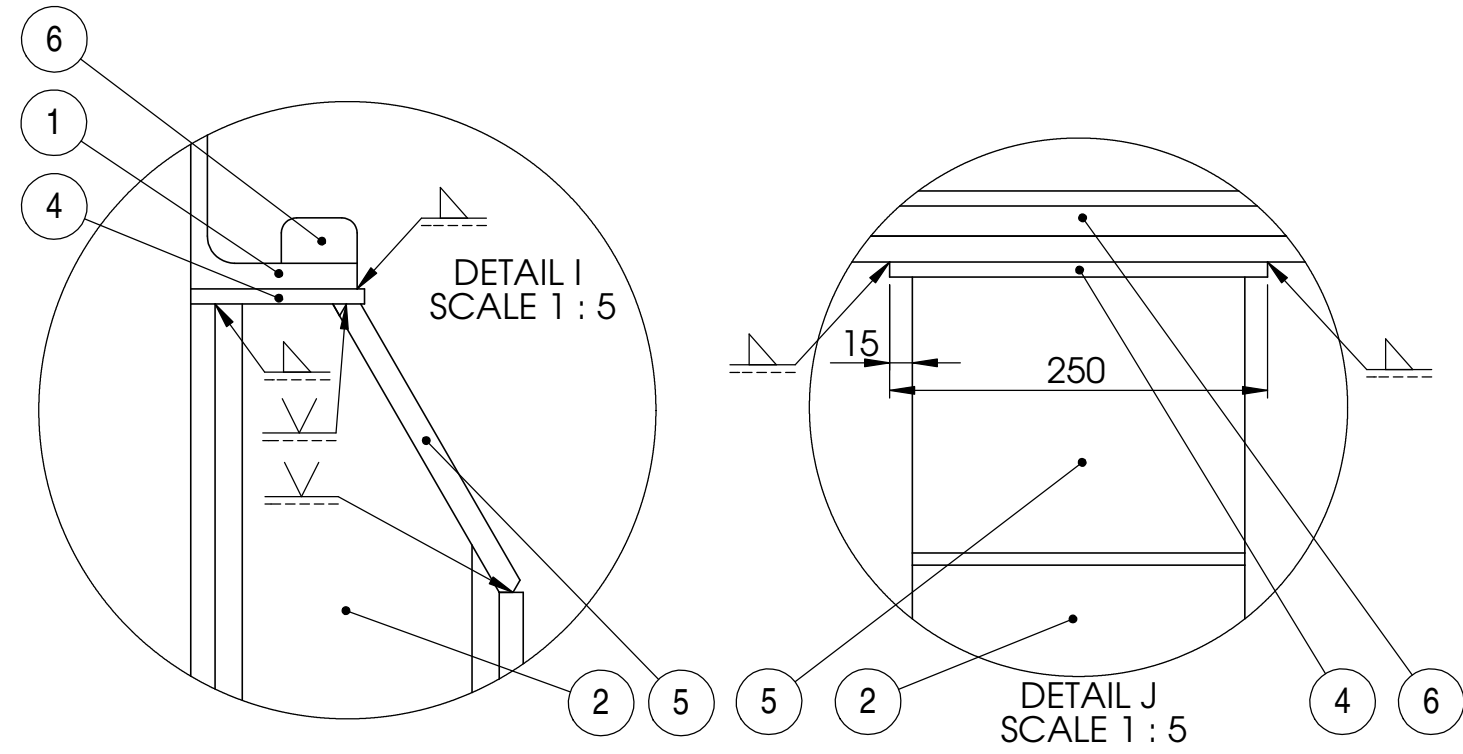
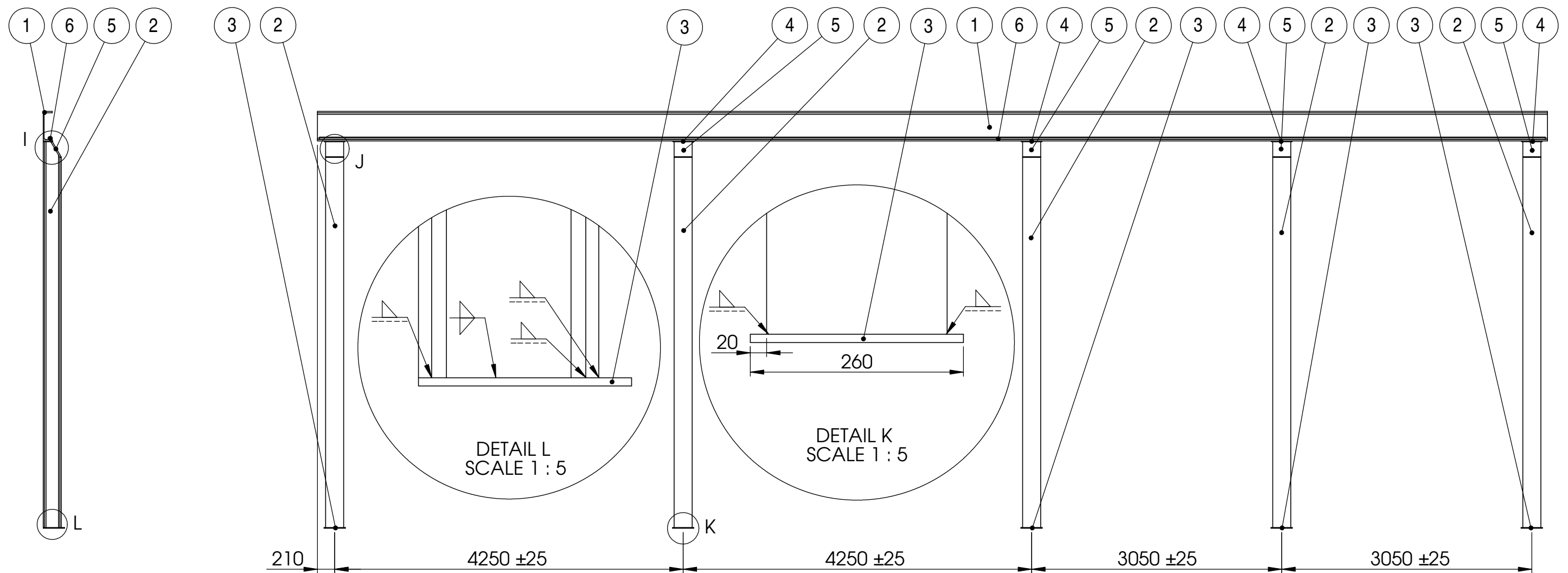
Vekt ca. 100 kg

Det skal være to eksemplarer av bruvognen der den andre er helt lik, bare speilvendt.



Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
08.05.12	Fredrik Hauge		1:5	
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Eksplisjons-tegning Kranbru				
Vedlegg F.4				Tegning nr. 4

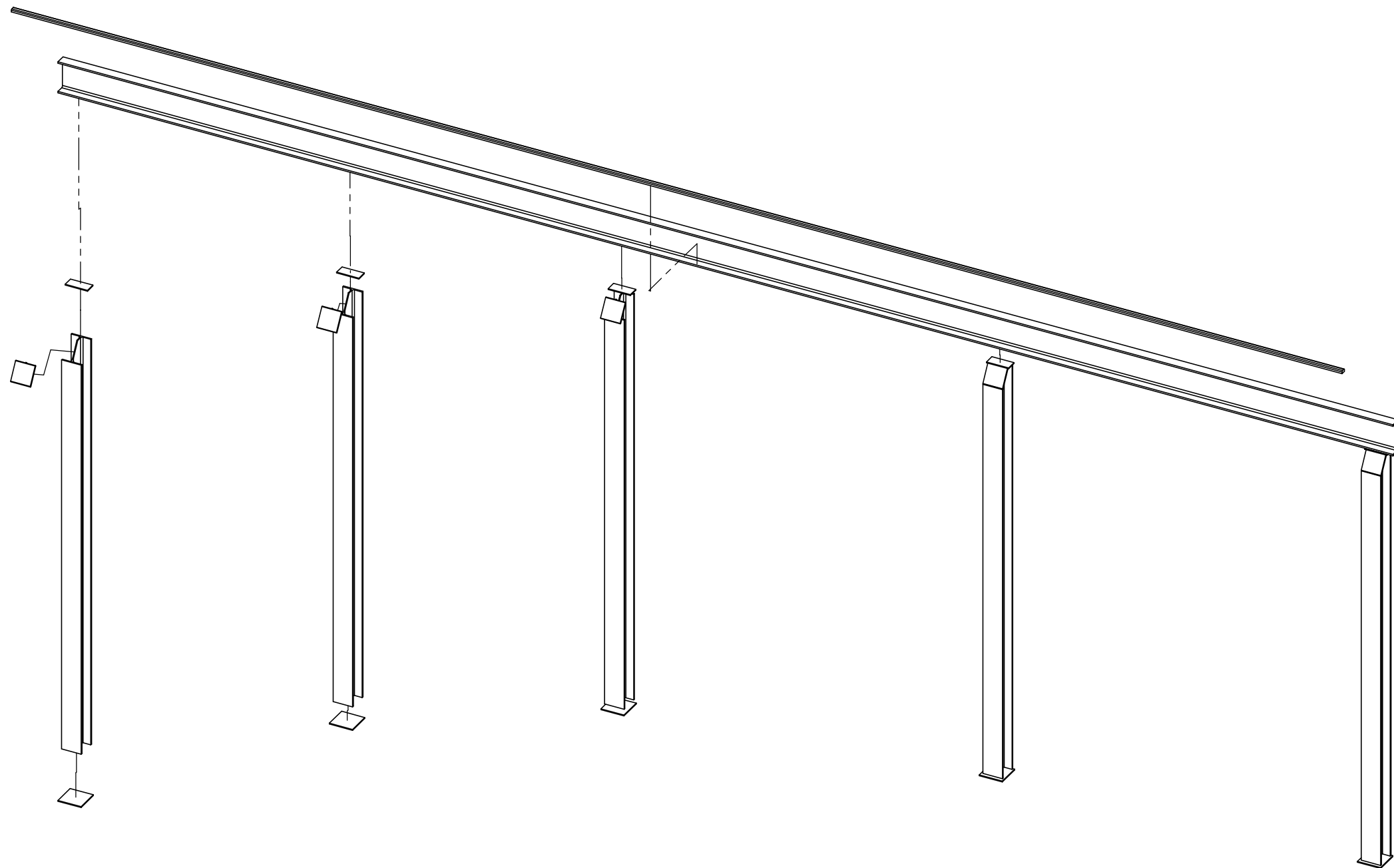
Kommentar:



DEL NO.	DELNAVN	MATERIALE	ANTALL
1	Kranbanebjelke	S355J2+N	1
2	Søylebjelke	S355J2+N	5
3	Søylefotplate	S355J2+N	5
4	Søyletopplate	S355J2+N	5
5	Søyleflensplate	S355J2+N	5
6	Kranbaneskinne	S355JO	1

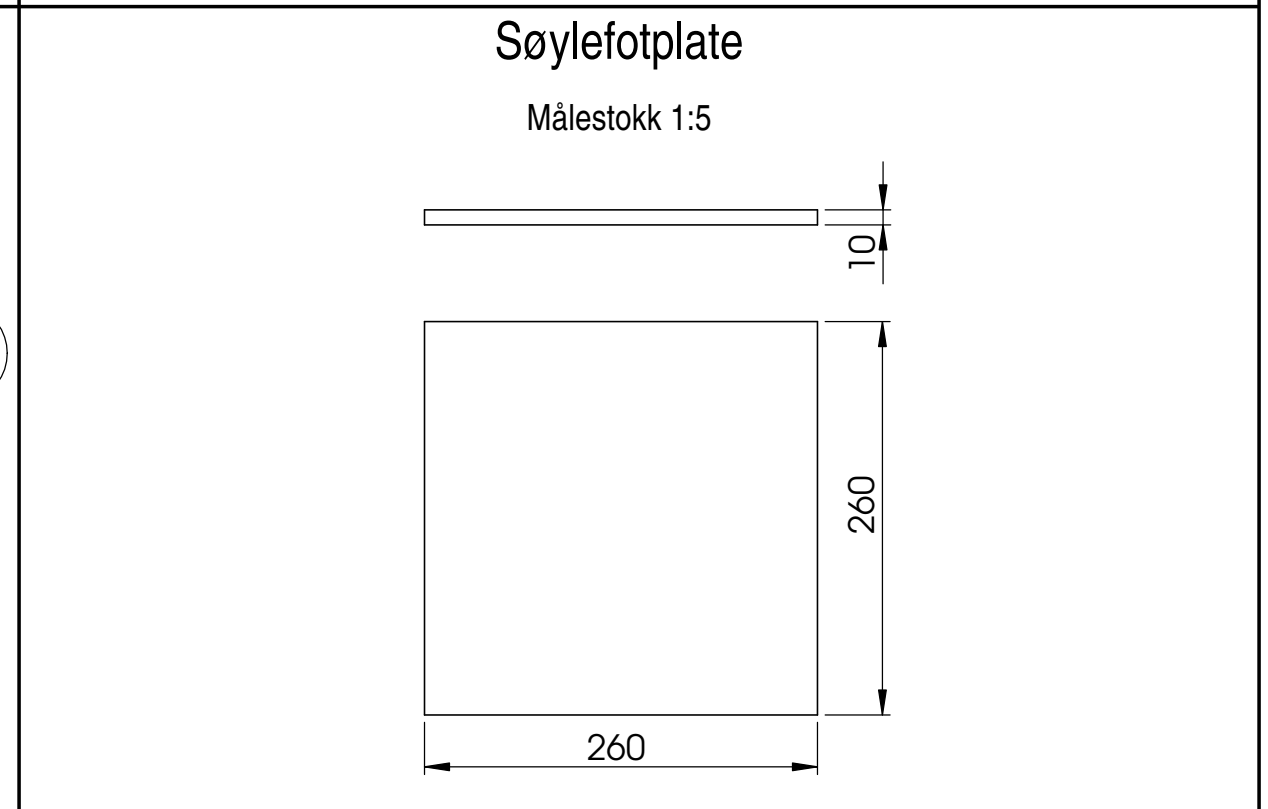
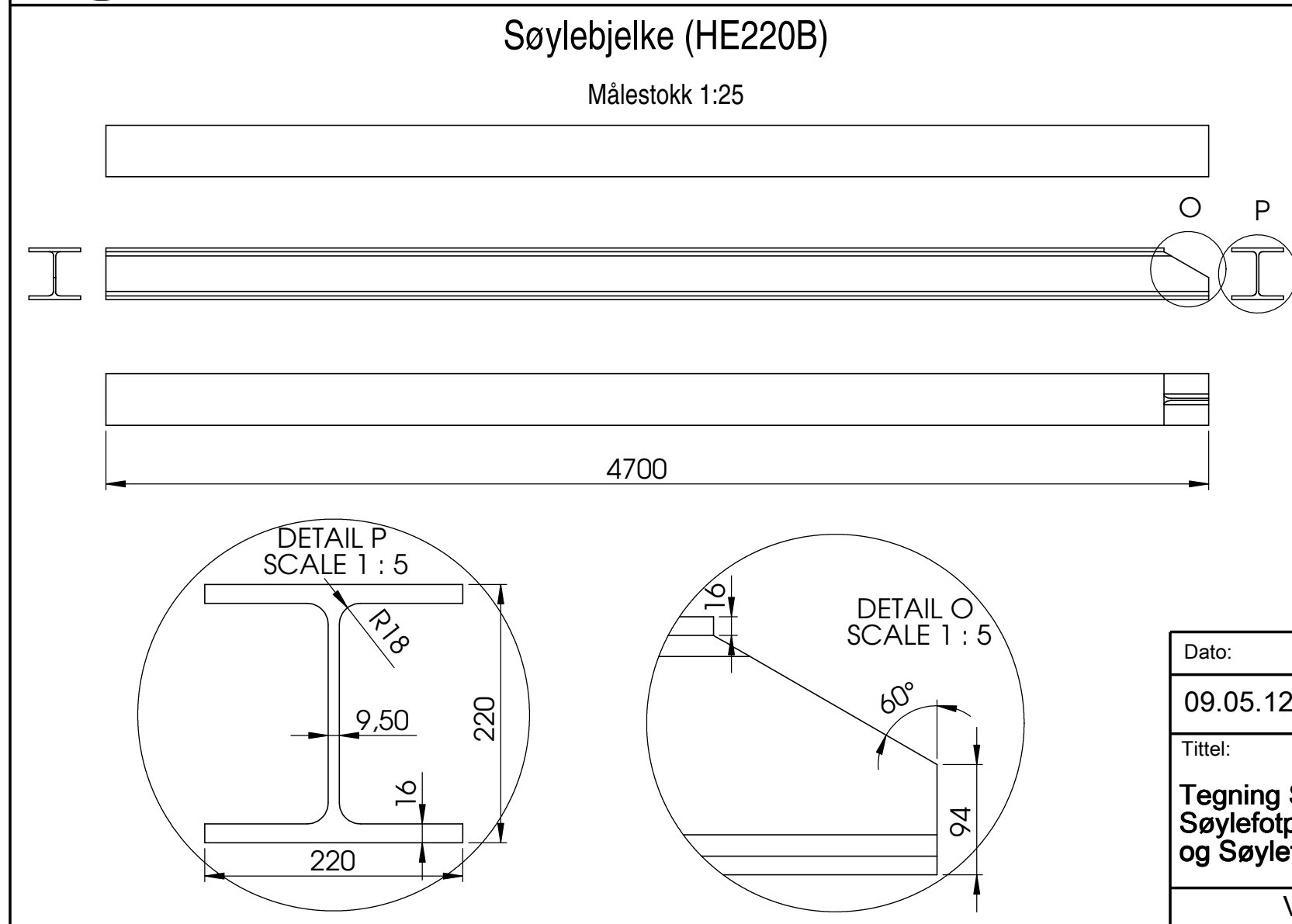
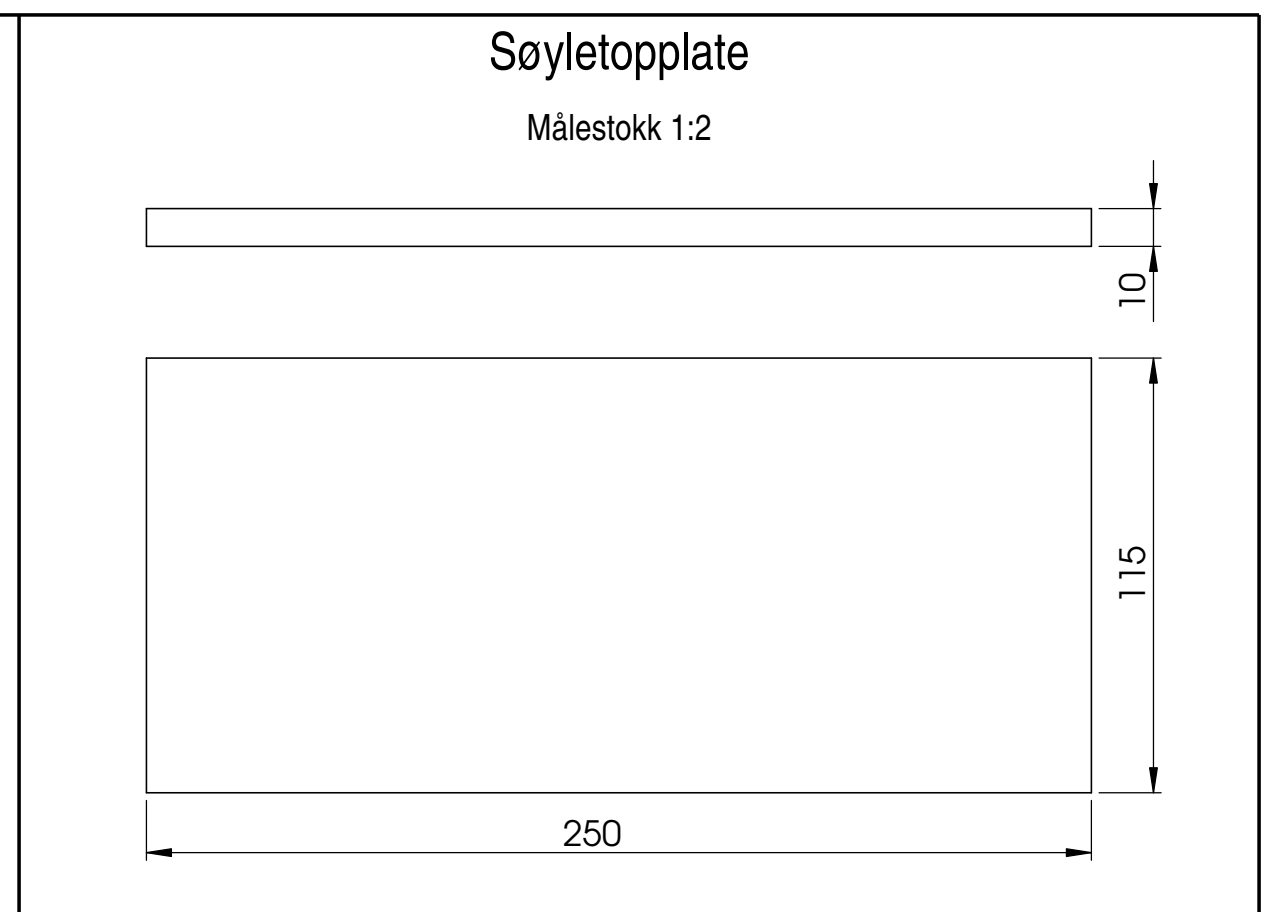
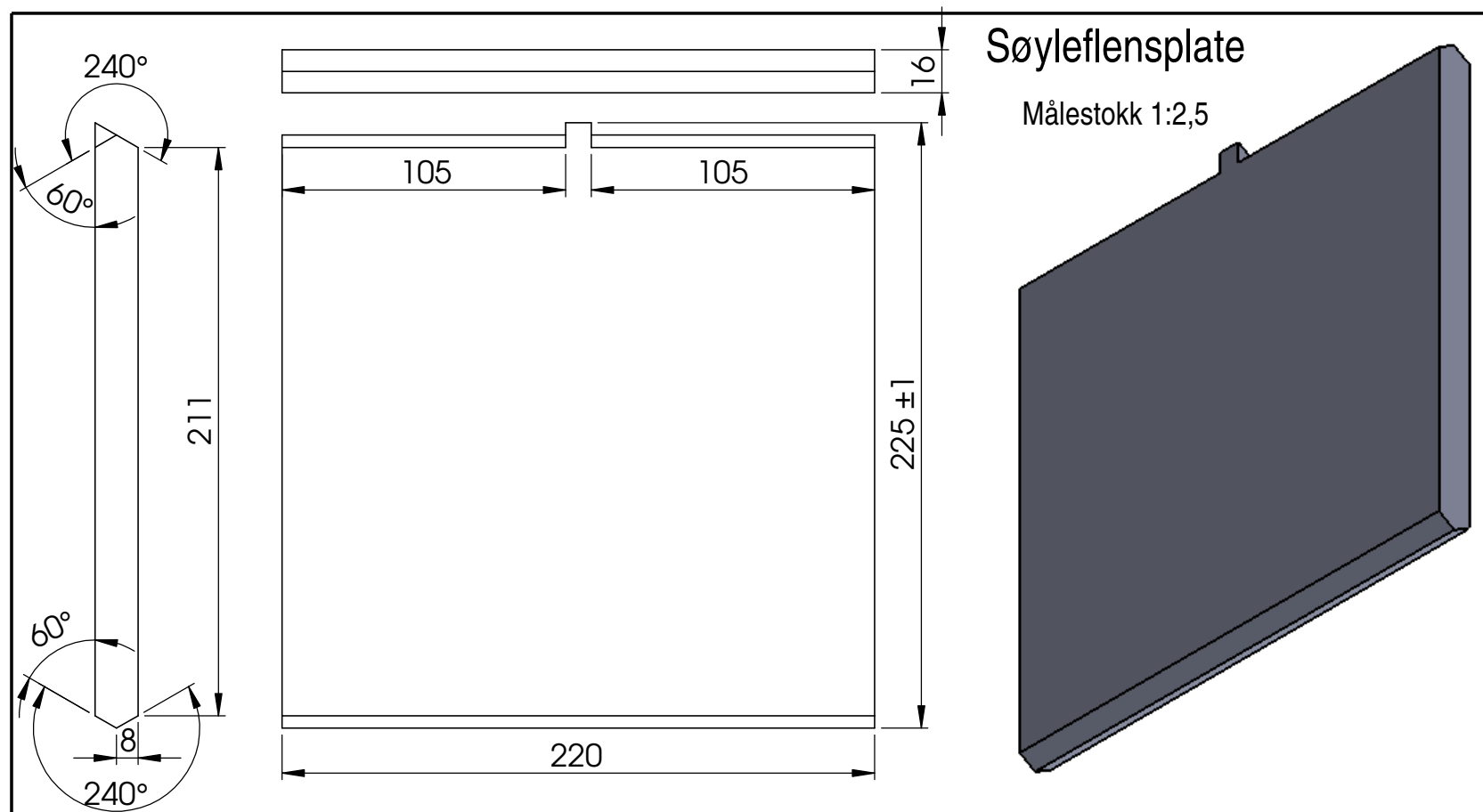
Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
08.05.12	Fredrik Hauge		1:50	
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Sammenstilling Kranbane		Se delliste		
Vedlegg F.5				Tegning nr. 5

Kommentar:
 Vekt ca. 2770 kg
 Dette er den nordlige kranbanen. Den sørlige skal være helt lik, bare speilvendt.



Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
09.05.12	Fredrik Hauge		1:50	
Tittel: Eksplasjonstegning Kranbane		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
				Tegning nr. 6
Vedlegg F.6				

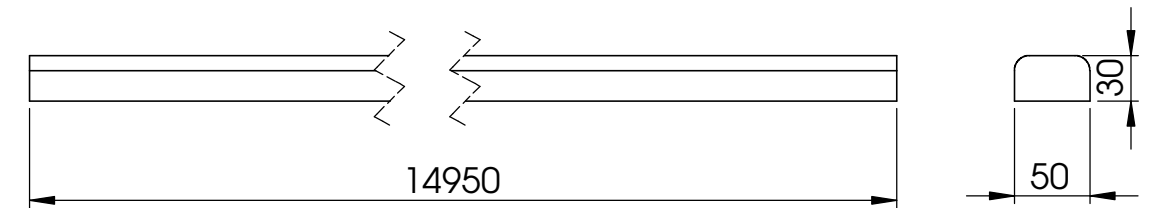
Kommentar:



Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
09.05.12	Fredrik Hauge			
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Tegning Søylebjelke, Søylefotplate, Søyletopplate og Søyleflensplate		S355J2+N		
Vedlegg F.7				Tegning nr. 7

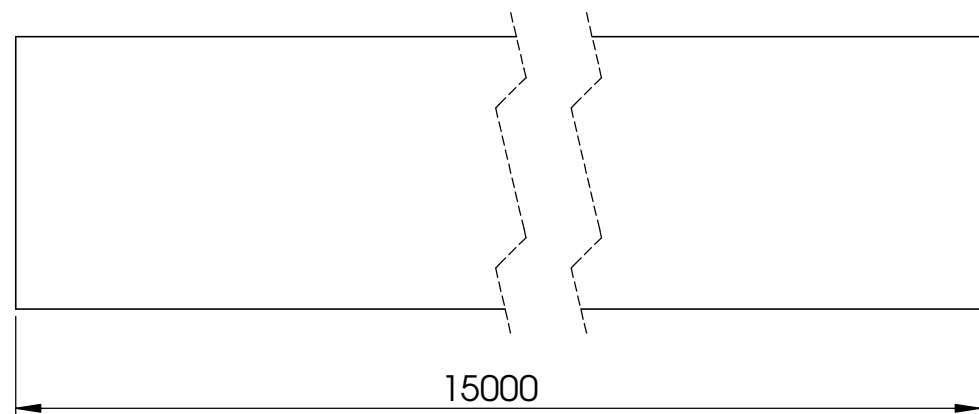
Kranbaneskinne (Flate kranskinner)

Målestokk 1:5
Material S355J0



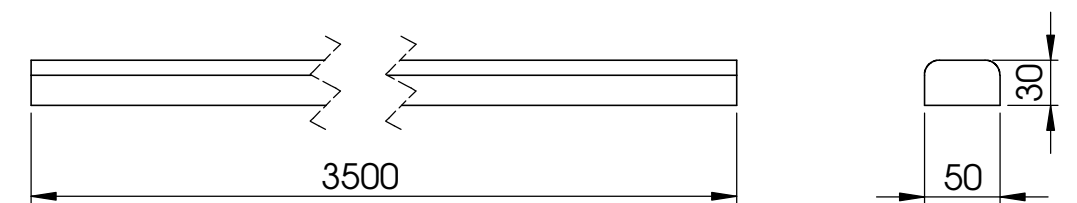
Kranbanebjelke (UPE360)

Målestokk 1:10
Material S355J2+N



Kranbruskinne (Flate kranskinner)

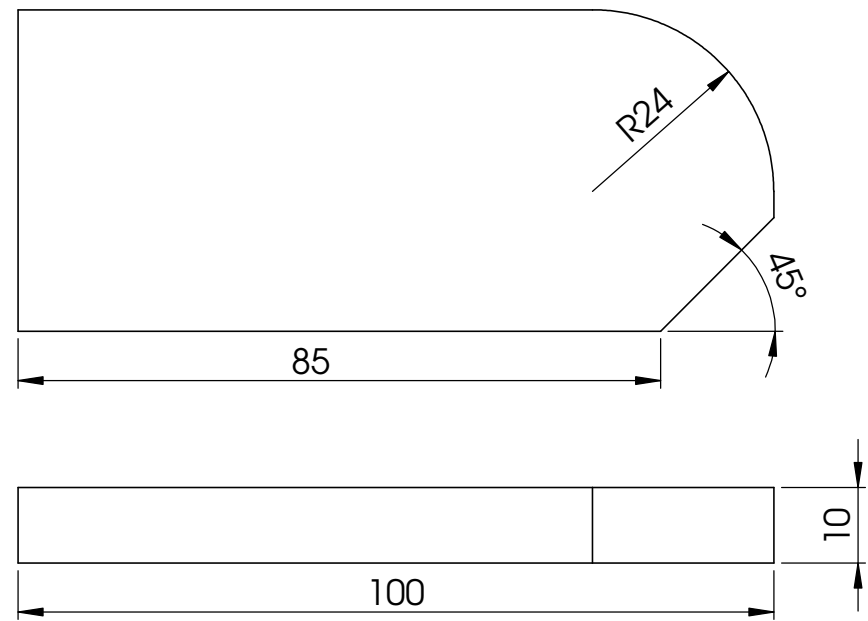
Målestokk 1:5
Material S355J0



Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
09.05.12	Fredrik Hauge			
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Tegning Kranbanebjelke, kranbaneskinne og Kranbruskinne				
Vedlegg F.8				Tegning nr. 8

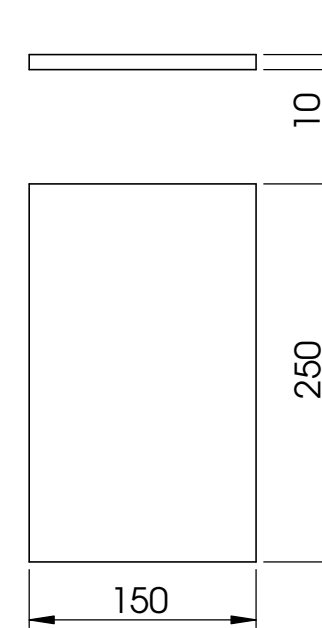
Endestiver

Målestokk 1:1



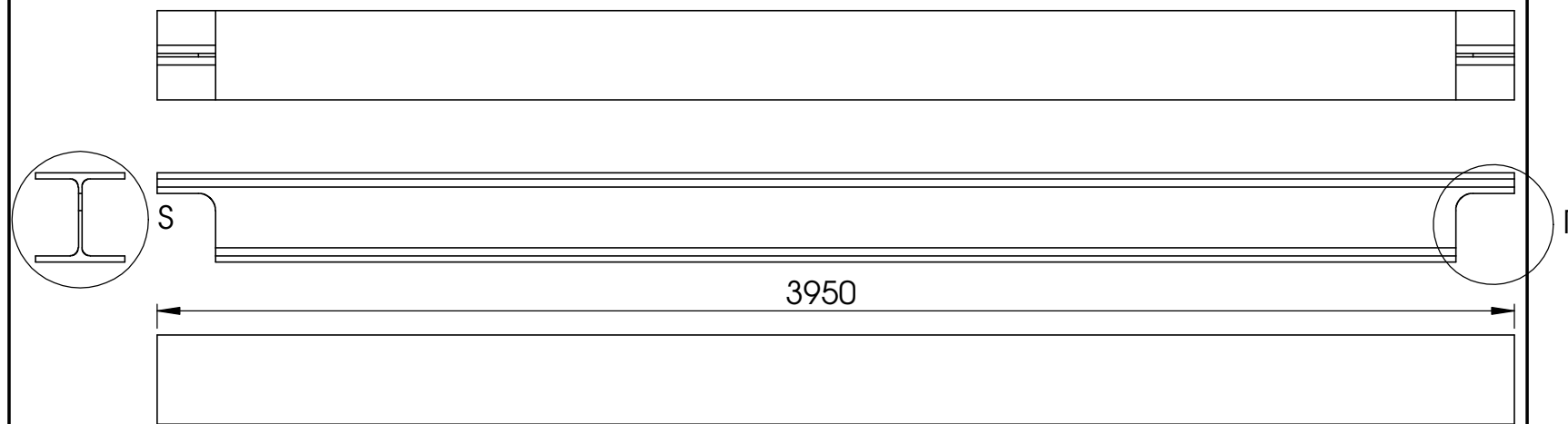
Avstiverplate

Målestokk 1:5



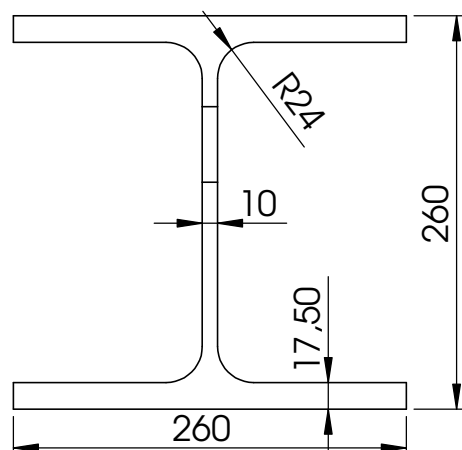
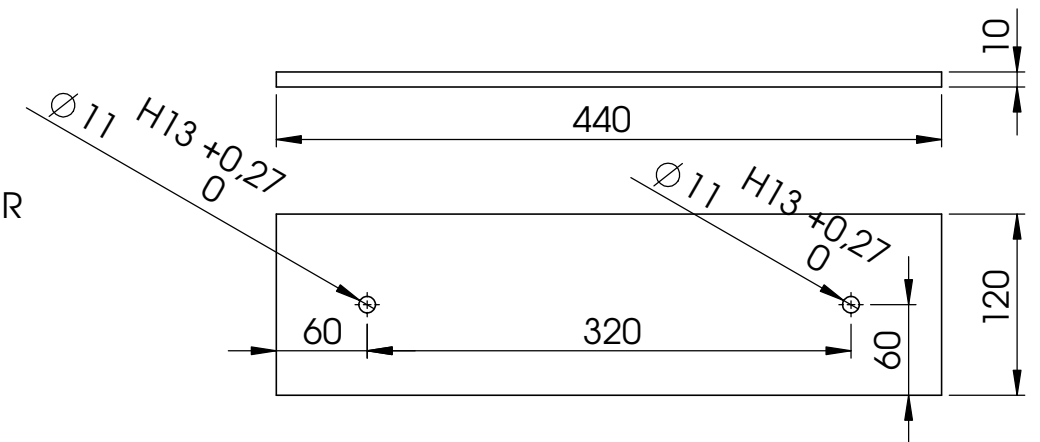
Kranbrudrager (HE260B)

Målestokk 1:20

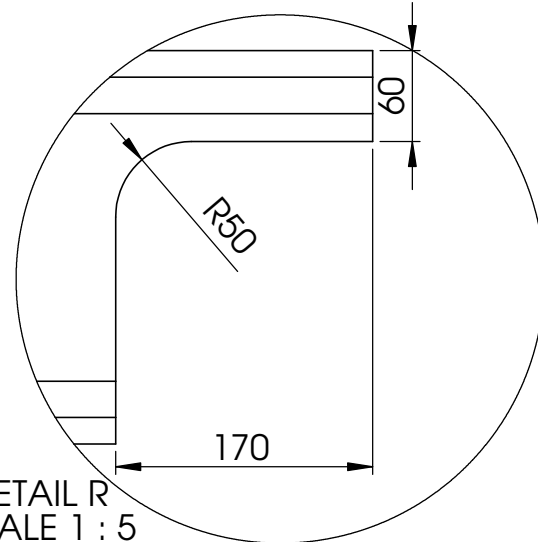


Endeplate

Målestokk 1:5

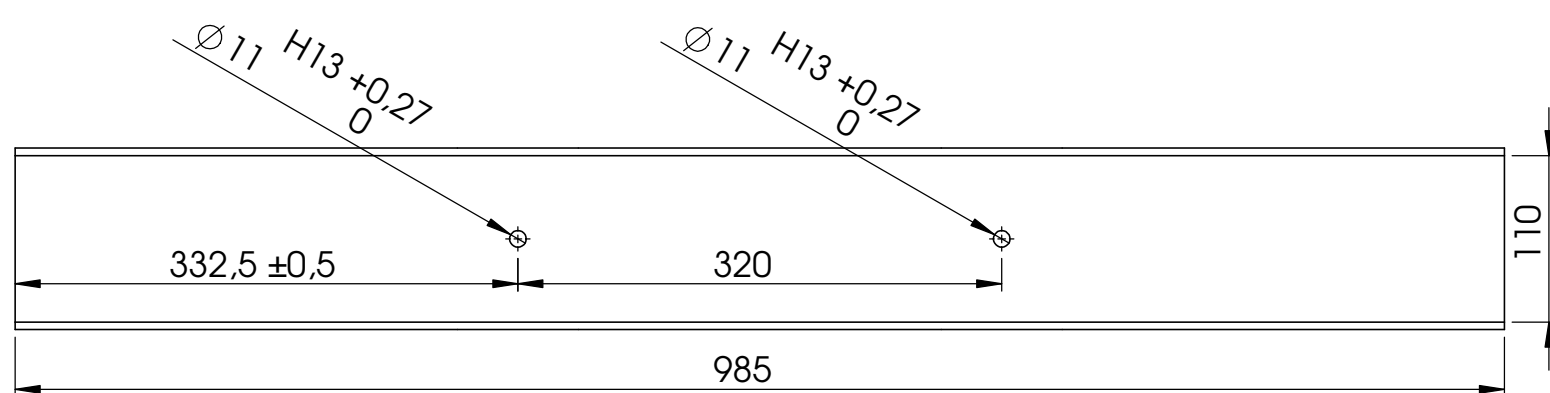
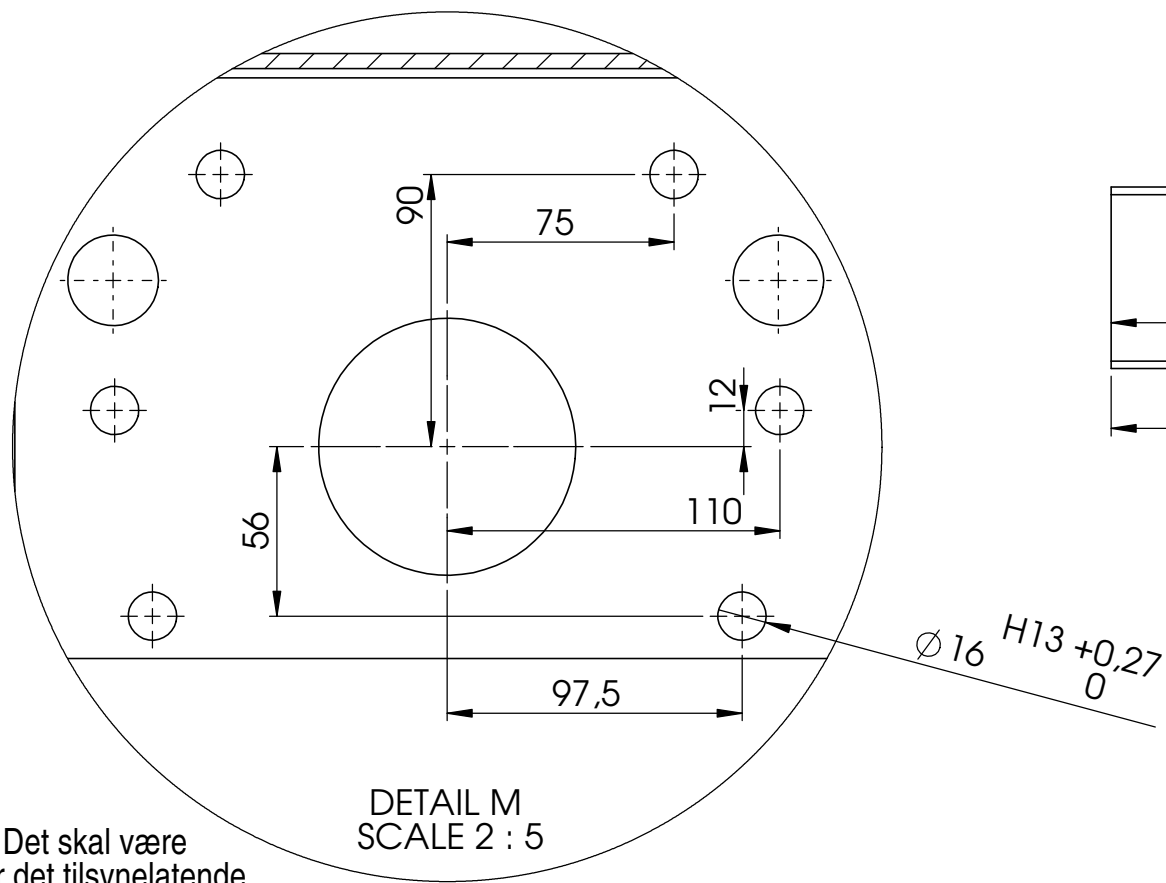
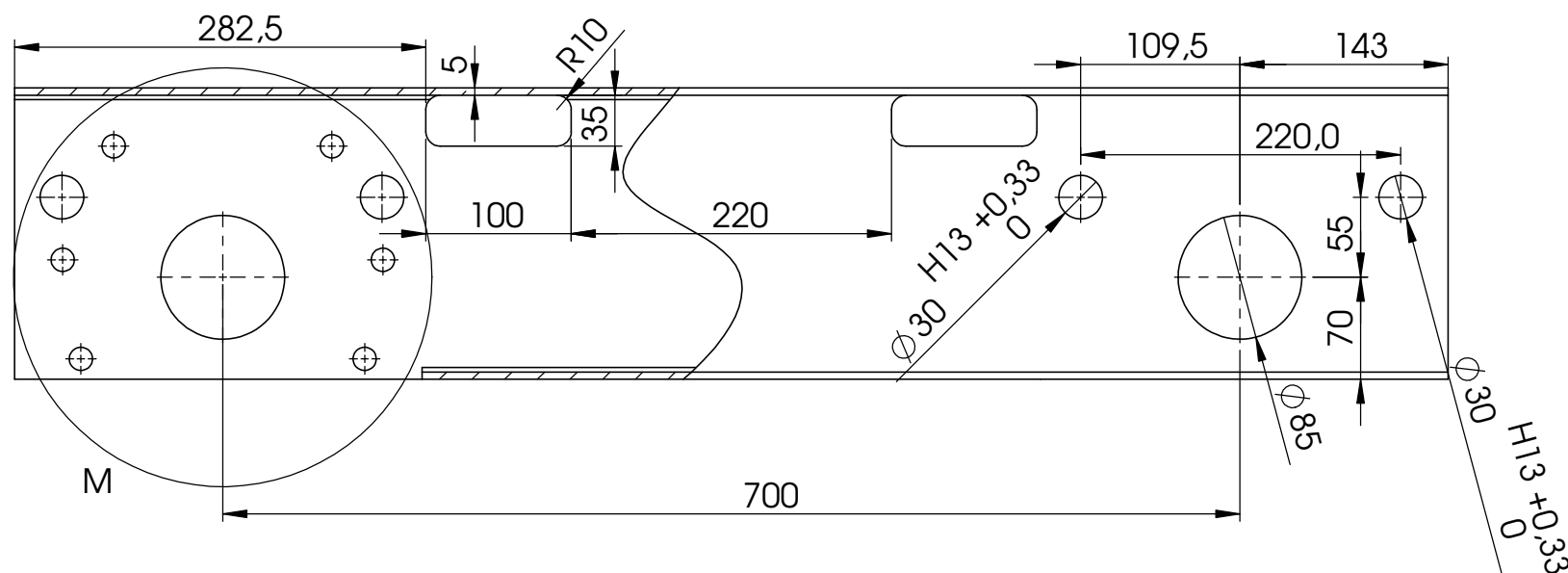
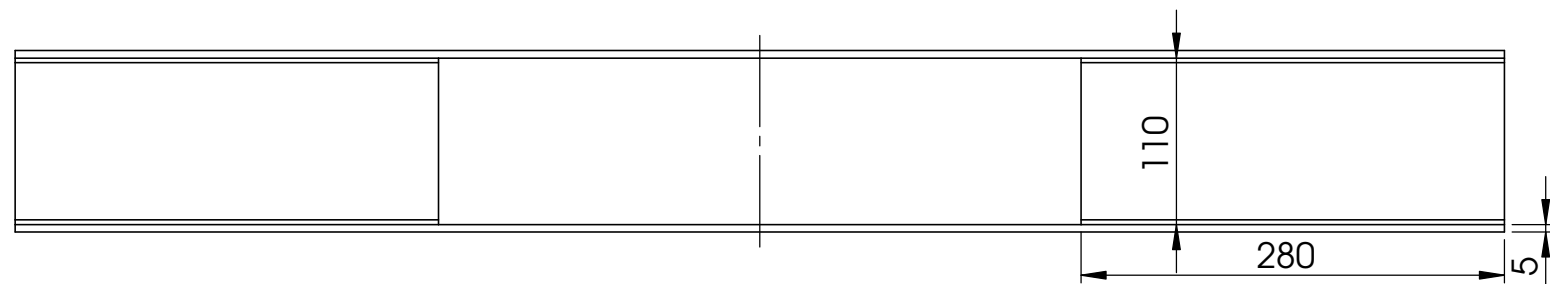
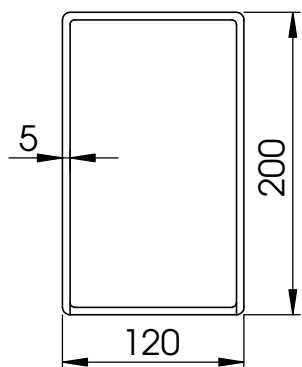
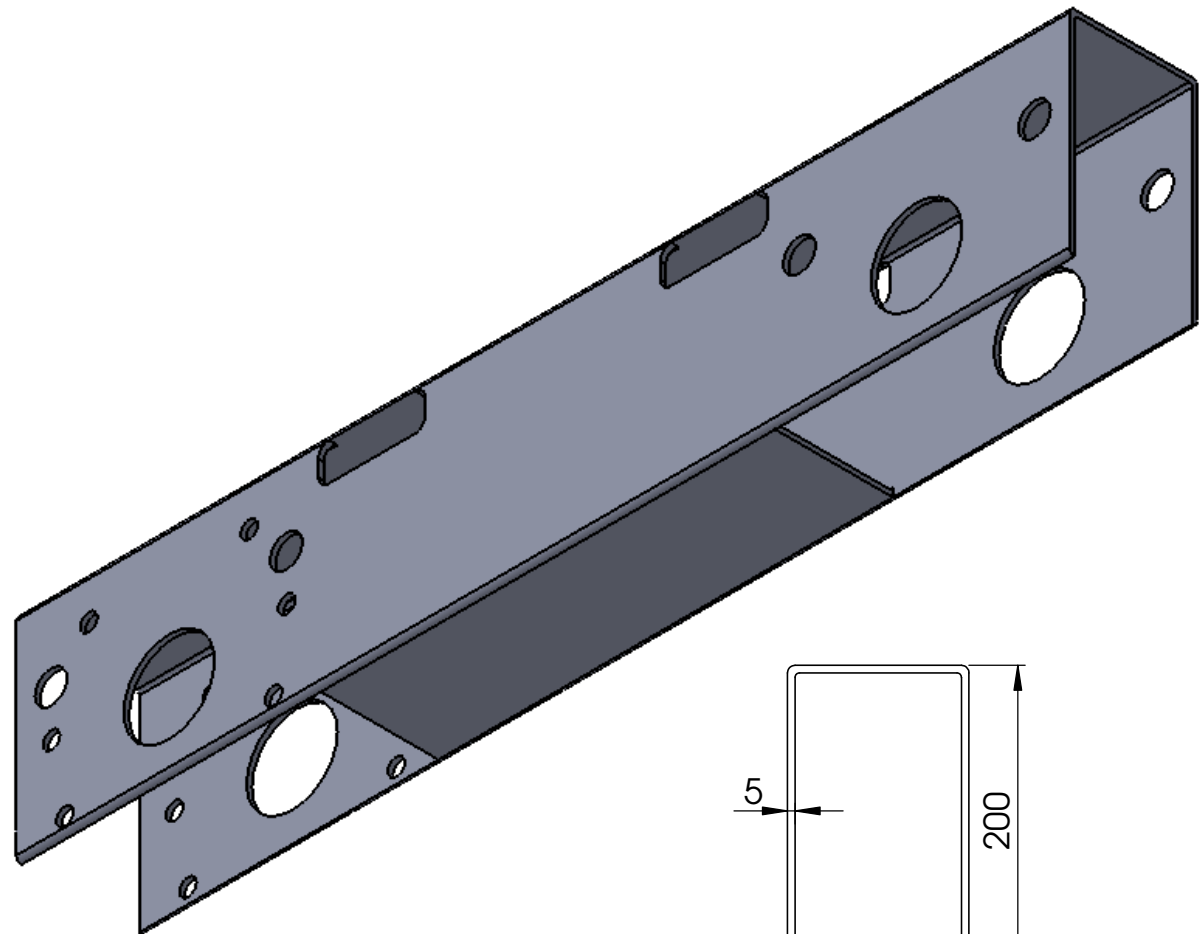


DETAIL S
SCALE 1 : 5



DETAIL R
SCALE 1 : 5

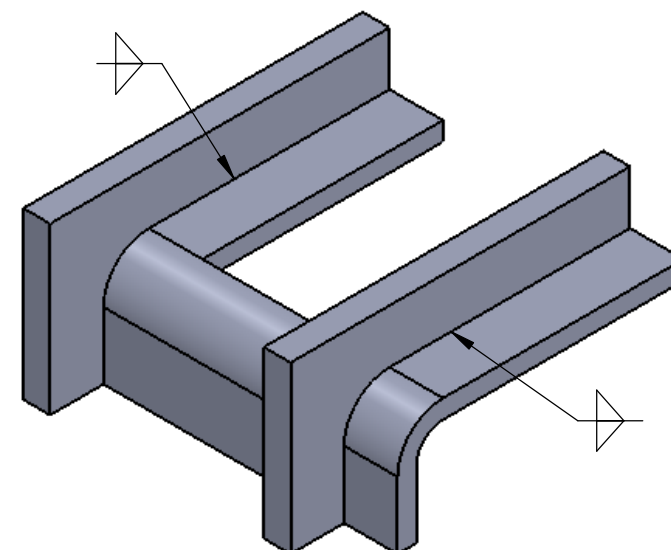
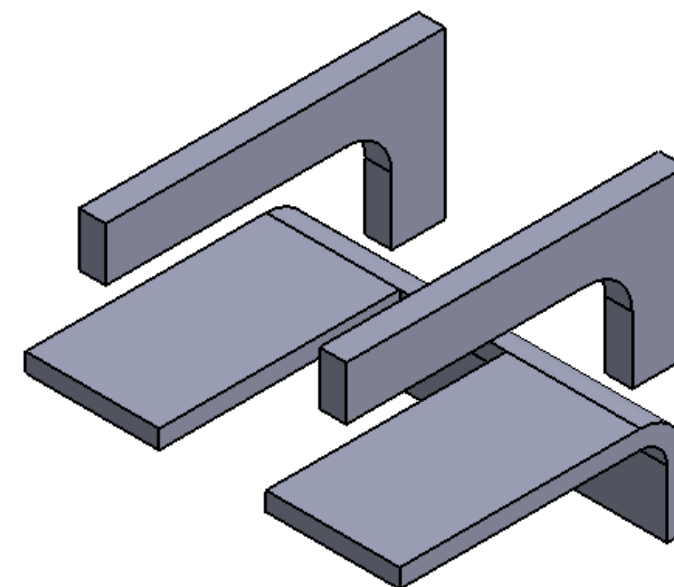
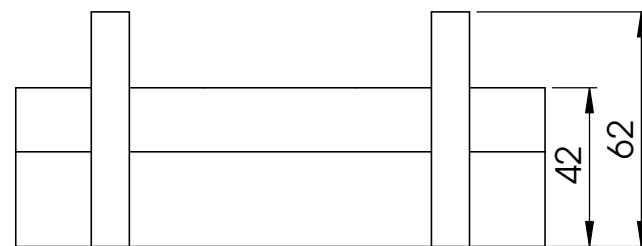
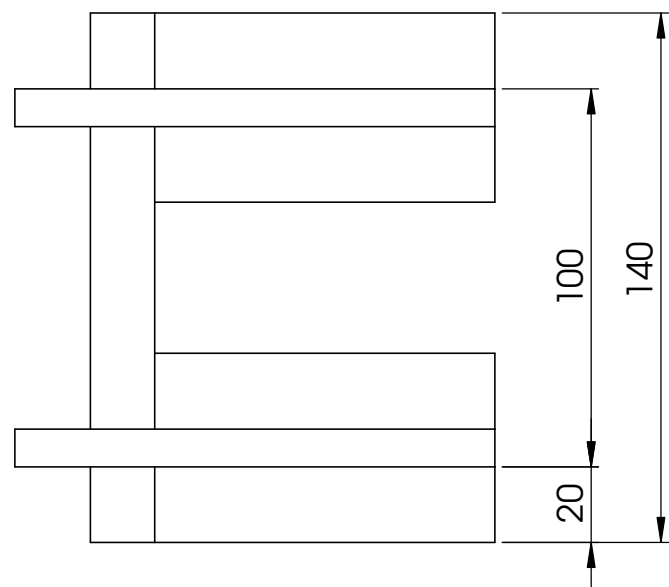
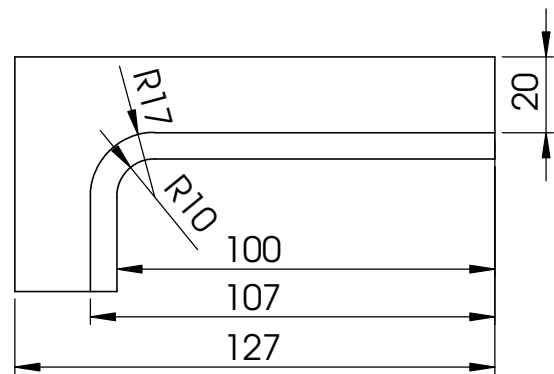
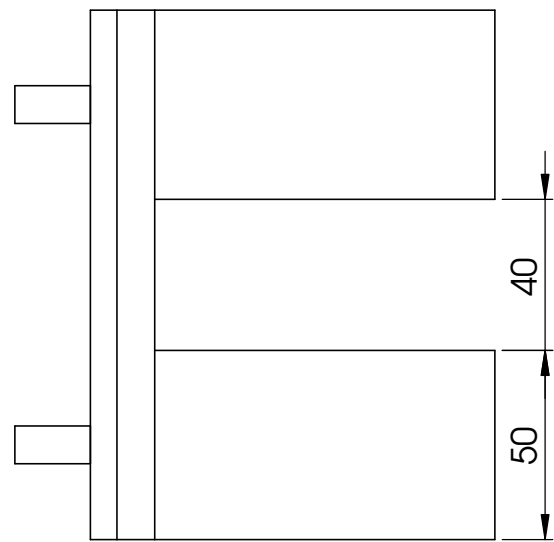
Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
09.05.12	Fredrik Hauge			
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Tegning Kranbrudrager, Endeplate, Endestiver og Avstiverplate		S355J2+N		
Vedlegg F.9				Tegning nr. 9



Kommentar: Det skal være symmetri der det tilsynelatende er det på tegningen.

DETAIL M
SCALE 2 : 5

Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
09.05.12	Fredrik Hauge		1:5	
Tittel:		Materiale:		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Tegning Bruvognbjelke		S355J2+N		
Vedlegg F.10				Tegning nr. 10



Dato:	Konstruktør:	Godkjent:	Målestokk:	UMB/IMT
09.05.12	Fredrik Hauge		1:5	
Tittel: Tegning Opplagerplate		Materiale: S355J2+N		Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt på tegningen
Vedlegg F.11				Tegning nr. 11