

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Forord

Denne mastergradsoppgaven omhandler bruk av standardsystemet Eurokode til beregning av elementer i en løpekran. Rapporten er avsluttende mastergradsoppgave innenfor ingeniørstudiet Maskin, prosess og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved Universitet for miljø- og biovitenskap.

Rapporten omfatter beskrivelse av teori fra de nødvendige delene i Eurokode og beregningseksempel av en løpekran som viser bruken av standardene.

Min motivasjon for denne oppgaven er å utvide min kunnskap når det kommer til bruk av Eurokode standardene. Det har også vært veldig motiverende å vite at det jeg har samlet av informasjon og presenterer i denne oppgaven kan være nyttig for andre som skal skrive oppgaver eller dimensjonere etter Eurokode senere.

Ettersom Eurokode nå har tatt over som den gyldige standarden for beregning av on-shore konstruksjoner i Norge, ser jeg det som en stor fordel å kjenne til standardsystemet og få erfaring med å gjøre dimensjonering etter Eurokode.

I tidligere oppgaver i mine studier har det ofte vært fokus på produktutvikling eller konseptutvikling, jeg ønsket derfor en oppgave som hadde en større teoretisk tyngde og som kunne heve min kompetanse innenfor beregninger. Det har vært en stor og krevende oppgave å finne frem til og gjøre seg kjent med de nødvendige delene av standardene.

Jeg vil gjerne takke veileder førsteamanuensis Geir Terjesen for konstruktive tilbakemeldinger og hjelp, medstudent Odd-Erik Zimmer for gode faglige diskusjoner. Til slutt vil jeg takke min kjæreste, Pernille for støtte, oppmuntring og gode tilbakemeldinger.

Joakim Blicher Larsen

Ås, 17. desember 2012

Sammendrag

Målsettingen i denne mastergradsoppgaven er å finne de nødvendige delene av Eurokode og gjøre beregninger på de største elementene av en løpekran.

I beregningene fokuseres det på hovedelementene av løpekranen som kranbru, bruvogn og kranbane. Det gjøres beregninger av bruddgrensetilstander som tverrsnittkapasitet og vipping som kan brukes for å bestemme nødvendig størrelse på bjelker og profiler. For å holde arbeidsmengden innenfor den gitte tid er det ikke gjort beregninger på utmatting eller sammenkobling mellom kranbru og kranbane. Løpekatten har fått en antatt størrelse og egenvekt.

Denne oppgaven er en litteraturstudie av Eurokode standardene og litteratur som omhandler bruken av Eurokode for å utvide kompetansen innen dimensjonering av løpekraner etter Eurokode.

Deler av Eurokode som er nødvendige for dimensjonering av en løpekran er som følger: «Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner», «Eurokode 1 – Del 3: Laster fra kraner og maskiner», «Eurokode 3 – Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger», «Eurokode 3 – Del 1-9: Utmattingspåkjente konstruksjoner», «Eurokode 3 – Del 6: Kranbaner». I tillegg bør det brukes «Eurokode 3 – Del 1-5: Plater påkjent i plateplanet» dersom man bruker bjelker som er satt sammen av plater. «Eurokode 9 – Del 1-1: Allmenne regler» som beskriver bruddgrensetilstanden vipping bedre enn standarden for stål, Eurokode 3.

Støttelitteraturen som har blitt brukt er hovedsakelig Per Kr. Larsens «Dimensjonering av Stålkonstruksjoner», «Design of Plated Structures» fra ECCS Eurocode Design Manuals og «Design example for the application of Eurocode 1 – Part 3: Actions induced by cranes and machinery and Eurocode 3 – Part 6: Crane supporting structures».

Boken til Larsen gir en god generell innføring i Eurokode for stålkonstruksjoner. «Design of Plated Structures» tar for seg dimensjonering av profiler satt sammen av plater, som i seg selv ikke er relevant for denne oppgaven hvor det brukes valsede profiler, men boka har et godt eksempel på dimensjonering av kranbane som har vært veldig nyttig. «Design example for the application of...» inneholder et dimensjoneringseksempel til en kranbane, men er lite utdypende og forklarende.

Beregningene er for det meste gjort for hånd, men torsjon, som blir for komplisert til å gjøre med håndberegninger, er gjort i ANSYS. Modellen brukt i ANSYS er en bjelke med to påførte torsjonsmomenter og analysen er gjort for å finne det største torsjonsmomentet i bjelken.

Innføring i Eurokode kan være en tidkrevende prosess og det er nødvendig med god støttelitteratur. Det er et sammensatt standardverk med mange regler, faktorer og metoder å ta hensyn til. Ettersom standardverket begynner å ta over for eksisterende standarder vil det sannsynligvis komme flere bøker, avhandlinger, artikler etc. som kommer til å gjøre det lettere å jobbe med Eurokode.



Abstract

The objective of this master's thesis is to find the necessary parts of Eurocode and do calculations on the main elements of an overhead travelling crane.

The calculations mainly focuses on the main elements of the overhead travelling crane like the crane bridge, the crane trolley and the crane runway beam. The calculations are done for Ultimate Limit State for the cross sections resistance to applied forces and lateral torsional buckling, which can be used to determine the sizes of the beams and cross sections. To keep the amount of work within the given timespan, there have not been done any calculations for fatigue or the connection between the crane bridge and the crane trolley. The crab has been given an estimated size and weight.

This thesis is a literature study of the Eurocode standards and literature that describes the use of Eurocode, to expand the knowledge of designing overhead traveling crane with the use of Eurocode.

The necessary parts of Eurocode for design of an overhead traveling crane are as follows; “Eurocode: Basis of structural design”, “Eurocode 1 – Part 3: Actions induced by cranes and machinery”, “Eurocode 3 – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, “Eurocode 3 – Part 1-9: Fatigue”, “Eurocode 3 – Part 6: Crane supporting structures”. In addition “Eurocode 3 – Part 1-5: Plated structural elements” is useful when using beams that are plates welded together and “Eurocode 9 – Part 1-1: General structural rules” describes the ultimate limit state lateral buckling better than the standard for steel, Eurocode 3.

The supplementary literature used is mainly Per Kr. Larsen's “Dimensjonering av Stålkonstruksjoner”, “Design of Plated Structures” from ECCS Eurocode Design Manuals and “Design example for the application of Eurocode 1 – Part 3: Actions induced by cranes and machinery and Eurocode 3 – Part 6: Crane supporting structures”.

Larsen's book is a good general introduction to Eurocode for steel structures. “Design of Plated Structures” addresses the design of structures composed of plates, which in itself is not relevant for this thesis where rolled profiles has been used, but the book has a good example for the design of a crane runway which has been very useful. “Design example for the application of...” contains a design example of a crane runway, but it is not explanatory.

The calculations are mostly done by hand, but the torsion that is too complex to do by hand calculations, is done in ANSYS. The model used in ANSYS is a beam with two applied torques and the analysis is done to find the greatest torque output of the beam.

Introduction to Eurocode can be a time consuming process and it is necessary to have good supplementary literature. It is a complex standard with many rules, factors and methods to consider. Since the standard is beginning to take over for existing standards is it likely that there will come more books, papers, articles, etc. that will make it easier to work with Eurocode.



INNHALDSFORTEGNELSE

	Side
1 INNLEDNING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	3
1.3 Målsetting og begrensninger	3
1.4 Begrensninger	3
1.5 Kvalitetssikring (rapport og produkt)	4
1.6 Arbeidsmetode og verktøy	4
1.7 Symboler og terminologi	5
2 BESKRIVELSER	9
2.1 Eurokode	9
2.1.1 Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner	9
2.1.2 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner	9
2.1.3 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner	9
2.1.4 Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner	11
2.2 Løpekran	11
2.2.1 Løpekatt	13
2.2.2 Kranbrua	13
2.2.3 Bruvogn	13
2.2.4 Kranbane	13
2.3 Utforming	13
2.4 Gjennomføring av beregninger	14
3 TEORI	16
3.1 Grensetilstander	16
3.2 Dynamiske faktorer	16
3.3 Tverrsnittklassifisering	21
3.4 Vertikale laster	24
3.5 Horisontale laster	26



3.5.1	Kjørekrefter	27
3.5.2	Langsgående krefter	28
3.5.3	Tverrgående krefter	28
3.6	Horisontale krefter på grunn av vridning	30
3.7	Interne krefter og momenter	34
3.8	Brukgrensetilstand	42
3.9	Bruddgrensetilstanden	45
3.9.1	Tverrsnittkapasitet	45
3.9.2	Kontroll mot vipping	47
4	BEREGNINGSEKSEMPEL	51
4.1	Kranbrua	51
4.1.1	Dynamiske faktorer	52
4.1.2	Dimensjoner og klassifisering av tverrsnitt	53
4.1.3	Vertikale laster	56
4.1.4	Horisontale laster	58
4.1.5	Interne krefter og momenter	59
4.1.6	Brukgrensetilstand	64
4.1.7	Bruddgrensetilstander	64
4.2	Bruvogn	70
4.2.1	Dimensjonering og klassifisering av tverrsnitt	70
4.2.2	Vertikale krefter	72
4.2.3	Brukgrensetilstand	74
4.2.4	Bruddgrensetilstander	74
4.3	Kranbane	77
4.3.1	Dynamiske faktorer	77
4.3.2	Dimensjoner og klassifisering av tverrsnitt	78
4.3.3	Vertikale laster	81
4.3.4	Horisontale laster	87
4.3.5	Horisontale krefter på grunn av vridning av kranen	89
4.3.6	Interne krefter og momenter	91
4.3.7	Brukgrensetilstand	96



4.3.8	Bruddgrensetilstander	97
5	DISKUSJON.....	104
6	KONKLUSJON	105
6.1	Videre arbeid	105
7	REFERANSER	106
8	VEDLEGG.....	107

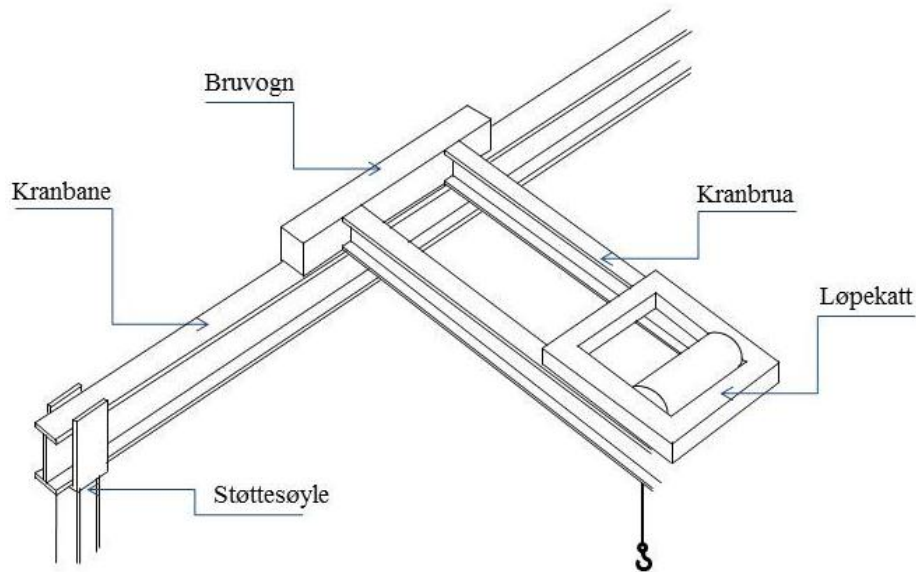
1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

I mars 2010 ble Eurokode innført som den gjeldende standarden i Norge når det kommer til dimensjonering av onshore konstruksjoner. Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Universitet for miljø og biovitenskap (UMB) ønsker å utvide sin kunnskap om standardsystemet Eurokode og for linjeretningen Maskin, prosess og produktutvikling er det særlig interessant å utvide kompetansen innen Eurokode 3 som omhandler prosjektering av stålkonstruksjoner.

Denne mastergradsoppgaven omhandler bruken av Eurokode til beregning av løpekraner, både beskrivelse av nødvendig teori og et beregningseksempel. Gjennom oppgaven vil det bli vist til de nødvendige delene av standardene og eventuell nødvendig støttelitteratur da standardene i seg selv ikke i stor grad beskriver bruken.

Løpekran (figur 1.1) (også traverskran, overhead travelling crane på engelsk) er et mekanisk løfteutstyr hvor last kan flyttes horisontalt og vertikalt. En løpekran består av tre hoveddeler, løpekatt som inneholder heisemaskineriet, kranbru hvor løpekatten beveger seg frem og tilbake og kranbane hvor kranbrua kan bevege seg frem og tilbake. Kranbanen bæres av søyler, festet til byggets vegg eller er opphengt i takkonstruksjonen til bygget. Løpekraner kan ha høy løftekapasitet, flytter utstyr og materiale effektivt og bruker liten gulvplass.



Figur 1.1 Utsnitt av en løpekran. Figuren viser en løpekran sett ovenfra med de viktigste elementene navngitt. Løpekatten kjører på toppflensen til kranbrua og bruvogna kjører på toppflensen til kranbanen.

Som en del av det europeiske samarbeidet mellom de nasjonale standardiseringsorganisasjonene har Den europeiske standardiseringsorganisasjonen (CEN), satt sammen en felles standard navngitt Eurokode. Eurokode er et sett av dimensjoneringsregler og skal sikre en lik kvalitet innen prosjektering av konstruksjoner i alle medlemslandene i CEN. «Målet med programmet var å fjerne handelshindringer og å harmonisere tekniske spesifikasjoner» (Standard Norge 2008c).

Eurokode er bygget opp av ni standarder som igjen kan bestå av flere underdeler. Eurokode 0, (NS-EN 1990) går gjennom grunnlaget for beregninger av konstruksjoner, mens de ni andre har et mer spesifikt område som dekkes. Standardverket Eurokode er satt sammen som følger, med titlene på hver del:

- NS-EN 1990 Eurokode: Grunnlag for beregninger av konstruksjoner
- NS-EN 1991 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner
- NS-EN 1992 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner
- NS-EN 1993 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner
- NS-EN 1994 Eurokode 4: Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong
- NS-EN 1995 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner
- NS-EN 1996 Eurokode 6: Prosjektering av murkonstruksjoner



NS-EN 1997 Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering

NS-EN 1998 Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismiske påvirkninger

NS-EN 1999 Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner

For å tilpasses nasjonale krav og behov har Eurokode flere parametere og faktorer som hvert enkelt medlemsland selv kan bestemme størrelsen eller verdien til. Disse nasjonale tilleggene kalles NA og kommer som et tillegg til standarden. Når standarden er ment for dimensjonering i Norge vises dette med NS foran det generelle navnet på standarden. NA kommer som et eget kapittel i slutten av de norske standardene, men Eurokode oppgir en anbefalt verdi eller fremgangsmåte som de nasjonale standardiseringsorganisasjonene kan velge å beholde, eller oppgi en egen verdi i NA som er tilpasset de nasjonale krav eller behov.

1.2 Problemstilling

Følgende problemstillinger er satt for denne mastergradsoppgaven:

Hvilke deler av Eurokode er nødvendige for dimensjonering av løpekraner?

Hvordan dimensjoneres en løpekran etter Eurokode?

Gjennom dette mastergradsarbeidet skal de nødvendige delene av Eurokode til beregning av løpekraner samles og beskrives. Teorien fra Eurokode skal beskrives og bruken blir forklart med et eksempel på beregning av en løpekran.

1.3 Målsetting og begrensninger

Følgende hovedmålsetting er definert for masterarbeidet:

Beregne løpekran etter Eurokode

For å nå denne målsetningen er følgende delmål satt opp:

Samle nødvendige deler av Eurokode

Beskrive teorien i Eurokode på en forståelig måte

Sette opp et beregningseksempel

1.4 Begrensninger

- I denne oppgaven beregnes det kun på hovedelementene i en løpekran
- Sammenkobling av kranbru til bruvogn neglisjeres
- Det gjøres ikke beregninger av utmatting og levetid

- Det gjøres enkle tilnæringer til materialvalg
- Kranen i eksempelet antas og kun brukes innendørs. Det sees derfor bort fra klimatiske laster som vind og snø
- Det gjøres ikke beregninger av søyler eller annen konstruksjon for bæringen av kranbanen
- I bruksgrensetilstanden er gjøres det kun beregninger på nedbøyning

Begrensningene som gjøres i denne oppgaven gjøres for å ta hensyn til tidsbruken. Det blir dermed gjennomgått de viktigste elementene av dimensjonering av en løpekran etter Eurokode.

1.5 Kvalitetssikring

Alle beregninger er gjort i henhold til Eurokode, med de faktorer og metoder som oppgis. Følgende deler av Eurokode er brukt:

NS-EN 1990	Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
NS-EN 1991-3	Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 3: Laster fra kraner og maskineri
NS-EN 1993-1-1	Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger
NS-EN 1993-1-5	Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-5: Plater påkjent i plateplanet
NS-EN 1993-6	Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 6: Kranbaner
NS-EN 1999-1-1	Eurokoden 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler

Dimensjoner, størrelser og verdier til de brukte profilene er hentet fra Stål Håndbok Del 1: 2008 (Myhre 2008)

1.6 Arbeidsmetode og verktøy

Bilde og tekstbehandling

Alle illustrasjoner er laget i MS PowerPoint 2010

Tekstbehandlingen er gjort i MS Word 2010

Enkle modelleringer for å finne torsjon er gjort i ANSYS 14.0

1.7 Symboler og terminologi

Følgende symboler er brukt i denne rapporten.

Størrelser og benevninger på tverrsnitt		
t	Tykkelse	mm
h	Høyde	mm
b	Bredde	mm
t_w	Stegtykkelse	mm
t_f	Flenstykkelse	mm
h_w	Steghøyde mellom flensene	mm
r	Overgangsradius	mm
h_r	Høyde på skinn	mm
$h_{r,wear}$	Høyde på skinne med hensyn på slitasje	mm
b_{fr}	Bredde på skinnfot	mm
t_r	Tykkelse på skinnehodet	mm
b_r	Bredde på skinnehodet	mm
A	Tverrsnittareal	mm^2
A_v	Skjærareal	mm^2
l	Lengde/spennvidde	$mm (m)$
I	Annet arealmoment	mm^4
I_w	Hvelvingsmotstand	mm^6
E	Elastisitetsmodul	N/mm^2
G	Skjærmodul	N/mm^2
W	Tverrsnittmodul	mm^3
f_y	Flytegrense	N/mm^2
Laster og krefter		
$H_{B,1}$	Bufferkraft for kran	kN
$H_{B,2}$	Bufferkraft for løpekatt	kN



$H_{L,i}$	Langsgående horisontal kraft	kN
$H_{T,i}$	Tverrgående horisontal kraft	kN
$H_{S,i}$	Horisontale krefter pga. vridning	kN
Q_c	Egenvekt til kran	kN
$Q_{c,1}$	Egenvekt til kran uten løpekatt	kN
$Q_{c,2}$	Egenvekt til løpekatt	kN
Q_h	Heiselas	kN
Q_r	Hjullast	kN
K	Kjørekraft	kN
S	Styrekaft	kN
M	Moment	kNm
M_{cr}	Kritisk moment for vipping	kNm
μ_{cr}	Dimensjonsløst kritisk moment for vipping	
V	Skjærkraft	kN
τ	Skjærspenning	N/mm^2
g_k	Summen av vekt per lengde til bjelke og skinne	kN
g_{bjelke}	Vekt per lengde for bjelke	kg
g_{skinne}	Vekt per lengde for skinne	kg
Faktorer og parametere		
φ_i	Dynamisk faktor	
β_i	Faktor til bestemmelse av dynamisk faktor	
$\varphi_{2,min}$	Faktor til bestemmelse av dynamisk faktor	
λ_G	Partiellfaktor for permanente krefter	
λ_Q	Partiellfaktor for variable laster	
$\gamma_{M0}, \gamma_{M1}, \gamma_{M2}$	Materialfaktor for bruddformer	
ξ_b	Bufferkarakter	
ε	Faktor til bruk i tverrsnittklassifisering	
μ	Friksjonsfaktor	
ξ_i	Faktor til bruk av beregning av horisontal krefter	
λ_S	Kraftfaktor	
f	«ikke positiv» faktor til beregning av vridningskrefter	

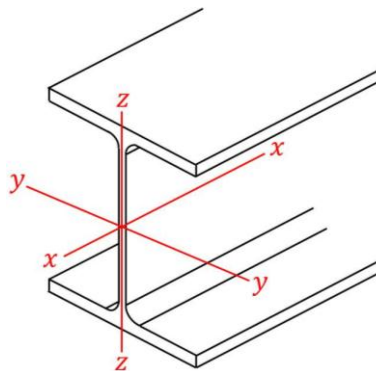


η	Faktor	
k_{wt}	Torsjonsparameter	
ζ_g	Lastangrepspunktets koordinat	
k_w, k_z, k_y	Parametere for vipping	
C_1, C_2, C_3	Faktorer for vipping	
χ_{LT}	Reduksjonsfaktor for vipping	
Φ_{LT}	Funksjon for å bestemme reduksjonsfaktoren	
β	Knekklendefaktor	
$\bar{\lambda}_{LT}$	Relativ slankhet for vipping	
α_{LT}	Formfeilfaktor	
Andre størrelser, verdier og symboler		
α	Forhold mellom nøytralakse og stegets høyde mellom flensene	
$z_{s,pl}$	Høyde opp til plastisk nøytralakse	<i>mm</i>
z_g	Koordinat til tyngdepunkt	<i>mm</i>
l_s	Avstand mellom rotasjonssentrum og senter	<i>m</i>
e_j	Avstand mellom hjulpar og styremekanisme	<i>m</i>
x_i	Avstand mellom opplagring og hjul	<i>m</i>
c	Avstand mellom hjul på kran og løpekatt	<i>m</i>
e_y	Avstand ved u sentrisk belastning, til beregning av torsjon	<i>m</i>
e_z	Avstand mellom angrepspunkt for horisontallast og nøytralakse på bjelken	<i>m</i>
m_w	Antall enkelthjul med drift	
n_r	Antall kranbaneskiner	
m	Antall par av hjulpar	
n	Antall hjulpar	
δ	Nedbøyning	<i>mm</i>
π	Matematisk konstant	

Subskripter

Ed	Dimensjonerende lastvirkning, E viser at det er beregnet størrelse og d viser at det er tatt hensyn til lastfaktor
Rd	Dimensjonerende kapasitet, R viser kapasitet og d viser dimensjonerende verdi
pl	Viser at det er beregnet plastisk
Q	Variable krefter
G	Permanente krefter
500	HE 500 B
400	HE 400 B

Aksekoret i Eurokode kan være et annet en hva noen er vant til og for å unngå usikkerheter viser figur 1.2 Eurokodes variant.



Figur 1.2 Aksekors fra Eurokode vist på et h-profil. Eurokode opererer med aksekoret som vises i figuren. x -aksen er i bjelkens lengderetning, y -aksen er i horisontal retning på tverrsnittet og z -aksen er vertikal retning på tverrsnittet.

Eurokodes systemakse (figur 1.2) er som følgende:

y - y	horisontal tverrsnittakse
z - z	vertikal tverrsnittakse
x - x	lengdeakse

Forkortning av tittel på litteratur:

Tittelen «*Design example for the application of Eurocode 1 – Part 3: Actions induced by cranes and machinery and Eurocode 3 – Part 6: Crane supporting structures*» (Sedlacek et al. 2003) forkortes til «***Design example for the application of...***» som brukes videre i denne oppgaven.

2 BESKRIVELSER

2.1 Eurokode

2.1.1 Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner

Denne standarden omfatter det generelle grunnlaget for prosjektering og er grunnpilaren for alle delene av Eurokode. Her blir deler, effekter, påvirkninger og dimensjonering av konstruksjoner definert.

«NS-EN 1990 fastsetter prinsipper og krav for konstruksjoners sikkerhet, brukbarhet og bestandighet, beskriver grunnlaget for prosjektering og verifikasjon av konstruksjoner, og gir retningslinjer for relaterte forhold når det gjelder konstruksjonens pålitelighet» (Standard Norge 2008c).

2.1.2 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner

I denne delen av Eurokode blir det sett på laster på konstruksjoner fra for eksempel trafikk, kraner og maskiner, klimatiske som vind og snø, ulykkelaster og så videre. Det gis faktorer som tar hensyn til påvirkningene lastene har på konstruksjonene.

Del 3: Laster fra kraner og maskineri

I prosjektering av kraner er denne standarden en viktig del av Eurokode. Når løpekatt og kranbru kjøres, lasten overføres til eller fra kranen og ved heising vil det oppstå en påvirkning i tillegg til de statiske kreftene. For å ta med disse påvirkningene brukes det dynamiske faktorer som multipliseres inn med både variable laster og laster fra egenvekter.

«Del 3 av EN 1991 spesifiserer de pålagte lastene (modellerte og representative verdier) assosiert med kraner på kranbanebjelker og stasjonære maskiner som omhandler, når det er relevant, dynamiske effekter og nedbremsing, akselerasjon og ulykkekrefter (accidental forces)» (Standard Norge 2010a)

2.1.3 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner

Eurokode 3 omhandler prosjektering av konstruksjoner i stål hvor delene 2 til 6 omfatter spesifikke konstruksjonstyper og delene 1-1 til 1-12 omfatter generelle regler og elementer og av konstruksjoner i stål.

Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger

I denne standarden blir det gjennomgått generelle regler og beregninger for stålkonstruksjoner. Materialelegenskaper, bestandighet, konstruksjonsanalyse, brudd- og bruksgrensetilstandene til stålkonstruksjoner er innlemmet i denne delen.

«NS-EN 1993-1-1 gir grunnleggende prosjekteringsregler for stålkonstruksjoner med materialtykkelse ≥ 0 . Den gir supplerende beregningsregler for stål konstruksjoner i bygninger» (Standard Norge 2008a)

Del 1-5: Plater påkjent i plateplanet

Til konstruksjonselementer som består av plater brukes denne delen av Eurokode 3. Denne standarden brukes hvor et tverrsnitt er satt sammen av plater, som for eksempel et H-profil hvor flensene er sveiste på steget.

«NS-EN 1993-1-5 gir konstruksjonskrav for avstivede og ikke-avstivede plater som er utsatt for påkjenning i planet» (Standard Norge 2008b).

Denne delen av Eurokode brukes ikke så mye i denne mastergradsoppgaven, men må brukes dersom man brukes bjelker som er satt sammen av plater, som for eksempel ved bruk av sveiset I-profiler.

Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser

Denne delen av Eurokode 3 omhandler dimensjonering av boltforbindelser og sveiste forbindelser. I denne rapporten vil det ikke gjennomgå forbindelser, men dersom man skal dimensjonere forbindelser mellom kranbrua og bruvogn er det nødvendig å bruke denne delen av Eurokode 3.

Del 1-9: Utmattingspåkjennte konstruksjoner

Del 1-9 av Eurokode 3, omhandler utmatting i konstruksjoner og konstruksjonselementer som for eksempel skrueforbindelser og sveis. Denne standarden inneholder et stort register av ulike kategorier som representerer de fleste vanlige caser.

«NS-EN 1993-1-9 gir metoder for vurderinger av motstand mot utmatting i deler, sammenføringer og ledd utsatt for utmattelseslaster» (Standard Norge 2010b).

Denne delen av standarden blir ikke brukt i denne oppgaven, men er nødvendig når man kontrollere konstruksjoner i bruddgrensetilstanden utmatting.

Del 3: Kranbaner

Denne delen av Eurokode går gjennom dimensjonering av kranbaner med de nødvendige kravene til bruksgrensetilstand og bruddgrensetilstander. Standarden beskriver også nødvendig informasjon om sammenkoblinger og utmatting som er gjeldende for kranbaner i tillegg til standardene som spesifikt beskriver sammenkoblinger og utmatting.

«Del 6 av NS-EN 1993 gir konstruksjonsregler for den strukturelle utformingen av kranbanebjelker og andre bærende konstruksjoner til kraner» (Standard Norge 2010c)

2.1.4 Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner

Eurokode 9 omhandler prosjektering av aluminiumskonstruksjoner og består av fem deler.

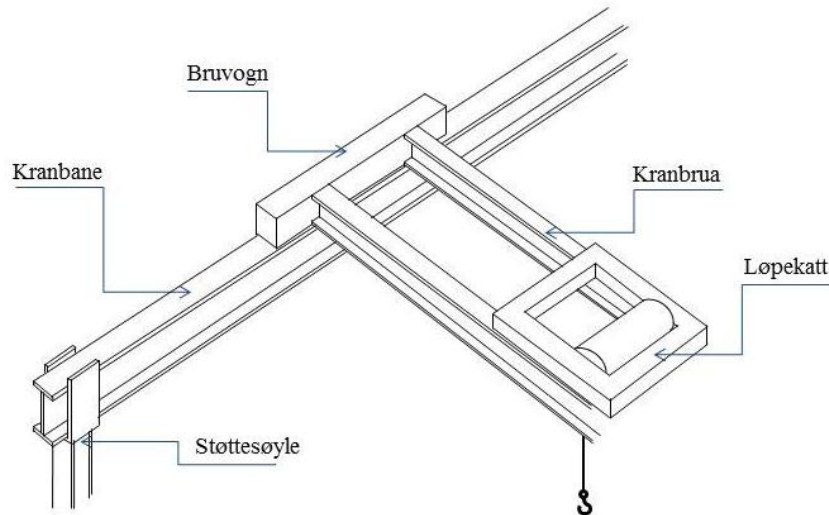
Del 1-1: Allmenne regler

Denne delen gir en gjennomgang av allmenne regler til dimensjonering av konstruksjoner i aluminium.

Denne delen av Eurokode har en bedre gjennomgang av bruddgrensetilstanden vipping enn «Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner». Dersom skal kontrollere elementer mot vipping kan det være lurt å bruke denne standarden sammen med Eurokode 3.

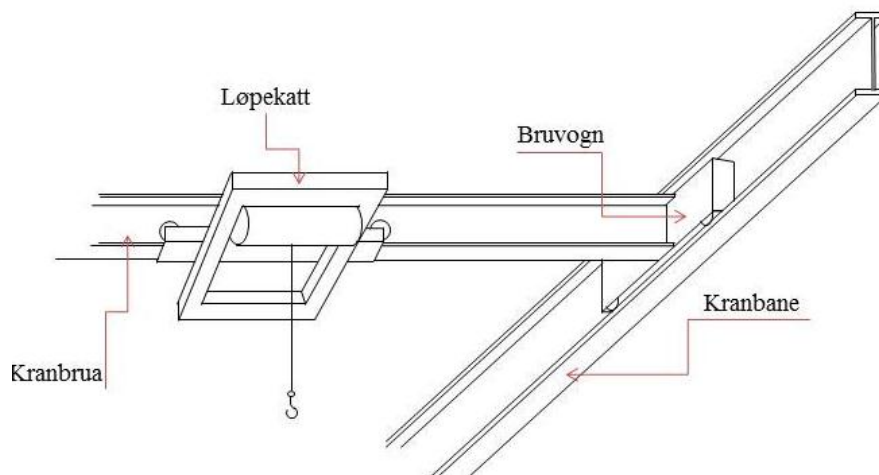
2.2 Løpekran

Kraner er et mekanisert løfteredskap som kommer i forskjellige varianter som er tilpasset hvilke type løft som skal gjøres, hvor stor lasten er og hvor heisingen skal gjennomføres. En løpekran er en kran som for det meste brukes innendørs. Den beveger seg i to retninger over planet ofte oppe ved taket, eller et stykke over gulvet, dette for at kranen ikke skal ta opp gulvplass eller være i konflikt med det som gjøres på bakkenivå.



Figur 2.1 Løpekran med toppkjørende løpekatt, sett fra oversiden. I figuren er det brukt h-profiler til kranbrua, kranbane og bæresøylen, og rektangulært hulprofil til bruvogna. Kranbanen er gaffellagret til støttesøylen.

I figur 2.1 kjører løpekatten på skinner på toppflensen til kranbrua, og kranbrua kjører på skinner på toppflensen til kranbanen. Figur 2.2 viser en underhengende løpekatt og bruvogna kjører inni bjelkeprofilen til kranbanen. Denne type løpekran kan være et godt alternativ hvor man har begrensning i forhold til høyde. Et annet alternativ som ikke vises i figurene er hvor bruvogna også er underhengene på den nedre flensen til en kranbane. Kranbanen kan stå på søyler, være innfestet i vegg eller opphengt i takkonstruksjonen.



Figur 2.2 Løpekran med underhengene løpekatt, sett fra undersiden. Til kranbane og kranbrua brukes det h-profil, bruvogna er et rektangulært hulprofil. Bruvogna kjører på den nedre flensen inni profilet til kranbanebjelken. Løpekatten som er underhengene kjører på den nedre flensen til kranbrua.

2.2.1 Løpekatt

Løpekatt er en vogn som beveger seg på skinner eller flensen av kranbrua enten manuelt eller med elektrisk drift på hjulene. Den inneholder heisemaskineri som talje eller vinsj hvor man bruker elektrisk kraft eller hånddrift for å heise lasten.

2.2.2 Kranbrua

Kranbrua er bæringen til løpekatten og spenner seg på tvers av verkstedhallen, lageret eller lignende og er festet til bruvogna med boltforbindelser eller sveis.

2.2.3 Bruvogn

For å kunne bevege seg langs kranbanen har bruvogna hjul og drivverk. Bruvogna kan bevege seg på skinner på kranbanens toppflens, underhengene på kranbanebjelkens bunnflens eller kjørende inni profilet til kranbanebjelken.

2.2.4 Kranbane

Kranbanen består av to kranbanebjelker som strekker seg parallelt på hver sin side av kranens virkeområde, som for eksempel på hver sin langvegg i et verkstedlokale. For å bære kranbanen kan det brukes søyler, den kan henges fra takkonstruksjonen eller hvile på veggfester.

2.3 Utforming

I denne oppgaven dimensjoneres en toppkjørende løpekran, med toppkjørende løpekatt. Både løpekatten og kranbrua kjører på skinner som ligger på toppflensen til kranbrubjelken og kranbanebjelken.

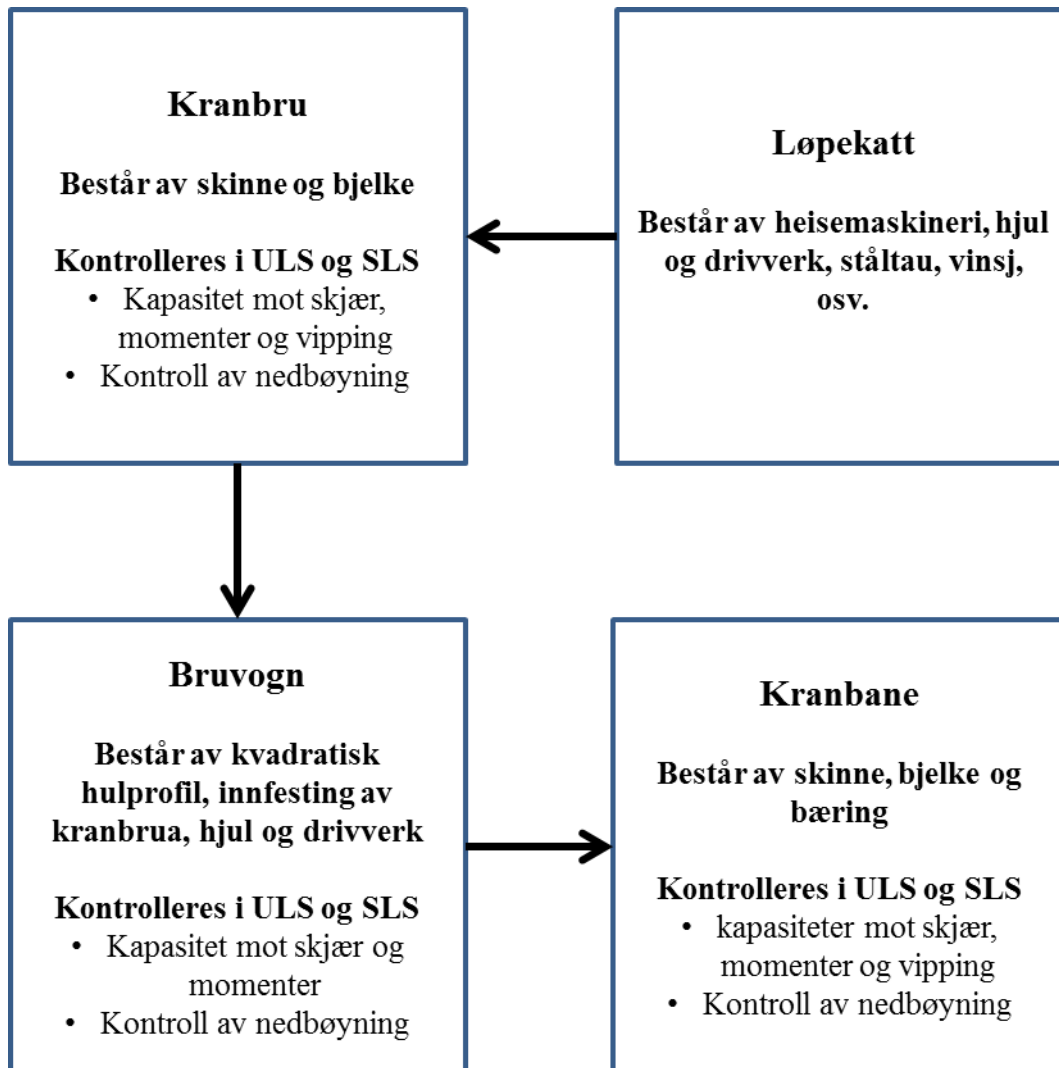
For å forenkle beregningen brukes det valsede profiler av typen HEB til kranbanebjelkene og til kranbrubjelkene.

Til bruvogna brukes det rektangulære hulprofil. Det går ikke inn på komponenter og oppbygning av bruvogna.

Løpekatten får en antatt vekt og det går ikke inn på selv oppbygningen av løpekatten.

2.4 Gjennomføring av beregninger

Ved beregningen av kraner, slik som eksempelet i kapittel 4, begynner man på toppen med løpekatten og jobber seg nedover slik som vist i figur 2.3. I denne oppgaven velges det en egenvekt og det blir kun sett på lastene fra løpekatten og ikke oppbygningen av den.



Figur 2.3 Denne figuren viser en fremgangsmåte for dimensjonering av løpekran. Man begynner med løpekatten som belaster kranbrua og dermed er med å bestemme dimensjonen til kranbrubjelken. Bruvogna blir dimensjonert for å passe laster og krefter fra kranbrua, og størrelser av profilet som brukes til kranbanebjelken blir bestemt på bakgrunn av lastene fra bruvogna. Figuren viser hva de forskjellige elementene inneholder og hvilke beregninger og kontroller av kapasiteter som gjøres i denne oppgaven.

Kranbrua består av to bjelker med skinner festet til toppflensen. Det kontrolleres mot nedbøyning, tverrsnittkapasiteter og vipping av bjelken. Skinnene sees på som fast innspennt,



men uten påvirkning på for eksempel arealmomenter. Det brukes kun egenvekten til skinnen som påvirkning på konstruksjonen og til plasseringen av laster på grunn av høyden til skinnen ved beregning av torsjon.

Sammenkoblingen mellom kranbrua og bruvogna er ikke tatt med i denne oppgaven. Lastene fra kranbrua settes som punktlaster på bruvogna. Bruvogna forenkles til et hulprofil uten hull til boltforbindelser, hjulene eller drivverk. Bruvogna kontrolleres mot nedbøyning og tverrsnittkapasiteter.

Bruvogna påfører lastene på kranbanen gjennom hjulene og settes som punktlaster. Kranbanen er satt sammen av en kranbanebjelke med skinne på toppflensen. To kranbaner plasseres på hver sin side av spennet til kranbrua. Også på kranbanen er skinnene fast innspenne, men uten påvirkning på arealmoment og lignende. Det gjøres ikke beregninger på bærekonstruksjonen til kranbanen.

3 TEORI

I dette kapittelet vil det være en gjennomgang av den nødvendige teorien i Eurokode for å kunne beregne de elementer av en løpekran som gjennomgås i denne oppgaven. Ved bruk av denne oppgaven er det nødvendig å ha de deler av Eurokode standardene som er listet opp i kapittel 2.2 Eurokode. Etterfølgende av dette kapittelet vil det være en gjennomgang av et eksempel. Teorien i dette kapittelet er tilpasset eksempelet og kan variere med andre varianter av løpekraner. Fra tabeller i standardene hentes det kun ut den informasjonen som er nødvendig til dimensjoneringseksempelet i kapittel 4.

3.1 Grensetilstander

«Prinsippene for prosjektering av konstruksjoner er gitt i NS-EN 1990. Prosjekteringsreglene er basert på bruk av partialkoeffisientmetoden (semi-probabilistisk metode) ved dimensjoneringen. Her skal det påvises at lastvirkningen E (indre snittkrefter eller deformasjoner) ikke overskrider motstanden R , det vil si at $E \leq R$, i definert grensetilstander. I hovedsak skilles mellom brudgrensetilstander og bruksgrensetilstander» (Larsen 2010).

Det opereres med to typer grensetilstander, bruksgrensetilstand og bruddgrensetilstand. I bruksgrensetilstanden ser man på virkninger som kan være til hinder for bruken av utstyret, men uten at konstruksjonen står i fare for brudd. I dette tilfellet med en løpekran kan for eksempel nedbøyning av kranbanen føre til begrensninger i bruken av kranen. I bruddgrensetilstanden derimot ser man laster og virkninger som kan føre til svikt i konstruksjonens bæreevne. I bruddgrensetilstanden ser man på knekking, vipping og motstand mot de spenninger som oppstår. I standardverket Eurokode sees også utmatting på som en del av bruddgrensetilstandene.

For å få de riktige faktorer er det nødvendig og først klassifisere kranen. I følge tabell B.1 i NS-EN 1991-3 hører en løpekran til i heiseklasse HC3 og har lastklasse S6.

3.2 Dynamiske faktorer

Dynamiske faktorer brukes for å inkludere de dynamiske virkningene som oppstår når kranen er i bevegelse, som ved akselerasjon og nedbremsing, overføring av last fra bakken og over på kranen, frikopling fra lasten og så videre. NS-EN 1991-3 går gjennom laster på konstruksjoner fra maskineri og kraner, i denne standarden blir de dynamiske faktorene beskrevet.

Det deles inn i to grupper variable laster, variable vertikale laster fra heising og kranens egenvekt, og horisontale laster på grunn av horisontale bevegelser av kranen som akselerasjon, nedbremsing og vridning. De variable lastene er en sammensetning av de statiske lastene og en dynamisk komponent, som representert i formelen:

$$F_{\varphi,k} = \varphi_i \cdot F_k \quad 3.1$$

Hvor:

- $F_{\varphi,k}$ er den karakteristiske verdien til en handling til kranen
- φ_i er den dynamiske faktoren
- F_k er den statiske komponenten av en handling til kranen

Under kommer en kort gjennomgang av de syv faktorene, med hvilke laster og krefter de skal ganges inn i og størrelsen på faktoren.

φ_1

Faktoren tar hensyn til de vibrasjoner i kranen som oppstår når lasten løftes fra bakken. Faktoren legges til kranens egenvekt og har følgende verdi:

$$0,9 < \varphi_1 < 1,1$$

Når man skal finne største lastene brukes den øvre verdien.

φ_2

Når vekten fra lasten overføres fra bakken og over på kranen oppstår det en dynamisk effekt som inkluderes når faktoren ganges inn i heiselasten. Faktoren finnes på følgende måte:

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 v_h \quad 3.2$$

Hvor v_h er en jevn løftehastighet gitt i m/s , $\varphi_{2,min}$ og β_2 som er relevante for løpekraner i heiseklasse HC3 er gitt i tabell 3.1.

Tabell 3.1 Faktorer til φ_2 (fra tabell 2.5 i NS-EN 1991-3). Tabellen inneholder de relevante faktorene til φ_2 for kraner i heiseklasse HC3.

Heiseklasse til kranen	β_2	$\varphi_{2,min}$
HC3	0,51	1,15

For en løpekran i heiseklasse HC3 blir faktoren:

$$\varphi_2 = 1,15 + 0,51 \cdot v_h$$

φ_3

Denne faktoren brukes for å få med effekten av plutselig frikobling av deler eller hele lasten som ved bruk av grabb eller magnet. Faktoren legges til heiselasten.

$$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} (1 + \beta_3) \quad 3.3$$

Hvor: Δm frikoblet eller sluppet del av lasten

m total heiselast

$\beta_3 = 0,5$ for utstyr med treg frikobling av last, som grabb

$\beta_3 = 1,0$ for utstyr med hurtig frikobling av last, som magnet

Dersom det brukes løfteutstyr som ikke har plutselig frakopling av hele eller deler av lasten blir det bakerste leddet i formel 3.3 null og faktoren blir dermed 1,0.

φ_4

Faktoren tar med dynamiske virkninger av kranens bevegelser på kranbanen eller kranbrua. Dersom skinnene oppfølger toleransekravene spesifisert i kapittel 3 i NS-EN 1993-6 settes faktoren lik 1. Faktoren legges til egenvekten til kranen og heiselasten.

$$\varphi_4 = 1,0$$

Dersom toleransekravet ikke oppfølges kan φ_4 bestemmes med en modell fra EN 13001-2.

φ_5

Denne faktoren inkluderer de dynamiske virkningene fra horisontale bevegelser av kranen. Faktoren har forskjellige verdier alt ettersom hvilke bruksområder som skal studeres, som vist i tabell 3.2.

Tabell 3.2 *Dynamisk faktor φ_5 (fra tabell 2.6 i NS-EN 1991-3). Tabellen gir verdiene til faktoren etter de forskjellige tilfeller.*

Verdier til faktoren φ_5	Spesifisert bruk
$\varphi_5 = 1,0$	For sentrifugalkrefter
$1,0 < \varphi_5 < 1,5$	For systemer med jevn endring i krefter
$1,5 < \varphi_5 < 2,0$	For tilfeller hvor plutselige endringer kan skje
$\varphi_5 = 3,0$	For kjøring med kraftige tilbakeslag

φ_6

Denne faktoren blir brukt i beregninger av testlast. I henhold til NS-EN 1991-3 skal testlasten ved dynamisk testing være minst 110 % av nominell heiselast. Når kranen skal påføres en testlast som skal være i bevegelse bestemmes faktoren på følgende måte,

$$\varphi_6 = 0,5 \cdot (1,0 + \varphi_2) \quad 3.4$$

Faktoren legges til testlasten.

Ved statisk testing, belastning av kranen uten av kranen beveger seg, bør testlasten, i henhold til NS-EN 1991-3 økes til minst 125 % av nominell heiselast. Faktoren legges til testlasten og settes til,

$$\varphi_6 = 1,0$$

φ_7

Når man ser på situasjoner hvor kranen kolliderer med bufferne. Buffere er endestoppere for kranbru på kranbanen eller løpekatt på kranbru og har som hensikt å dempe støtet. Denne faktoren ganges inn i bufferkraften. Tabell 3.3 viser verdien til faktoren i forhold til karakteristikken til bufferen.

Tabell 3.3 *Verdier til dynamisk faktor φ_7 i forhold til bufferkarakter (fra tabell 2.10 i NS-EN 1991-3)*

Verdier til faktoren φ_7	Bufferkarakter
$\varphi_7 = 1,25$	$0,0 \leq \xi_b \leq 0,5$
$\varphi_7 = 1,25 + 0,7 \cdot (\xi_b - 0,5)$	$0,5 \leq \xi_b \leq 1$

Merk: ξ_b kan tilnærmet bestemmes fra Figure2.9 (NS-EN 1991-3)

Tabell 3.4 Oversikt av de dynamiske faktorene. I tabellen vises det hvilke del/element de dynamiske faktorene skal ganges inn i og hvilke tilstander de skal brukes. Det oppgis hvilke seksjoner i Eurokode som gjennomgår temaene. (fra tabell 2.2 i NS-EN 1991-3)

	Symbol	Seksjon i NS-EN 1991-3	Lastgruppe									
			Bruddgrensetilstand							Testlast	Uhell	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 Egenvekt til kranen	Q_c	2.6	ϕ_1	ϕ_1	1	ϕ_4	ϕ_4	ϕ_4	1	ϕ_1	1	1
2 Løftelast	Q_h	2.6	ϕ_2	ϕ_3	-	ϕ_4	ϕ_4	ϕ_4	η^1	-	1	1
3 Akselerasjon av kranbrua	H_L, H_T	2.7	ϕ_5	ϕ_5	ϕ_5	ϕ_5	-	-	-	ϕ_5	-	-
4 Vridning av kranbro	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5 Akselerasjon eller nedbremsing av løpekatt eller løftetalje	H_{T3}	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6 Vindlaster under bruk	F_W^*	Annex A	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7 Testlast	Q_T	2.10	-	-	-	-	-	-	-	ϕ_6	-	-
8 Bufferkraft	H_B	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	ϕ_7	-
9 Vippekraft	H_{TA}	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

I tabell 3.4 vises det hvilke faktorer som brukes i de forskjellige bruddgrensetilstandene og hvilke deler/elementer de ganges inn i ved beregning av laster på en kranbane.

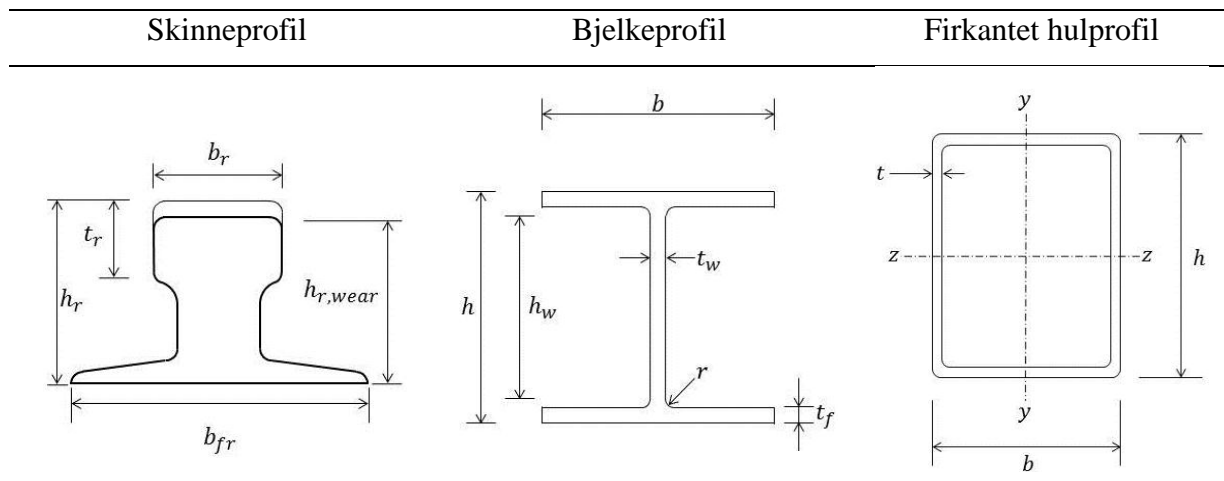
«Fra en inspeksjon av lastkombinasjonene anbefalt i prEN 1991-3, ble det observert at av kombinasjonene gitt som bruddgrensekombinasjoner, for løpekraner, kun er lastkombinasjonene 1, 5 og 6 som sannsynligvis er kritiske» (Dymond 2005). Dette er de dynamiske faktorene som gir de største lastene for bruddgrensetilstandene, de andre faktorene gir lavere laster. Dymond konkluderer på bakgrunn av denne observasjonen at de lastgruppene som ikke er kritiske i forhold til bruddgrensetilstanden, er gitt for beregninger av utmatting. Det antas at dette også er gjeldende i denne oppgaven, det fokuseres dermed på bruddgrensetilstander i lastgruppe 1 som gir de største lastene, lastgruppe 5 som tar hensyn til vridning av kranbrua og lastgruppe 6 som tar hensyn til akselerasjon og nedbremsing av løpekatten.

3.3 Tverrsnittklassifisering

Klassifisering av tverrsnitt beskrives i NS-EN 1993-1-1.

Symbolene som blir brukt til de forskjellige profilene vises i figur 3.5. Størrelsene og verdier til de forskjellige tverrsnittene som brukes gjennom denne rapporten er hentet fra «Stål Håndbok Del 1: 2008» (Myhre 2008).

Figur 3.5 Dimensjoner til tverrsnittene for de typer profiler som blir brukt i denne oppgaven. For hulprofilet er y - og z -aksene tegnet inn, x -aksen er i bjelkenes lengderetning. h_w er stegets høyde mellom flensene på H-profilet $h_{r,wear}$ er høyden på skinnen hvor det er tatt hensyn til slitasje av skinnehodet.



For å kunne regne på de forskjellige verifiseringene og liknende trengs det en klassifisering av tverrsnittet. Ved bruk av H-bjelker ser man på steget og flensene som plater og de klassifiseres først hver for seg. Dersom både steget og flensene er i for eksempel tverrsnittklasse 1 er hele profilet i tverrsnittklasse 1. I tabell 3.6 vises klassifisering av tverrsnittdelene med forholdet mellom høyden/lengden og tykkelsen av delen og denne størrelsen i sammenlignet med en øvre verdi. Innholdet i tabell 3.6 er et utdrag fra tabell 5.2 i EN1993-1-1.

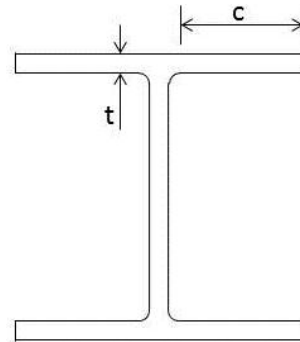
Skinnen har også en høyde som tar hensyn til slitasje av skinnehodet ved bruk over tid, $h_{r,wear}$. Slitasjen bør settes som minst 25 % av den nominelle tykkelsen til skinnehodet, t_r . Høyden på skinnen med hensyn på slitasje blir da:

$$h_{r,wear} = h_r - t_r \cdot 0,25 \quad 3.5$$

Tabell 3.6 Forholdet mellom lengde og tykkelse for trykkpåkjennte tverrsnittdele. Høyden c er høyden til steget mellom flensene til et H-profil og er bjelkens høyde minus flenstykkesene og overgangsradiusen. I hulprofilet er c den innvendige høyden eller bredden minus overgangsradiusen. t er tykkelsen til steget eller veggene i hulprofilet. (fra tabell 5.2 i NS-EN1993-1-1)

Klasse	c/t - grenser	Spenningsfordeling
1	$\alpha > 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \leq 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$	
2	$\alpha > 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{456 \cdot \varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\alpha \leq 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$	
3	$\psi > -1: \frac{c}{t} \leq \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ $\psi \leq -1: \frac{c}{t} \leq 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{-\psi}$	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		hvor f_y er materialets flytegrense

Tabell 3.7 Forhold mellom flensens bredde og tykkelse. Bredden c er flensens bredde fra overgangsradiusen og ut, slik det vises i figuren i tabellen. Tykkelsen t er flensens tykkelse. (fra tabell 5.2 i NS-EN1993-1-1)



Flensen

Klasse	c/t - grensen	Spenningsfordeling
1	$\frac{c}{t} \leq 9 \cdot \varepsilon$	
2	$\frac{c}{t} \leq 10 \cdot \varepsilon$	
3	$\frac{c}{t} \leq 14 \cdot \varepsilon$	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		hvor f_y er materialets flytegrense

Tabellen 3.7 viser hvordan man klassifiserer flensen til et h-profil. For at hele tverrsnittet skal kunne klassifiseres innen for eksempel klasse 1 må både steget og flensen være i klasse 1.

Ved klassifisering av tverrsnitt er det nødvendig å finne forholdet mellom plastisk nøytralakse $z_{s,pl}$ og høyden h_w :

$$\alpha = \frac{z_{s,pl}}{h_w} \quad 3.6$$

Til stegets høyde mellom de to flensene i et h-profil brukes både c og h_w . I klassifiseringen av tverrsnittet brukes c og i beregninger av laster og krefter brukes h_w . Høyden finnes på følgende måte:

$$c = h_w = h - 2 \cdot (r + t_f) \quad 3.7$$

Bredden c til flensen finner man på følgende måte:

$$c = \frac{b - t_w - r}{2} \quad 3.8$$

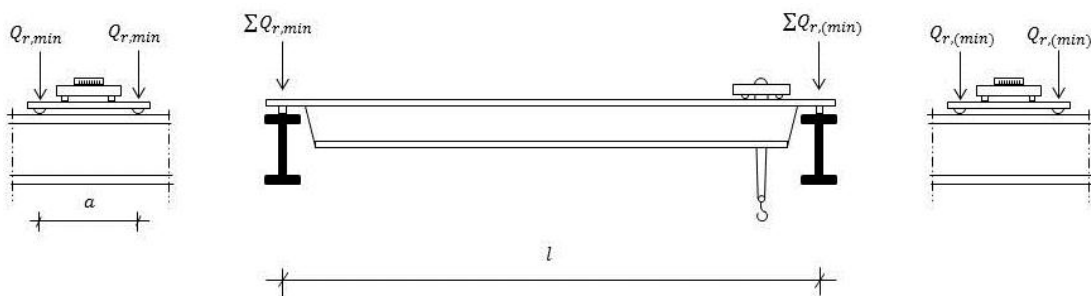
3.4 Vertikale laster

Vertikale krefter og laster fra kraner er beskrevet i NS-EN 1991-3.

Lastene fra hjulene til bruvogna på kranbanen blir beskrevet i dette kapitlet. Det gjøres en antakelse hvor de samme faktorer og dynamiske effekter vil være gjeldene også for lastene fra hjulene til løpekatten på kranbrua. Dermed vil denne teorien bli gjennomgått som gjeldene for begge disse elementene.

I Eurokode brukes benevningen Q for laster som er variable, mens til permanente laster som egenvekt brukes benevningen g .

Ubelastet kran



Figur 3.1 Lastfordeling med ubelastet kran. I illustrasjonen i midten av figuren er de fargede h -profilene kranbanene og den hvite bjelken er kranbrua, på toppen til høyre er løpekatten. Den siden av kranen hvor løpekatten står har den største lasten og har subskripten (**min**), på motsatt side av kranen hvor lasten er minst brukes subskripten **min**. Illustrasjonene til høyre og venstre i figuren viser lasten fra hvert hjul.

Som figur 3.1 viser, er den største lasten, når kranen er uten heiselast, $Q_{r,(min)}$ på hvert av hjulene som er nærmest løpekatten. Hjulene lengst fra løpekatten har lasten $Q_{r,min}$, som er den minste lasten for en kran uten heiselast.

Lasten fra kranen (kranbru og bruvogn) multipliseres med dynamisk faktor og blir:

$$Q_{C1,k} = \varphi_i \cdot Q_{C1} \quad 3.9$$

Og lasten fra løpekatten multiplisert med dynamisk faktor blir:

$$Q_{C2,k} = \varphi_i \cdot Q_{C2} \quad 3.10$$

Summering av lastene på den størst belastede siden blir:

$$\Sigma Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{C1,k} + Q_{C2,k} \quad 3.11$$

Dermed blir lasten på hvert hjul på den størst belastede siden:

$$Q_{r(min)} = \frac{\Sigma Q_{r,(min)}}{2} \quad 3.12$$

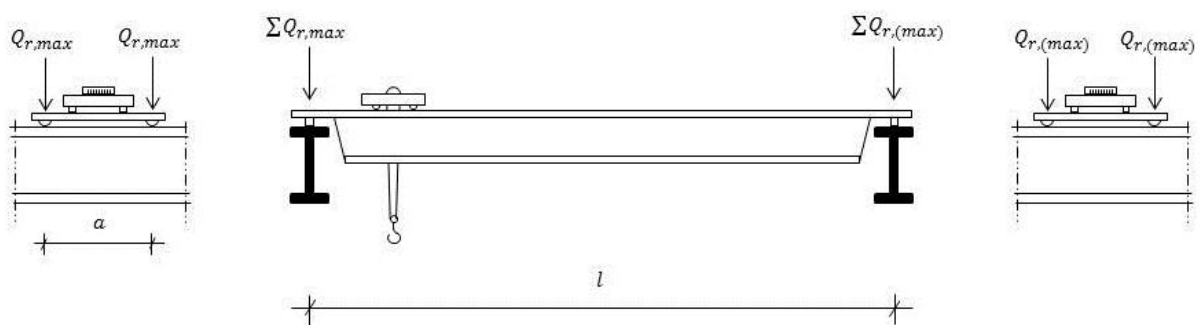
Det samme gjøres på den minst belastede siden:

$$\Sigma Q_{r,min} = \frac{1}{2} \cdot Q_{C1,k} \quad 3.13$$

Og lasten på hvert hjul på den minst belastede siden blir:

$$Q_{r,min} = \frac{\Sigma Q_{r,min}}{2} \quad 3.14$$

Belastet kran



Figur 3.2 Lastfordeling med belastet kran. I illustrasjonen i midten av figuren er de fargede h-profilene kranbanene og den hvite bjelken er kranbrua, på toppen er løpekatten. Den siden hvor løpekatten står har den største lasten og har subskripten **max**, på motsatt side av kranen hvor lasten er minst brukes subskripten (**min**). Illustrasjonene til høyre og venstre i figuren viser lasten på hvert hjul.

Figur 3.2 viser hvor kranen er mest belastet, $Q_{r,max}$, og minst belastet, $Q_{r,(max)}$ for en løpekran med heiselast.

Samme fremgangsmåte som ved ubelastet kran, men nå med et tillegg for heiselasten.

$$Q_{C1,k} = \varphi_i \cdot Q_{C1}$$

$$Q_{C2,k} = \varphi_i \cdot Q_{C2}$$

Heiselasten multipliseres med dynamisk faktor.

$$Q_{h,k} = \varphi_i \cdot Q_h \quad 3.15$$

Summeringen av kreftene og lasten på hvert av hjulene blir på den minst belastede siden:

$$\Sigma Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{C1,k} \quad 3.16$$

$$Q_{r,(max)} = \frac{\Sigma Q_{r,(max)}}{2} \quad 3.17$$

Summeringen av kreftene og lasten på hvert av hjulene bli på den størst belastede siden:

$$\Sigma Q_{r,max} = \frac{1}{2} \cdot Q_{C1,k} + Q_{C2,k} + Q_{h,k} \quad 3.18$$

$$Q_{r,max} = \frac{\Sigma Q_{r,max}}{2} \quad 3.19$$

Hvor: Q_{C1} Egenvekten til kranen
 Q_{C2} Egenvekten til løpekatten
 Q_h Heiselasten
 φ_i Dynamisk faktor

3.5 Horisontale laster

Horisontale krefter og laster fra kraner er beskrevet i NS-EN 1991-3.

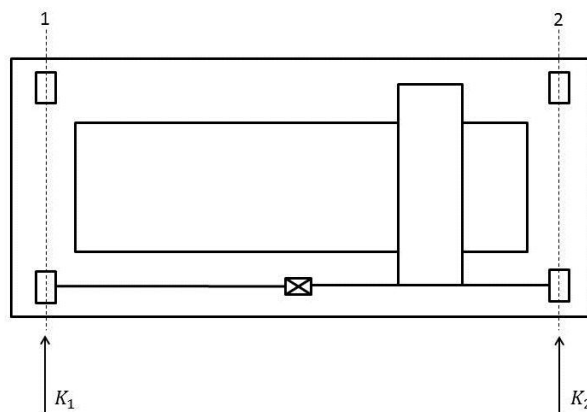
De horisontale kreftene kommer fra kranens og løpekattens horisontale bevegelser, som akselerasjon og nedbremsing av kran og løpekatt samt vridning av kranbrua.

3.5.1 Kjørekrefter

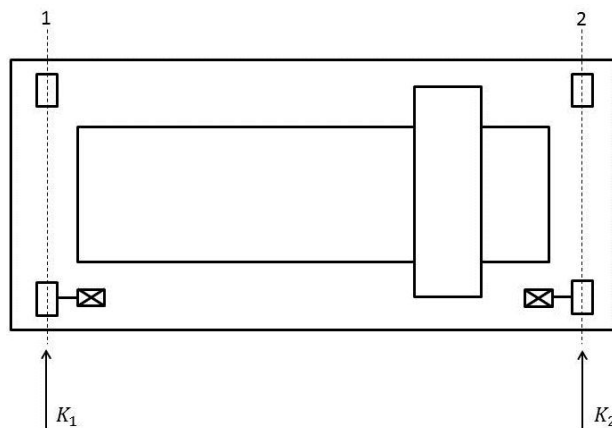
Bruker følgende metode fra NS-EN 1991-3 for å finne kjørekreftene:

$$K = K_1 + K_2 = \mu \cdot \sum Q_{r,min}^* \quad 3.20$$

I følge nasjonalt tillegg til NS-EN 1991-3 setter friksjonsfaktoren, μ til 0,2 for stål mot stål og 0,5 for stål mot gummi. Leddet, $\sum Q_{r,min}^*$, har to forskjellige formler som brukes etter hvilken type drift det er på hjulene. Figuren 3.3 viser en kran med sentral hjuldrift og figur 3.4 viser en kran med enkeldrift på to av hjulene.



Figur 3.3 Kran med sentral hjuldrift sett fra oversiden. De stiplede linjene representerer de to kranbanene. Motoren som driver hjulene vises som et rektangel med to diagonale linjer, de fire rektanglene som ligger på de stiplede linjene er kranens hjul. Det store rektangelet som går parallelt med kranbanene er løpekatten. De to pilene viser kjørekreftene.



Figur 3.4 Kran med enkeldrift på to av hjulene, sett fra oversiden. De stiplede linjene representerer de to kranbanene. Motorene som driver hjulene vises som et rektangel med to diagonale linjer, de fire rektanglene som ligger på de stiplede linjene er kranens hjul. Det store rektangelet som går parallelt med kranbanene er løpekatten. De to pilene viser kjørekreftene.

Dersom det er hjuldrift på enkelthjul brukes følgende formel, hvor m_w er antall enkelthjul med drift:

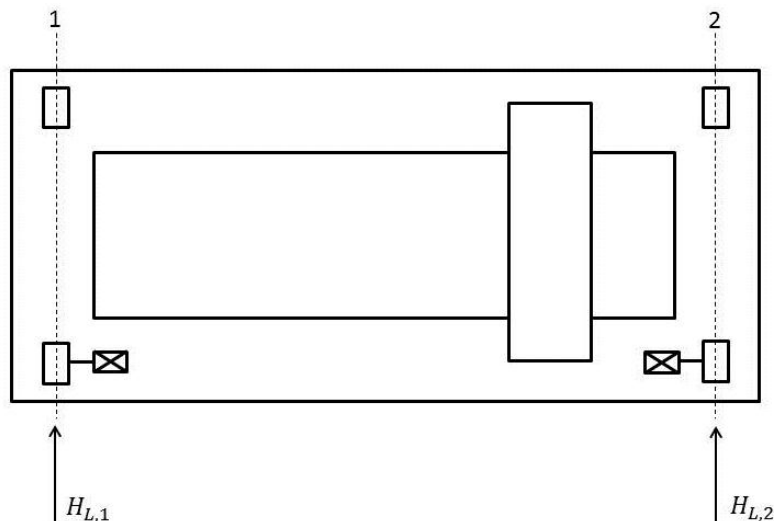
$$\sum Q_{r,min}^* = m_w \cdot Q_{r,min} \quad 3.21$$

Når det er sentral hjuldrift brukes følgende uttrykk:

$$\sum Q_{r,min}^* = Q_{r,min} + Q_{r,(min)} \quad 3.22$$

3.5.2 Langsgående krefter

Med langsgående krefter menes krefter som har samme retning som kranbanens lengderetning, som vist i figur 3.5.

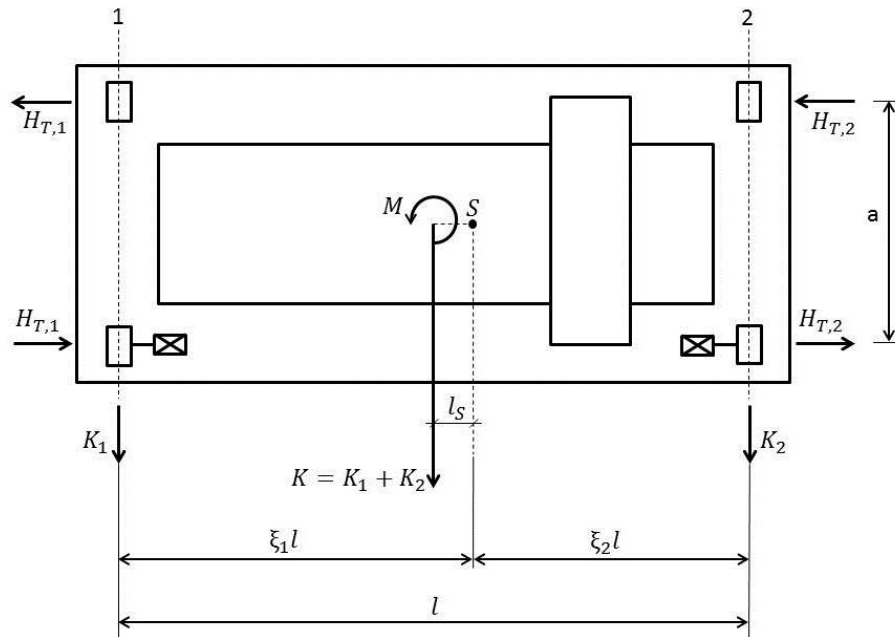


Figur 3.5 Langsgående krefter på kranbanen sett ovenfra. De to stiplede linjene representerer kranbanene. Figuren viser en kran med enkeldrift på to av hjulene. De to pilene markerer de horisontale kreftene.

$$H_{L,1} = H_{L,2} = \varphi_5 \cdot \frac{K}{n_r} \quad 3.23$$

3.5.3 Tverrgående krefter

Tverrgående krefter går på tvers av kranbanens lengderetning, som vist i figur 3.6.



Figur 3.6 Tverrgående krefter på kranbanen sett ovenfra. De to stiplede linjene representerer kranbanene. Figuren viser en kran med enkelt drift på to av hjulene. K_1 og K_2 er kjørekraftene, $H_{T,i}$ er de horisontale tverrgående kreftene, l er kranens spennvidde og a er avstanden mellom hjulene på kranen. M er momentet og S er kranens massesenter.

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a} \quad 3.24$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a} \quad 3.25$$

Hvor: $\xi_1 = \frac{\sum Q_{r,max}}{\sum Q_r}$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1$$

$$\sum Q_r = \sum Q_{r,max} + \sum Q_{r,(max)}$$

a avstanden mellom hjulene på bruvogna

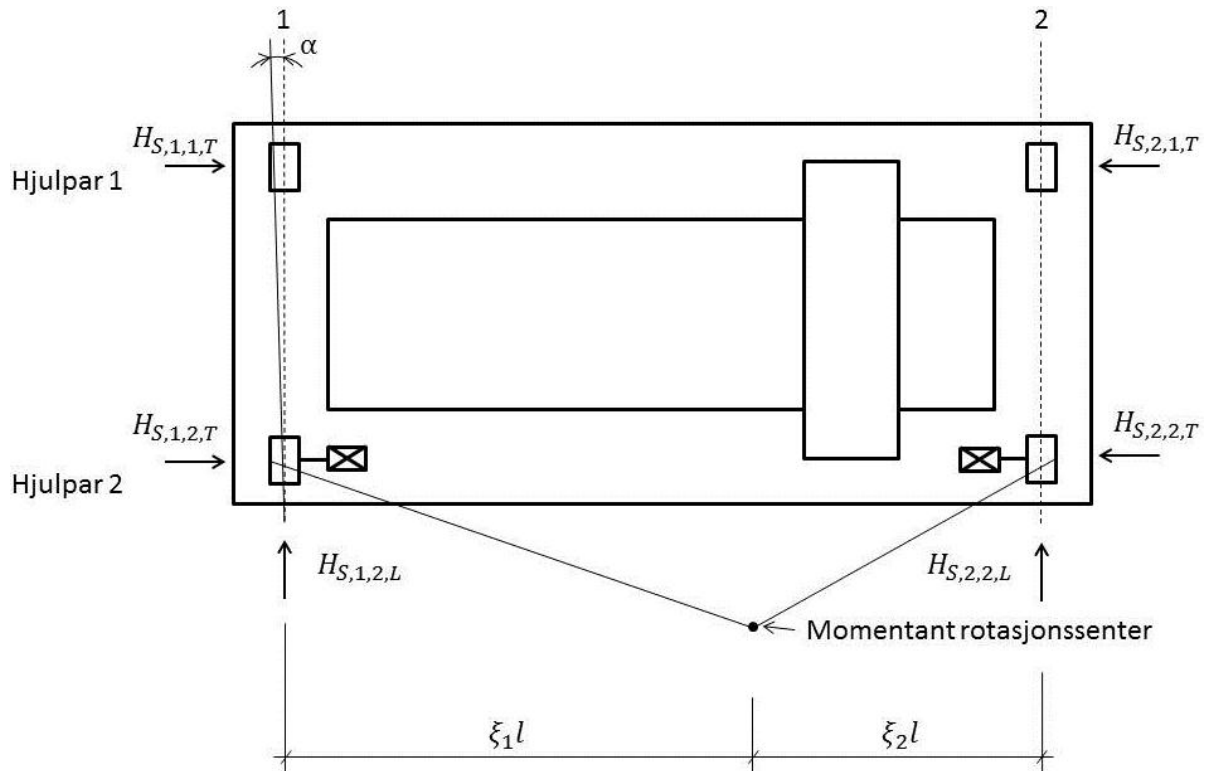
$$M = K \cdot l_s$$

$$l_s = (\xi_1 - 0,5) \cdot l$$

l spennet til kranbrua

I følge «Reliability based codification for the design of overhead travelling crane support structures» (Dymond 2005) brukes det φ_4 som legges til kranens egenvekt og heiselasten for å ta hensyn til de dynamiske virkningene av kjøring på en ujevn kranbane. I denne oppgaven antas det at kravene til toleransen er oppfølgt og den dynamiske faktoren blir som tidligere nevnt, $\varphi_4 = 1,0$.

3.6 Horisontale krefter på grunn av vridning



Figur 3.7 Definisjon på forskjellige elementer vedrørende vridningskrefter. De stiplede linjene representerer kranbanene. $H_{S,i,i,T}$ er de horisontale tverrgående kreftene og $H_{S,i,i,L}$ er de langsgående horisontale kreftene. α er vridningsvinkelen, $\xi_i l$ er avstanden mellom momentant rotasjonssenter og kranbane.

For å finne de horisontale kreftene som kommer fra vridningen av kranen er det først nødvendig å bestemme de forskjellige kraftfaktorene. Figur 3.7 illustrerer en kran utsatt for vridning. Det skilles mellom styring i form av styrekant på hjulene og styremekanismer som egne styrehjul for å holde kranen på skinnene.

I tabell 3.8 og 3.9 defineres avstanden mellom momentant rotasjonssenter og relevant styremekanisme og faktorene for å kunne bestemme styrekraften og de horisontale kreftene som oppstår på grunn av vridning.

Tabell 3.8 Avstand mellom momentant rotasjonssenter og styremekanisme med hensyn på forskjellige varianter av hjulpar og om hjulene er låst i sin posisjon eller kan bevege seg i lengderetningen av kranbanen. (tabell 2.8 NS-EN 1991-3)

Innfesting av hjul i forhold til bevegelse i lengderetninge n	Kombinasjon av hjulpar				h
	paret (c)		uavhengig (i)		
Fast/Fast FF (fixed/fixed)					$\frac{m\xi_1\xi_2l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$
Fast/Bevegelig FM (fixed/movable)					$\frac{m\xi_1l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$

Hvor:

h er avstanden mellom momentant rotasjonssentrum og relevant styremekanisme

m er antall par av hjulpar ($m = 0$ for uavhengige hjulpar)

ξ_1l er avstanden mellom momentant rotasjonssentrum og skinne 1

ξ_2l er avstanden mellom momentant rotasjonssentrum og skinne 2

l er spennet til kranbrua

e_j er avstanden mellom hjulpar j og relevant styremekanisme

Verdiene til h tas med videre inn i kraftfaktorene som defineres i tabell 3.9.

Tabell 3.9 Definisjon av kraftfaktorene for de forskjellige horisontale kreftene som kommer av vridning og for de fire forskjellige systemene for hjulene. (tabell 2.9 i NS-EN 1991-3)

System	$\lambda_{S,j}$	$\lambda_{S,1,j,L}$	$\lambda_{S,1,j,T}$	$\lambda_{S,2,j,L}$	$\lambda_{S,2,j,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1 \xi_2 l}{nh}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 l}{nh}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
CFM	$\xi_2 \left(1 - \frac{\sum e_j}{nh}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 l}{nh}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 l}{nh}$	0
IFM		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	0

Hvor:

n er antall hjulpar

Når kraftfaktorene er bestemt må man finne den «ikke positive» faktoren som bestemmes av vridningsvinkelen α . Formler for vridningsvinkelen er gitt i tabell 3.10.

«Vridningsvinkelen α , som bør være lik eller mindre enn 0,015 radianer, bør velges ut fra mellomrommet mellom styremiddel og skinnen så vel som variasjon i dimensjonene og slitasje på hjulene til utstyret og skinnene» (Beg et al. 2010).

Tabell 3.10 *Formler for vridningsvinkelen med hensyn på hvilken styremekanisme som blir brukt. (fra tabell 2.7 EN 1991-3)*

Vinkel α_i	Minimumsverdien til α_i
$\alpha_F = \frac{0,75x}{a_{ext}}$	$0,75x \geq 5 \text{ mm}$ for styreruller $0,75x \geq 10 \text{ mm}$ for styrekant på hjulene
$\alpha_V = \frac{y}{a_{ext}}$	$y \geq 0,03b \text{ mm}$ for styreruller $y \geq 0,10b \text{ mm}$ for styrekant på hjulene
α_0	$\alpha_0 = 0,001$

Hvor:

a_{ext}	er mellomrommet mellom hjulene med styrekant eller avstanden mellom styreruller
b	bredden til skinnehodet
x	er klaringen mellom skinnen og styremekanisme
y	er slitasjen på skinnen og styremetode
α_0	er toleransen til hjulets- og skinnenes retning.

Vinklene α_i legges sammen og vridningsvinkelen må være mindre eller lik $0,015 \text{ rad}$ som vist under:

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad} \quad 3.26$$

Ut fra dette finner man den «ikke positive» faktoren på følgende måte:

$$f = 0,3(1 - \exp(-250\alpha)) \leq 0,3 \quad 3.27$$

Styrekraften S og kreftene $H_{S,i,j,k}$ som oppstår på grunn av vridning finner man på følgende måte, hvor verdiene til kraftfaktorene er hentet fra tabell 3.9 og den «ikke positive» faktoren er bestemt som vist over.

Kraft på styremekanisme:

$$S = f\lambda_{S,j}\sum Q_r \quad 3.28$$

Langsgående horisontal kraft på hjul 1 av hjulpar j :

$$H_{S,1,j,L} = f\lambda_{S,1,j,L}\sum Q_r \quad 3.29$$

Langsgående horisontal kraft på hjul 2 av hjulpar j:

$$H_{S,2,j,L} = f \lambda_{S,2,j,L} \Sigma Q_r \quad 3.30$$

Tverrgående kraft på hjul 1 av hjulpar j:

$$H_{S,1,j,T} = f \lambda_{S,1,j,T} \Sigma Q_r \quad 3.31$$

Tverrgående kraft på hjul 2 av hjulpar j:

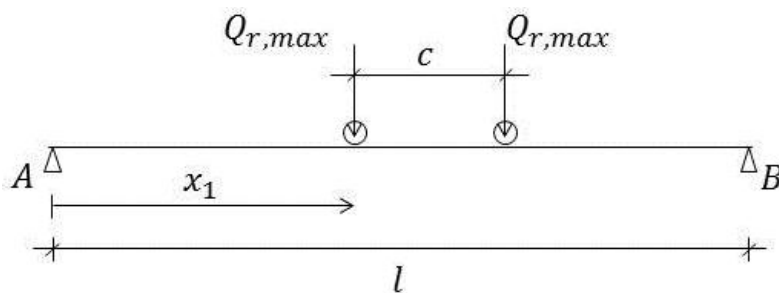
$$H_{S,2,j,T} = f \lambda_{S,2,j,T} \Sigma Q_r \quad 3.32$$

Den horisontale kraften på grunn av akselerasjon og nedbremsing av løpekatten er beskrevet i NS-EN1991-3 under 2.7.5 og 2.11.2, og blir som følger:

$$H_{T,3} = H_{B,2} = 0,1(Q_{c2} + Q_{h,nom}) \quad 3.33$$

3.7 Interne krefter og momenter

Først er det nødvendig å finne plasseringen av hjullastene som gir det største bøyemomentet. Etersom lasten er fordelt på to hjul med en gitt avstand vil ikke det største bøyemomentet oppstå midt i mellom de to bærepunktene, men litt til sides for dette sentrum. Figur 3.8 viser lastposisjon for å finne avstanden mellom opplagring og lastene som gir det største momentet i bjelken.



Figur 3.8 Lastposisjon for maks bøyemoment. **A** og **B** er opplagringene, **c** er avstanden mellom hjulene, $Q_{r,max}$ er det lastene fra hvert av hjulene. Avstanden fra opplagring **A** som gir det største momentet kalles x_1 og **l** er spennvidden.

Finner opplagringskreftene i A:

$$A = \frac{(2l - c) - 2x}{l}, \text{ når } Q \text{ settes til } 1 \quad 3.34$$

Finner momentet med avstand x fra opplagring A:

$$M(x) = A \cdot x = \frac{(2l - c)x - 2x^2}{l} \quad 3.35$$

Deriverer momentet:

$$M'(x) = \frac{(2l - c) - 4x}{l} \quad 3.36$$

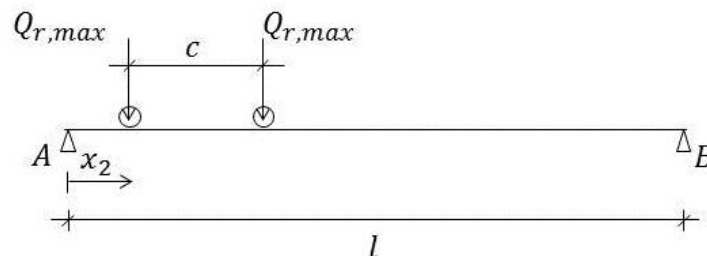
Når det deriverte momentet er lik null vil avstanden x være avstanden fra opplagring A hvor momentet er størst. Løser ligningen med hensyn på x og får:

$$x = \frac{2l - c}{4} = x_1 \quad 3.37$$

For å få et generelt uttrykk for å finne avstanden x_1 fra bæringen til det første hjulet sett fra venstre, har lasten $Q_{r,max}$ blitt satt til 1.

I følge «Design of Plated Structures» (Beg et al. 2010) kan punktet for maksimums skjærkrefter settes til:

$$x_2 = \frac{h_w}{2} \quad 3.38$$



Figur 3.9 Lastposisjon for maks skjærkrefter. l er spennvidden, c er avstanden mellom hjulene og x_2 er avstanden fra opplagring som gir den største skjærkraften.

Og boka sier følgende «For en mindre avstand mellom hjullasten og bæringen (support) vil den maksimale skjærkraften stige noe, men gjennomsnittlig skjærkraft i steget nær bæringen,

relevant for skjærknekking, vil tydelig minke». Denne beregningen brukes til både kranbanen og kranbrua. For kranbrua sin del blir dette en antakelse av hvor nærme løpekatten kan komme enden til kranbrua. Figur 3.9 viser lastposisjonen som gir den største skjærkraften.

Egenvekt til kranbanen

Jevnt fordelt last fra bjelke og skinne:

$$g_k = g_{bjelke} + g_{skinne} \quad 3.39$$

Oppplagringskraften i A på grunn av egenvekt:

$$A(g_k) = \frac{g_k \cdot l}{2} \quad 3.40$$

Moment i punkt x_1 på grunn av egenvekt:

$$M_{y,k} = A(g_k) \cdot x_1 - \frac{x_1^2 \cdot g_k}{2} \quad 3.41$$

Skjærkraft i punkt x_1 på grunn av egenvekt:

$$V_{z,k} = M'_{y,k} = A(g_k) - x_1 \cdot g_k \quad 3.42$$

Hvor: g_k er total vekt per lengde for kranbanen
 g_{bjelke} er vekt per lengde for kranbanebjelken
 g_{skinne} er vekt per lengde for kranbaneskinne

Momenter og skjærkrefter når kranen er maks belastet

Maksimalt bøyemoment oppstår hvor kranen er plassert med den ene hjulet med avstanden x_1 i fra opplagringen og det andre hjulet med avstanden $x_1 + a$. Bøyemomentet i punkt x_1 blir da:

$$M_{Q,k,max} = \frac{x_1^2}{l} \cdot 2 \cdot Q_{r,max} \quad 3.43$$

Maksimalt bøyemoment med kun egenvekten til kranbanen blir:

$$M_{g,k,max} = \frac{g_k \cdot l^2}{8} \quad 3.44$$

Maksimalt bøyemoment med kun egenvekt i punkt x_1 :

$$M_{g,k,x_1} = \frac{g_k \cdot l}{2} \cdot x_1 - \frac{g_k \cdot x_1^2}{2} \quad 3.45$$

Legger sammen de to bøyemomentene i punkt x_1 og legger til partiell faktorer for å finne det dimensjonerende momentet:

$$M_{Ed,max} = \gamma_G M_{g,k,x_1} + \gamma_Q M_{Q,k,max} \quad 3.46$$

Hvor: γ_G partiellfaktor for permanente krefter i ULS, i følge NA i NS-EN 1991-3 settes verdien til 1,35

γ_Q partiellfaktor for varierende krefter i ULS, i følge NA i NS-EN 1991-3 settes verdien til 1,35

Skjærkrefter på grunn av egenvekt i punkt x_1 :

$$V_{g,k,x_1} = \frac{g_k \cdot l}{2} - g_k \cdot x_1 \quad 3.47$$

Største skjærkraft i punkt x_1 på grunn av de variable kreftene:

$$V_{Q,k,max} = \frac{2x_1}{l} \cdot Q_{r,max} \quad 3.48$$

Legger sammen skjærkreftene, med partiellfaktorer, for å finne dimensjonerende skjærkraft i punktet x_1 :

$$V_{Ed} = \gamma_G V_{g,k,x_1} + \gamma_Q V_{Q,k,max} \quad 3.49$$

Maksimums skjærkrefter i punkt x_2

Maksimum skjærkrefter vil være i punktet x_2 som er definert tidligere i kapittelet. Den største skjærkraften på grunn av hjullastene blir:

$$V_{Q,k,max} = \frac{Q_{r,max}(2l - 2x_2 - c)}{l} \quad 3.50$$

Og skjærkraften på grunn av egenvekt blir i punktet x_2 :

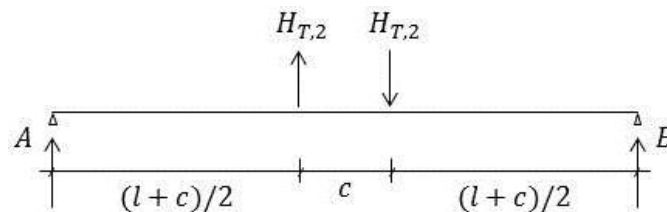
$$V_{g,k,x_2} = \frac{g_k \cdot l}{2} - gx_2 \quad 3.51$$

Den dimensjonerende skjærkraften i punkt x_2 blir da:

$$V_{Ed,max} = \gamma_G V_{g,k,max} + \gamma_Q V_{Q,k,max} \quad 3.52$$

Tverrkrefter og spenninger

Det vil være en horisontal last på kranbanen på grunn av kjøring av kranen. Denne horisontale lasten antas å påvirke toppflensen til kranbanebjelken og kontrolleres mot toppflensens skjærkapasitet. Lastsituasjonen vises i figur 3.10.



Figur 3.10 Horisontale krefter fra kranen på kranbanen. Bjelken er sett ovenfor og er påført tverrgående horisontale krefter, $H_{T,i}$, hvor kranen eller løpekatten er plassert i senter av kranbane eller kranbru. **A** og **B** er opplagringpunkter, c er avstanden mellom kreftene og $(l+c)/2$ er avstanden fra opplagring til nærmeste kraft.

Finner opplagringskraften i A:

$$F_A = \frac{-H_{T,2} \cdot \left(l - \frac{l+c}{2}\right) + H_{T,2} \cdot \left(l - \left(\frac{l+c}{2} + c\right)\right)}{l} \quad 3.53$$

Likevekt gir følgende skjærkraft:

$$V_x = F_A + H_{T,2} \quad 3.54$$

Den dimensjonerende skjærkraften på grunn av horisontale krefter blir:

$$V_{Ed,x} = \gamma_Q \cdot V_x \quad 3.55$$

Torsjon

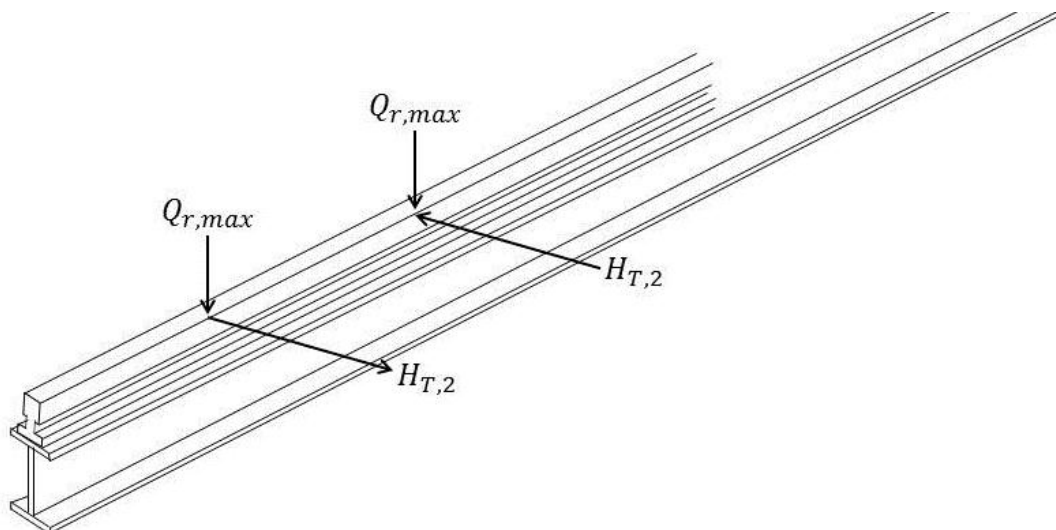
På kranbanen vil de horisontale tverrkraftene skape et torsjonsmoment i kranbanen. Hjullastene vil også være med å skape et torsjonsmoment når hjulene ikke er plassert i senter av skinnene. I kapittel 2.5.2 i NS-EN 1991-3 står det: «Hjullastens avstand fra sentrum på en skinne, e , bør settes til en andel av skinnehodets bredde b_r » (Standard Norge 2010a). I det nasjonale tillegget til denne standarden anbefales det å sette avstanden e_y til 25 % av skinnehodets bredde.

$$e_y = 0,25 \cdot b_r \quad 3.56$$

Avstanden mellom den horisontale lasten og x-aksen, e_z , settes til halve høyden til bjelkeprofilen sammen med høyden til skinnen. Setter angrepspunktet til de horisontale kreftene til toppen av skinnehodet.

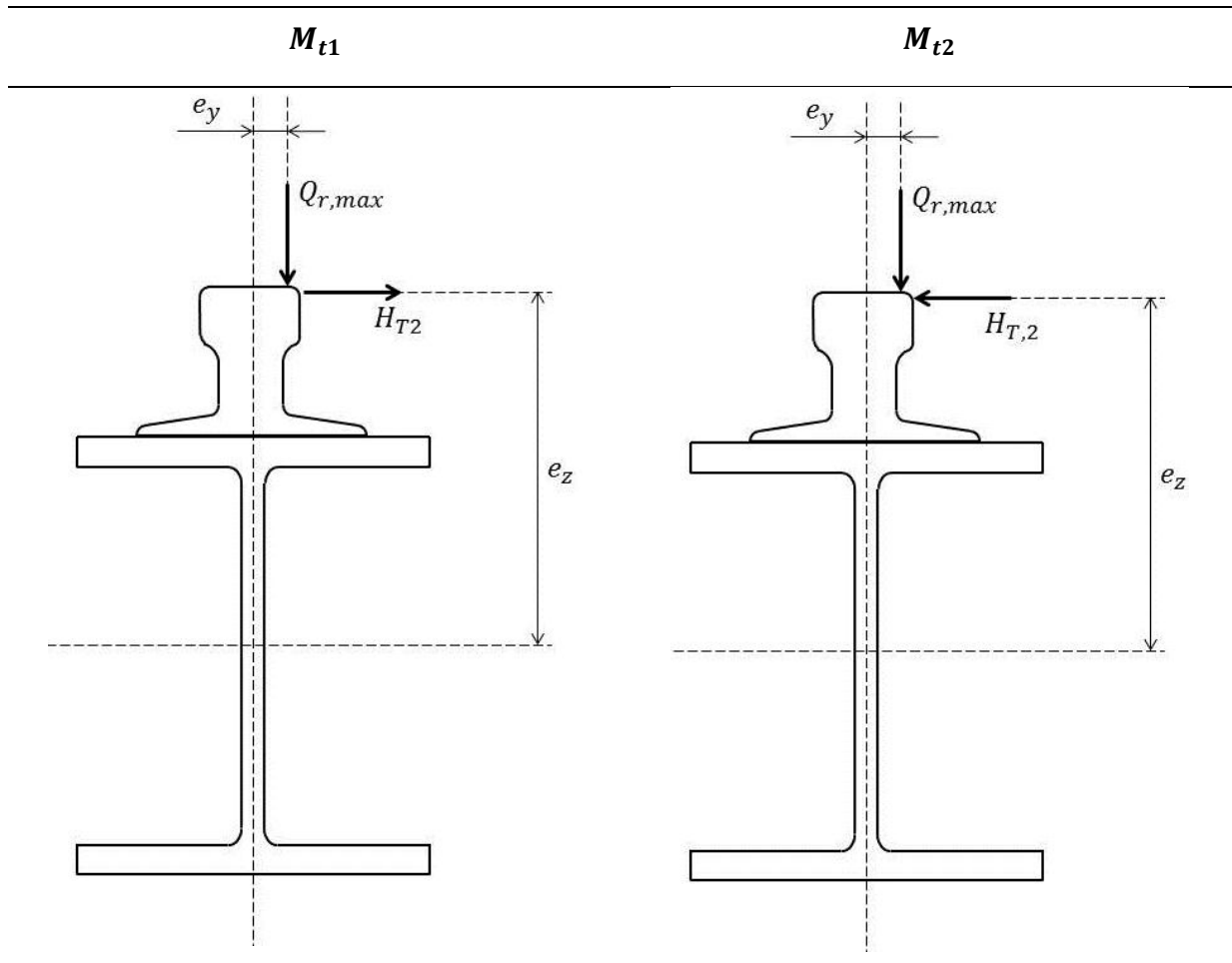
$$e_z = 0,5 \cdot h_{bjelke} + h_{skinne} \quad 3.57$$

Beregning av torsjon i et tverrsnitt som H-profiler kan være veldig komplisert. Beregningen av det maksimale torsjonsmomentet i kranbanebjelken beregnes dermed i ANSYS. Som figur 3.11 viser blir kreftene og lastene påført på toppen av skinnehodet.



Figur 3.11 Krefter som bidrar til torsjon i bjelken. Kraftenes angrepspunkt er på toppen av skinnehodet. $Q_{r,max}$ er de vertikale lastene og $H_{T,2}$ er de horisontale kreftene.

Kreftene og lastene i figur 3.11 skaper to torsjonsmomenter. Setter opp de to torsjonsmomentene på måten som er vist i figur 3.12.

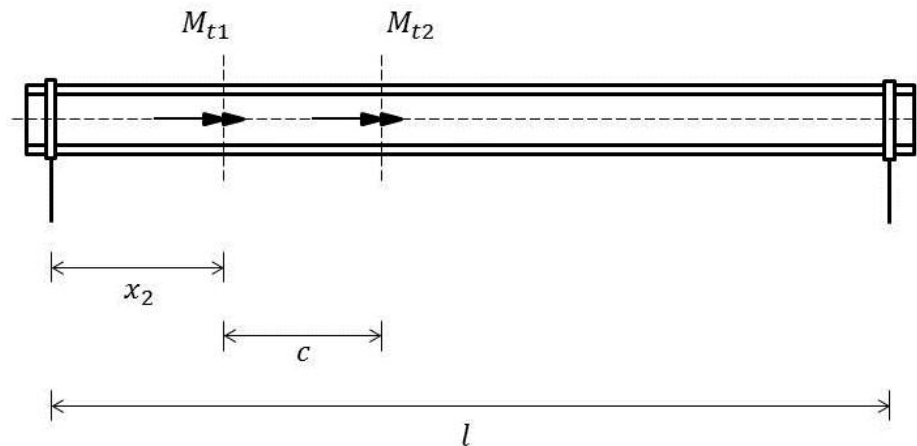


Figur 3.12 Torsjonsmomentene som blir påført bjelken. Torsjonsmoment M_{t1} består av $Q_{r,max}$ med horisontal forskyvning, e_y fra senteret i bjelkesteget og den horisontale kraften $H_{T,2}$ som har avstanden e_z fra bjelkens vertikale senter. Det samme gjelder for torsjonsmomentet M_{t2} , men med motsatt retning på den horisontale kraften $H_{T,2}$.

Som figur 3.12 viser bidrar begge kreftene til positivt rettet torsjon om x-aksen for torsjonsmomentet M_{t1} . For M_{t2} bidrar kreftene til både negativt og positivt torsjon om x-aksen.

Finner det største torsjonsmomentet hvor kranen står med avstand x_2 til opplagringen, hvor skjærkreftene er størst.

Figur 3.13 viser torsjonsmomentene satt på kranbanebjelkens x-akse:



Figur 3.13 Torsjonsmomentene påført på kranbanebjelken. Bjelken er gaffellagret i begge ender. Spennvidden er l , x_2 er avstanden fra opplagringen på venstre side til nærmeste torsjonsmoment og c er avstanden mellom torsjonsmomentene.

Figuren viser tilfellet hvor torsjonen i bjelken er størst. De to torsjonsmomentene er som følger:

$$M_{t1} = Q_{r,max} \cdot e_y + H_{T,2} \cdot e_z \quad 3.58$$

$$M_{t2} = Q_{r,max} \cdot e_y - H_{T,2} \cdot e_z \quad 3.59$$

Retningen til den horisontale kraften H_{T2} i M_{t2} gjør at den bidrar til et motsatt rettet torsjonsmoment.

For å finne det største torsjonsmomentet i kranbanen gjøres en enkel modellering i ANSYS.

Det største torsjonsmomentet får beskrivelsen: $\max M_{t,k}$

Det dimensjonerende torsjonsmomentet blir da:

$$\max M_{t,sd} = \gamma_Q \cdot \max M_{t,k} \quad 3.60$$

3.8 Bruksgrensetilstand

Følgende bruksgrensetilstander for kranbane er gitt i NS-EN 1993-6 (Standard Norge 2010c)

«Deformasjon og forskyvninger:

- *vertikal deformasjon av kranbanebjelken, for å unngå vibrasjoner på grunn av heising av last eller kranens anvendelse eller kjøringen*
- *vertikal deformasjon av kranbanebjelken, for å unngå for bratt stigning for kranen*
- *differensial deformasjon av paret av kranbanene, for å unngå for bratt stigning for kranen*
- *horisontal deformasjon av kranbanebjelkene, for å redusere vridningen av kranen*
- *sidelengs forskyvning av støttesøyler eller rammer, for å unngå overdrevet amplitude av vibrasjoner i ramme*
- *differensial sidelangs forskyvning mellom to nærliggende søyler/ramme for å unngå plutselig endringer i den rette linjen til kranskinnene, som forårsaker økning av vridningen og mulig vregning av kranbrua*
- *sidelengs forskyvning som endrer avstanden mellom kranbanene, for å unngå skader på styreflensene på hjulene, innfestningen til skinner eller kranens konstruksjon*

Slankhet i plater, for å utelukke synlig knekking eller «breathing» i platen i steget

Spenninger, for å sikre reversible handlinger

- *hvor lastene fra hjulene er direkte på flensen til kranbanen*
- *hvor man bruker testlaster*
- *hvor plastisk analyse er brukt for verifisering i bruddgrensetilstanden (ULS)»*

Kontrollering i bruksgrensetilstand (SLS – Serviceability Limit State) i denne oppgaven gjøres kun med hensyn på nedbøyning. I nasjonalt tillegg til NS-EN 1993-6 settes maksimal tillatt nedbøyning til spennvidde på kranbanen delt på 600, men ikke større enn 25 mm, Som vist i formel 3.61

$$\delta_z \leq \frac{l}{600}, \quad \text{og } \delta_z \leq 25 \text{ mm} \quad 3.61$$

Større nedbøyninger enn den maksimale tillatte trenger ikke å være kritiske for konstruksjonen, men kan gi for stor motstand for bevegelse av bruvogn eller løpekatt. Utrykket for nedbøyning er hentet fra «Løfte- og transportmaskiner» (Helgesen 1981).

$$f = \frac{S + \frac{5}{8}S_G}{E \cdot I \cdot 48}$$

Gjør dette uttrykket om slik at det passer med benevningene brukt i denne oppgaven, tabell 3.11 viser omgjøringen av symbolene.

Tabell 3.11 Tabellen viser omgjøring av symboler fra de Helgesen bruker og til de som brukes i Eurokode.

Helgesen	Beskrivelse	Eurokode
f	nedbøyning	δ_z
S_L	nyttelast	Q_h
S_{G1}	vekt av løpekatt	Q_{c2}
S_G	vekt av bjelken med skinne	$g_k \cdot l$
$S = S_L + S_{G1}$	nyttelast + vekt av løpekatt	$Q_h + Q_{c2}$
I	Treghetsmoment for bjelken	I_y

Nedbøyningen blir da:

$$\delta_z = \frac{(Q_h + Q_{c2}) + \frac{5}{8}(g_k \cdot l)}{E \cdot I_y \cdot 48} \cdot l^3 \quad 3.62$$

Bruker en et annet uttrykk for nedbøyningen av bruvogna. I beregningen av nedbøyning til bruvogna tas det ikke hensyn til de delene av bruvogna som ligger utenfor opplagringskreftene. Dette gjør at beregningen av nedbøyningen blir konservativ. I «Stålkonstruksjoner: Profiler og formler» (*Stålkonstruksjoner : profiler og formler* 1993) oppgis følgende formel for nedbøyning i senter av bjelken, med en punktlast som ikke ligger i sentrum:

$$w = \frac{1}{48} \frac{PL^3}{EI} (3\alpha - 4\alpha^3)$$

Tabell 3.12 Tabellen viser omgjøring av symboler fra som blir brukt i «Profiler og formler» bruker og til de som brukes i Eurokode.

«Profiler og formler»	Beskrivelse	Eurokode
w	nedbøyning	δ
P	punktlast	$Q_{r,max}$
q	egenvekt til bjelken	g_{bv}
L	lengde	l
I	Tregghetsmoment for bjelken	I_y

α er avstanden fra opplagring frem til punktlasten som deles på spennvidden l . Formelen fra «Profiler og formler» gjøres om for å passe til to laster med benevningene fra Eurokode, som vist i tabell 3.12 og blir:

$$\delta_Q = \frac{Q_{r,max} \cdot l^3}{24EI} \cdot \left(3 \left(\frac{\alpha}{l} \right) - 4 \left(\frac{\alpha}{l} \right)^3 \right) \quad 3.63$$

Nedbøyningen i bruvogna på grunn av egenvekt er også hentet fra «Stålkonstruksjoner: Profiler og formler» (*Stålkonstruksjoner : profiler og formler* 1993) og er som følger:

$$w = \frac{5}{348} \frac{qL}{EI}$$

Formelen gjøres om til å passe benevninger som brukes i denne oppgaven som vist i tabell 3.12 og blir som følger:

$$\delta_g = \frac{5 \cdot g_{bv} \cdot l^4}{348EI} \quad 3.64$$

3.9 Bruddgrensetilstanden

3.9.1 Tverrsnittkapasitet

Tverrsnittkapasitet er en del av bruddgrensetilstandene og blir gått gjennom i NS-EN 1993-1-1.

Før man kan se på de forskjellige kapasitetene i tverrsnittet må det klassifiseres. Klassifisering av tverrsnittet er nevnt i kapittel 3.3 og tverrsnittklassene brukt i denne oppgaven er klasse 1. I dimensjonering av stålkonstruksjoner (Larsen 2010) beskrives den gjeldende tverrsnittklassen på følgende måte:

«Tverrsnittklasse 1 er tverrsnitt eller tverrsnittdeler som kan nå full plastisk kapasitet og som opprettholder kapasiteten selv om tverrsnittet eller tverrsnittdelen får en betydelig stukning, f.eks i et flyteledd.»

Når vi bruker de overnevnte klassene beregner vi tverrsnittkapasiteten etter plastisitetsteorien grenseteoremer, øvre grenseteorem og nedre grenseteorem.

I beregningen av kapasitetene til tverrsnittet divideres de karakteristiske verdiene med partialfaktorer, γ_M . Faktorene oppgis i det nasjonale tillegget til NS-EN 1993-1-1 og har følgende dekningsområde og verdier:

$$\gamma_{M0} = \text{tverrsnittkapasitet uansett tverrsnittklasse} = 1,05$$

$$\gamma_{M1} = \text{stavers kapasitet mot instabilitet påvist for hele staven} = 1,05$$

$$\gamma_{M2} = \text{tverrsnittkapasitet mot brudd og strekkpåkjenning} = 1,25$$

Kontrollerer de dimensjonerende skjær-, moment- og torsjonskreftene opp mot kapasiteten i tverrsnittet.

Kapasitet mot skjær

Man kontrollerer tverrsnittets kapasitet mot skjær er større en den dimensjonerende skjærkraften med følgende fremgangsmåte. Kravet gitt i formel 3.63 må oppfylles for at kapasiteten ikke overskrides.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,pl}} \leq 1,0 \quad 3.65$$

Dersom profilet har tverrsnittklasse 1 kan man bruke plastisk dimensjonering og den dimensjonerende skjærkapasiteten blir skjærkapasiteten $V_{pl,Rd}$.

Den plastiske skjærkapasiteten blir:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad 3.66$$

Skjærarealet, A_v settes i NS-EN 1993-1-1 til:

Valsede I- og H-profiler påkjent parallelt med steget:

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \quad 3.67$$

Men ikke mindre enn $\eta h_w t_w$ hvor η kan settes til 1,0 som en sikker verdi.

Valsede rektangulære hulprofiler med jevn tykkelse belastet med høyden:

$$A_v = \frac{A \cdot h}{b + h} \quad 3.68$$

Dersom steget ikke oppfyller kravet under, er det nødvendig å kontrollere mot skjærknekking i steget etter NS-EN 1993-1-5. (hentet fra NS-EN 1993-1-1)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad 3.69$$

Kapasitet mot bøyemoment

Tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet mot bøyemoment dersom kravet gitt i formel 3.68 er oppfylt.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad 3.70$$

For tverrsnittklasse 1 eller 2 brukes det plastisk momentkapasitet gitt i formel 3.72.

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad 3.71$$

Skjærmotstand på grunn av torsjon

Kontroll av kapasitet med hensyn på torsjon gjøres etter samme fremgangsmåte som i eksempelet til «Design example for the application of...» (Sedlacek et al. 2003).

Kontrollerer skjærmotstand på grunn av torsjon:

$$\frac{\tau_{t,ED}}{\tau_{y,d}} \leq 1,0 \quad 3.72$$

Finner dimensjonerende skjærspenning:

$$\tau_{t,Ed} = \frac{M_{t,Sd} \cdot t_f}{I_t} \quad 3.73$$

Og kapasiteten mot skjærspenning:

$$\tau_{y,d} = \frac{f_y \cdot \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \quad 3.74$$

Uttrykket for $\tau_{y,d}$ er hentet fra «Dimensjonering av stålkonstruksjoner» (Larsen 2010).

Etter NS-EN 1993-1-1 må man ta hensyn til kombinasjon av torsjon og skjærkrefter og redusere den dimensjonerende skjærkapasiteten på følgende måte:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Rd}}{1,25 \cdot (f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}} \cdot V_{pl,Rd} \quad 3.75$$

Dimensjonerende skjærkrefter kontrolleres mot denne kapasiteten som tar hensyn til torsjon.

Etter Eurokode bør det tas hensyn til skjærkraftens virkning på momentkapasiteten, men i NS-EN 1993-1-1 (Standard Norge 2008a) står det følgende i kapittel 6.2.8: «*Der skjærkraften er mindre enn den halve plastiske skjærkapasiteten, kan det sees bort fra dens virkning på den dimensjonerende momentkapasiteten, bortsett fra der skjærknekking reduserer tverrsnittets kapasitet, se NS-EN 1993-1-5*».

3.9.2 Kontroll mot vipping

I beregningene av kapasiteten til kranbanebjelken mot vipping må det tas hensyn til at lasten ikke angriper i skjærsenteret, men på toppen av skinnehodet. Ved vipping av bjelken vil lasten på grunn av avstanden til skjærsenteret ha et større bidrag. I «Dimensjonering av stålkonstruksjoner» (Larsen 2010) påpekes det at NS-EN 1993-1-1 ikke gir noe informasjon om hvordan man tar hensyn til lastens plassering i beregningen av $M_{0,cr}$. Boka bruker en metode hentet fra NS-EN 1999-1-1 (Aluminiumkonstruksjoner). Denne metoden blir også brukt i denne oppgaven i beregningen av det kritiske momentet for vipping, M_{cr} .

$$M_{cr} = \bar{M}_{0,cr} \cdot \mu_{cr} \quad 3.76$$

Finner først de nødvendige parametere for å kunne bestemme det dimensjonsløse kritiske momentet μ_{cr} :

Torsjonsparameteren:

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w l} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} \quad 3.77$$

Lastangrepspunktets koordinat relativt til skjærsenteret:

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z l} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad 3.78$$

Hvor: $z_g = \frac{h}{2} + h_r$ er halve høyden av h-profilet og høyden til skinnen.

Det dimensjonsløse kritiske momentet blir da som følger:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + k_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] \quad 3.79$$

For et dobbeltsymmetrisk tverrsnitt blir koordinaten $z_j = 0$, dette medfører at leddet ζ_j blir lik null.

Larsen skriver at for lange bjelker med stor profilhøyde og smale flenser blir momentet $\bar{M}_{0,cr}$:

$$\bar{M}_{0,cr} = \left(\frac{\pi}{l}\right) \sqrt{GI_T \cdot EI_z} \quad 3.80$$

Det antas at dette uttrykket er gyldig for HEB profiler.

Kontrollerer at kranbrubjelken ikke vipper under belastningen av momentet. Dette er beskrevet i NS-EN 1993-1-1 under kapitel 6. For at bjelken ikke skal vippe må følgende krav oppfylles:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad 3.81$$

Dimensjonerende vippekapasitet er som følger:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad 3.82$$

I den dimensjonerende vippekapasiteten, $M_{b,Rd}$ er reduksjonsfaktoren χ_{LT} gitt i formel 3.84:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \quad \text{der} \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad 3.83$$

Funksjon for å bestemme reduksjonsfaktoren:

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad 3.84$$

Hvor: $\bar{\lambda}_{0} = 0,4$ minste verdi, hentet fra NA i NS-EN 1993-1-1

$\beta = 0,75$ største verdi, hentet fra NA i NS-EN 1993-1-1

For valsede I-profiler anbefales det knekkekurve b, dersom $\frac{h}{b} \leq 2$. For knekkekurve b er formfeilfaktoren, α_{LT} for vipping anbefales i «Dimensjonering av stålkonstruksjoner» (Larsen 2010) til å være 0,34.

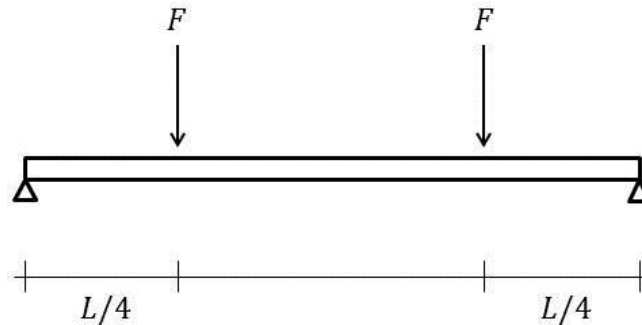
Relativ slankhet for vipping er:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} \quad 3.85$$

Hvor: $W_y = W_{pl,y}$ for tverrsnittklasse 1

Verdiene til faktorene C_i og k_i er gitt i tabell 3.12.

Tabell 3.13 Nødvendige faktorer til det dimensjonsløse kritiske momentet (utdrag fra tabell 6.2 i "Dimensjonering av stålkonstruksjoner" (Larsen 2010))



k_y	k_z	k_w	C_1	C_2	C_3
1	1	1	1,04	0,43	0,562

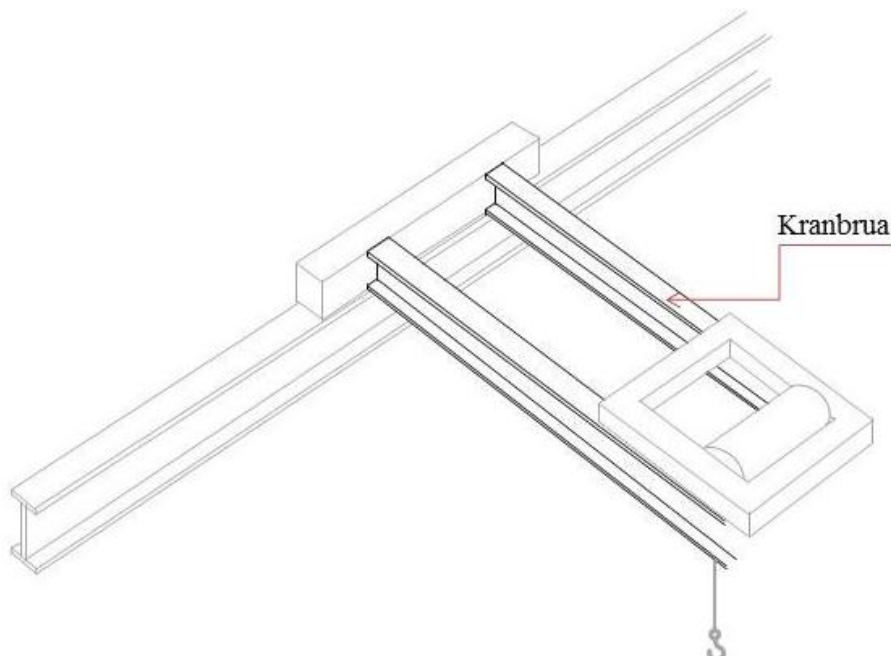
Det gjøres en antakelse om at disse verdiene til faktorene er gjeldende for eksempelet i denne oppgaven.

4 BEREKNINGSEKSEMPEL

I dette eksempelet kontrolleres kapasiteten til profilene som er valgt til en løpekran. Det gjøres kontroll av tverrsnittkapasiteten og motstand mot vipping i bruddgrensetilstanden og nedbøyning i bruksgrensetilstanden. Til kranbanebjelken og kranbrubjelken brukes det H-profiler og til bruvogna brukes det rektangulære hulprofiler. Løpekranen kjører på toppflensen til kranbanen og løpekatten på toppflensen av kranbrua. Gjennom hele eksempelet brukes det stål med flytegrense på 235 N/mm , dette for å forenkle tverrsnittklassifiseringen. Størrelser og dimensjoner på bjelkeprofiler, skinneprofiler og rektangulære hulprofiler er alle hentet fra «Stål Håndbok Del 1: 2008» (Myhre 2008)

4.1 Kranbrua

Til kranbrua brukes det HE 400 B bjelker med kranskinner av typen A 55 som er festet til bjelkenes toppflens. Spennvidden på kranbrua, l er på 10 m og hjulavstanden på løpekatten, c_{lk} er på 1 m . Vekten til løpekatten, Q_{c2} settes til 10 kN og løftehastigheten med jevn endring i hastigheten, v_h settes til 6 m/min . Illustrasjon av kranbrua er gitt i figur 4.1.



Figur 4.1 Kranbrua med løpekatt. Kranbrua er delen som er markert med i sort. Resten av løpekranen er farget grå.

4.1.1 Dynamiske faktorer

Kranbrua er påvirket av lastene fra løpekatten. For å bestemme de dimensjonerende kreftene er det nødvendig å multiplisere lastene med dynamiske faktorer. Det brukes de samme faktorene på løpekatten som når man regner på hele kranen.

$$\varphi_1 = 1,1 \text{ øvre verdi}$$

Bruker formel 3.2 og verdiene fra tabell 3.1 for å finne den dynamiske faktoren φ_2 :

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 v_h = 1,15 + 0,51 \frac{6}{60} = 1,20$$

Fra formel 3.3 får vi følgende verdi til faktoren φ_3 når det antas at det ikke vil være plutselig frakopling fra hele eller deler av lasten:

$$\varphi_3 = 1,0$$

Antar at skinnene oppfølger toleransekravet gitt i NS-EN 1993-6, dermed blir faktoren som følger:

$$\varphi_4 = 1,0$$

Antar at det er jevn endring i krefter, dermed blir faktoren φ_5 med den høyeste verdien fra tabell 3.2:

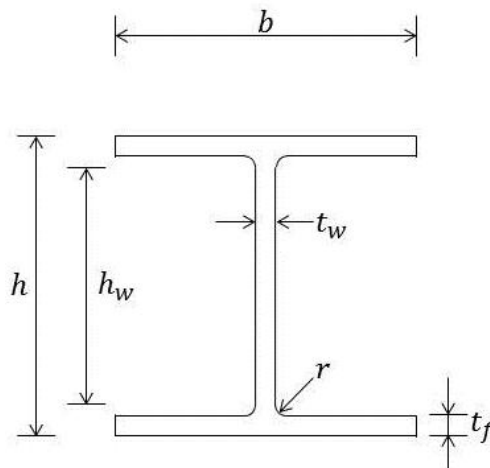
$$\varphi_5 = 1,5$$

4.1.2 Dimensjoner og klassifisering av tverrsnitt

Dimensjoner

Dette eksempelet settes opp med HE 400 B til kranbrubjelkene. I tabell 4.1 oppgis de relevante dimensjoner og størrelser til varmvalsedde HE 400 B bjelker.

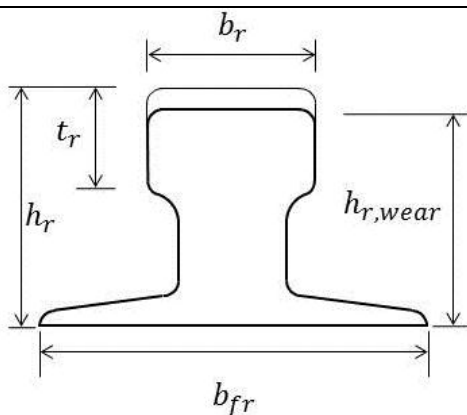
Tabell 4.1 Dimensjoner og verdier til HE 400 B. Illustrasjonen i tabellen viser hvilke deler størrelsene hører til.



Dimensjoner					Tverrsnitt	Vekt pr m	Plastisk tverrsnittmodul	Annet arealmoment	Annet arealmoment for torsjon	Hvelvingsmotstand
h	b	t_w	t_f	r	A_{400}	g_{400}	$W_{pl,y}$	I_z	I_t	I_w
mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	kg/m	mm ³ · 10 ³	mm ⁴ · 10 ⁶	mm ⁴ · 10 ³	mm ⁶ · 10 ³
400	300	13,5	24	27	198	155	3240	108,2	3570	3817

Skinnene som ligger på toppflensen til kranbrua er kranskiner av typen A 55. De nødvendige størrelsene og verdiene til skinnene er gitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2 Dimensjoner og verdier til kranskinne A55. Illustrasjonen i tabellen viser hvilke deler av skinnen de forskjellige størrelsene hører til.



Betegnelse	Dimensjoner				Tverrsnitt	Annet arealmoment	Vekt pr m
	b_r mm	h_r mm	b_{fr} mm	t_r mm	A_r $mm^2 \cdot 10^3$	I_y $mm^4 \cdot 10^6$	g_r kg/m
A55	55	65	150	25	4,07	1,82	32,0
Med hensyn for slitasje, 25 % av t_r							
A55	55	58,75*	150	18,75*	3,74*	1,36*	

I henhold til NS-EN 1993-6 bør man ta hensyn til slitasje av skinnehodet i klassifiseringen av tverrsnittet. I tabellen over er tallene markert med * med hensyn på slitasjen som settes til 25 % av tykkelsen på skinnehodet. Verdiene hvor det er tatt hensyn til slitasje brukes hvor de påvirker beregningene negativt, for eksempel hvor kapasiteten svekkes. Ellers brukes verdiene uten hensyn på slitasje.

Tverrsnittklassifisering

Til kranbrua er det nødvendig å klassifisere kranbrubjelken. Det skilles mellom flens og steg og hver del klassifiseres hver for seg.

Steget

Bruker formel 3.6 for å finne forholdet mellom plastisk nøytralakse og den effektive høyden av steget:

$$\alpha = \frac{z_{s,pl}}{h_w} = \frac{200}{298} = 0,67$$

I et dobbeltsymmetrisk tverrsnitt blir avstanden mellom nøytralaksen og ytterpunkt på flensene, $z_{s,pl}$ hvor arealet over nøytralaksen er lik arealet under, dermed den halve høyden for et h-profil.

Høyden til steget mellom flensene regnes ut med formel 3.7:

$$h_w = c = h - 2(r + t_f) = 400 - 2(27 + 24) = 298 \text{ mm}$$

Sjekker om steget har tverrsnittklasse 1. Med α større enn 0,5 finner man følgende krav fra tabell 3.6 som må oppfylles oppfylles:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

Kontrollerer at forholdet mellom stegets høyde og tykkelse oppfylder slakhetskravet.

$$\frac{298}{13,5} \leq \frac{396 \cdot 1}{13 \cdot 0,67 - 1}$$

$$22,1 \leq 51,4$$

Steget oppfølger kravet og har tverrsnittklasse 1.

Flensen

Dersom følgende krav oppfylles har flensen tverrsnittklasse 1, bredden c finnes ved hjelp av formel 3.8:

$$c = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{300 - 13,5 - 2 \cdot 27}{2} = 116,25 \text{ mm}$$

Fra tabell 3.7 er følgende krav gitt for at flensen er i tverrsnittklasse 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\frac{116,25}{24} \leq 9 \cdot 1$$

$$4,84 < 9$$

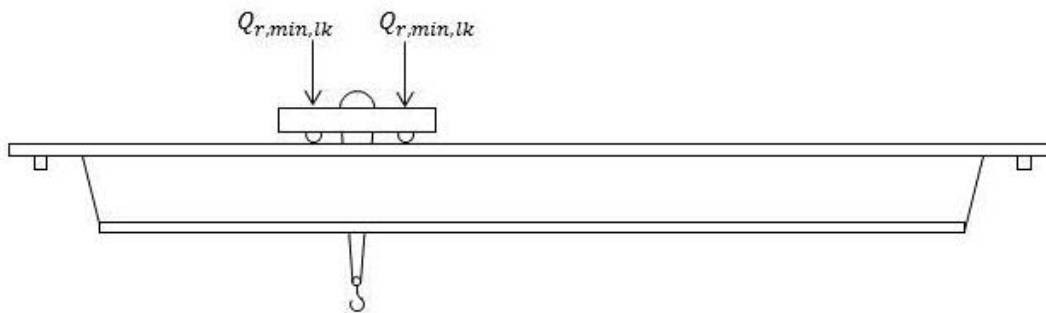
Flensen er også innenfor tverrsnittklasse 1. Dermed har hele tverrsnittet i tverrsnittklasse 1.

4.1.3 Vertikale laster

Antar at løpekattens egenvekt og heiselasten angriper midt i løpekatten og at kreftene dermed fordeles likt på de fire hjulene.

Ubelastet løpekatt

Når kranen er ubelastet er det kun egenvekten til løpekatten som påfører en last på kranbrua som det vises i figur 4.2.



Figur 4.2 Last fra løpekatt uten heiselast. $Q_{r,min,lk}$ er lasten fra løpekatten på hver av hjulene.

For lastgruppe 1 og 2 med $\varphi_1 = 1,1$

Lasten fra løpekatten sammen med den dynamiske faktoren beregnes med formel 3.10:

$$Q_{c2,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2} = 1,1 \cdot 10 = 11 \text{ kN}$$

Lasten fordelt på løpekattens hjul regnes ut med bruk av formel 3.13 og 3.14:

$$Q_{r,min} = \frac{\sum Q_{r,min}}{2} = \frac{\left(\frac{1}{2} Q_{c2,k}\right)}{2} = \frac{1}{4} Q_{c2,k}$$

Dette gir følgende uttrykk for hjullasten fra løpekatten:

$$Q_{r,min,lk} = \frac{1}{4} \cdot Q_{c2,k} = \frac{11}{4} = 2,75 \text{ kN}$$

For lastgruppe 3,4,5 og 6 med $\varphi_4 = 1,0$

Bruker de samme formlene som for lastgruppe 1 og 2.

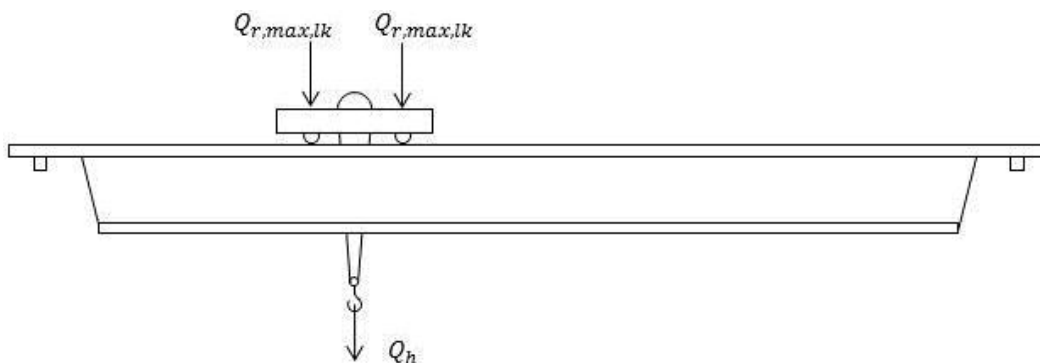
$$Q_{c2,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c2} = 1,0 \cdot 10 = 10 \text{ kN}$$

Og igjen fordelt på løpekattens fire hjul:

$$Q_{r,min,lk} = \frac{1}{4} \cdot Q_{c2,k} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ kN}$$

Belastet løpekatt

Ved belastet kran blir kranbrua påført laster fra både egenvekten til løpekatten og heiselasten som det vises i figur 4.3.



Figur 4.3 Last fra løpekatt med heiselast.

Lastgruppe 1 med $\varphi_1 = 1,1$ og $\varphi_2 = 1,20$

Bruker formel 3.10 for å regne ut lasten fra løpekatten:

$$Q_{c2,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2} = 1,1 \cdot 10 = 11 \text{ kN}$$

Til beregning av heiselasten brukes formel 3.15:

$$Q_{h,k} = \varphi_2 \cdot Q_h = 1,20 \cdot 100 = 120 \text{ kN}$$

Lasten fordelt på løpekattens fire hjul blir som følger ved bruk av formel 3.18 og 3.19. Formlene settes sammen for å finne lasten på hvert av hjulene til løpekatten.

$$Q_{r,max,lk} = \frac{1}{4}(Q_{c2,k} + Q_{h,k}) = \frac{1}{4}(11 + 120) = 32,75 \text{ kN}$$

Lastgruppe 2 med $\varphi_1 = 1,1$ og $\varphi_3 = 1,0$

Det brukes de samme formlene som for lastgruppe 1 for å finne lastene i lastgruppe 2.

$$Q_{c2,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2} = 1,1 \cdot 10 = 11 \text{ kN}$$

$$Q_{h,k} = \varphi_3 \cdot Q_h = 1,0 \cdot 100 = 100 \text{ kN}$$

Fordelt på løpekattens fire hjul:

$$Q_{r,max,lk} = \frac{1}{4}(Q_{c2,k} + Q_{h,k}) = \frac{1}{4}(11 + 100) = 27,75 \text{ kN}$$

Lastgruppe 4,5 og 6 med $\varphi_4 = 1,0$

Også her brukes det de samme formlene som for lastgruppe 1.

$$Q_{c2,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c2} = 1,0 \cdot 10 = 10 \text{ kN}$$

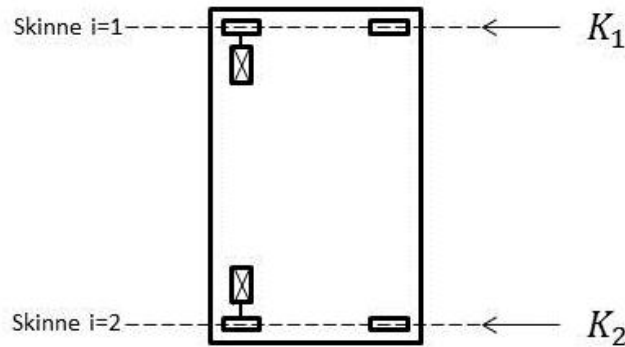
$$Q_{h,k} = \varphi_4 \cdot Q_h = 1,0 \cdot 100 = 100 \text{ kN}$$

Fordelt på de løpekattens fire hjul:

$$Q_{r,max,lk} = \frac{1}{4}(Q_{c2,k} + Q_{h,k}) = \frac{1}{4}(10 + 100) = 27,5 \text{ kN}$$

4.1.4 Horisontale laster

Løpekatten skaper kun horisontale laster i kranbruas lengderetning. Kjørekraftene til løpekatten er illustrert i figur 4.4.



Figur 4.4 Kjørekraftene til løpekatten. Figuren viser løpekatten med kjørekraftene K_1 og K_2 . De stiplede linjene representerer skinnene på kranbrubjelkene. Rektanglene som ligger langs de stiplede linjene er løpekattens hjul.

I «Design example for the application of...» (Sedlacek et al. 2003) vises det gjennom eksempelet at $Q_{r,min}$ hentes fra ubelastet kran i lastgruppe 3,4,5 og 6. Finner kjørekraftene ved å bruke formel 3.20:

$$K = \mu \cdot \sum Q_{r,min,lk}^* = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ kN}$$

Hvor: $\mu = 0,2$ for stål mot stål

$$\sum Q_{r,min,lk}^* = m_w \cdot Q_{r,min,lk} = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ kN}$$

$m_w = 2$ antall single drivhjul

Bruker formel 3.23 for å finne de langsgående kreftene, hvor n_R er antall kranbrubjelker:

$$H_{L,1,lk} = H_{L,2,lk} = \varphi_5 \cdot \frac{K}{n_R} = 1,5 \cdot \frac{1}{2} = 0,75 \text{ kN}$$

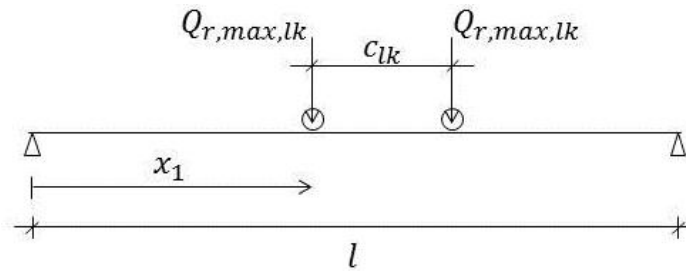
Den horisontale kraften på grunn av akselerering og nedbremsing av løpekatten er gitt ved formel 3.33:

$$H_{T,3} = \frac{1}{10} (Q_{c2} + Q_h) = \frac{1}{10} (10 + 100) = 11 \text{ kN}$$

4.1.5 Interne krefter og momenter

For å regne på maksimale momenter og krefter må man først finne den plasseringen av løpekatten som gir de største momentene.

Det største momentet er i punkt x_1 som vist i figur 4.5.



Figur 4.5 Lastposisjon for maks bøyemoment. x_1 er avstanden fra opplagringen på venstre side til nærmeste hjullast som gir det største momentet. l er kranbruas spennvidde og c_{lk} er avstanden mellom hjulene til løpekatten subskripten **lk** viser at lasten kommer fra løpekatten.

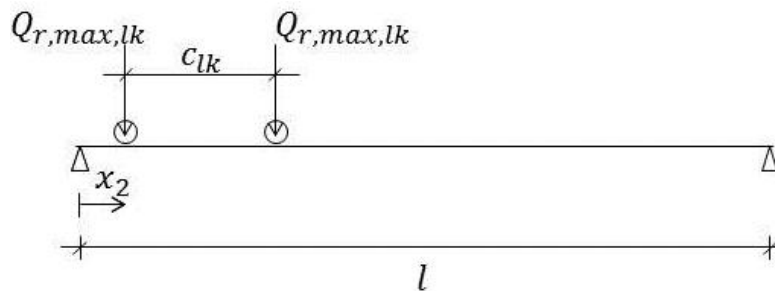
Bruker formel 3.37 for å finne avstand x_1 som gir det største bøyemomentet:

$$x = \frac{2l - c_{lk}}{4} = \frac{2 \cdot 10 - 1}{4} = 4,75 \text{ m}$$

Det største bøyemomentet opptrer i punkt $x_1 = 4,75 \text{ m}$.

Lastposisjonen for størst skjærkraft er gitt i figur 4.6 og formel 3.38 gir følgende:

$$x_2 = \frac{h_w}{2} = \frac{298}{2} = 0,15 \text{ m}$$



Figur 4.6 Lastposisjon for maks skjærkrefter. x_2 er avstanden som gir størst skjærkraft, l er kranbruas spennvidde og c_{lk} er avstanden mellom hjulene på løpekatten.

Krefter på grunn av kranbrubjelkens egenvekt

Egenvekten til kranbrubjelken regnes ut med formel 3.39, tyngdeakselerasjon settes til 10 m/s^2 . Egenvekten blir da:

$$g_k = G_{400} + G_r = 10 \cdot g_{400} + 10 \cdot g_r = 10 \cdot 155 + 10 \cdot 32 = 1870 = 1,87 \text{ kN/m}$$

Setter opp kreftene på grunn av egenvekten med maks bøyemoment i punkt $x_1 = 4,75 \text{ m}$.

Bruker formel 3.40 for å finne opplagringskraften i A med hensyn på bjelkens egenvekt.

$$A(g_k) = \frac{g_k \cdot l}{2} = \frac{1,87 \cdot 10}{2} = 9,35 \text{ kN}$$

Finner momentet i x_1 på grunn av bjelkens egenvekt med formel 3.41.

$$M_{y,k} = A(g_k) \cdot x_1 - \frac{x_1^2 \cdot g_k}{2} = 9,35 \cdot 4,75 - \frac{4,75^2 \cdot 1,87}{2} = 23,31 \text{ kNm}$$

Skjærkraften finner man med formel 3.42.

$$V_{z,k} = M'_{y,k} = A(g_k) - x_1 g_k = 9,35 - 4,75 \cdot 1,87 = 0,47 \text{ kN}$$

Dimensjonerende moment i punkt $x_1 = 4,75 \text{ m}$.

Formel 3.43 gir følgende moment med de variable lastene i punkt x_1 :

$$M_{Q,k,max} = \frac{x_1^2}{l} \cdot 2 \cdot Q_{r,max,lk} = \frac{4,75^2}{10} \cdot 2 \cdot 32,75 = 147,78 \text{ kNm}$$

$$M_{g,k,x_1} = M_{y,k} = 23,31 \text{ kNm}$$

Det dimensjonerende momentet i punkt x_1 blir med bruk av formel 3.47:

$$M_{Ed,max} = \gamma_G \cdot M_{g,k,x_1} + \gamma_Q M_{Q,k,max} = 1,35 \cdot 23,31 + 1,35 \cdot 147,78 = 230,97 \text{ kNm}$$

Dimensjonerende skjærkrefter i punkt $x_1 = 4,75 \text{ m}$

Skjærkraften på grunn av egenvekt er:

$$V_{g,k,x_1} = V_{z,k} = 0,47 \text{ kN}$$

For å finne skjærkraften fra de variable lastene brukes formel 3.48.

$$V_{Q,k} = \frac{2x_1}{l} \cdot Q_{r,max,lk} = \frac{2 \cdot 4,75}{10} \cdot 32,75 = 31,11 \text{ kN}$$

Den dimensjonerende skjærkraften i punkt $x_1 = 4,75 \text{ m}$ blir med bruk av formel 3.49:

$$V_{Ed} = \gamma_G \cdot V_{g,k,x_1,kb} + \gamma_Q \cdot V_{Q,k} = 1,35 \cdot 0,47 + 1,35 \cdot 31,11 = 42,63 \text{ kN}$$

Maksimum skjærkrefter i punkt $x_2 = 0,15 \text{ m}$

Finner skjærkraften fra de variable lastene med formel 3.50:

$$V_{Q,k,max} = \frac{Q_{r,max,lk}(2l - 2x_2 - c_{lk})}{l} = \frac{32,75(2 \cdot 10 - 2 \cdot 0,15 - 1)}{10} = 61,24 \text{ kN}$$

Skjærkraften på grunn av egenvekt blir med formel 3.51 som følger:

$$V_{g,k,x_2} = \frac{g_k l}{2} - g_k x_2 = \frac{1,87 \cdot 10}{2} - 1,87 \cdot 0,15 = 9,07 \text{ kN}$$

Den dimensjonerende skjærkraften i x_2 blir med formel 3.52 som følger:

$$V_{Ed,max} = \gamma_G V_{g,k,x_2} + \gamma_Q \cdot V_{Q,k,max} = 1,35 \cdot 9,35 + 1,35 \cdot 61,24 = 95,30 \text{ kN}$$

Torsjon

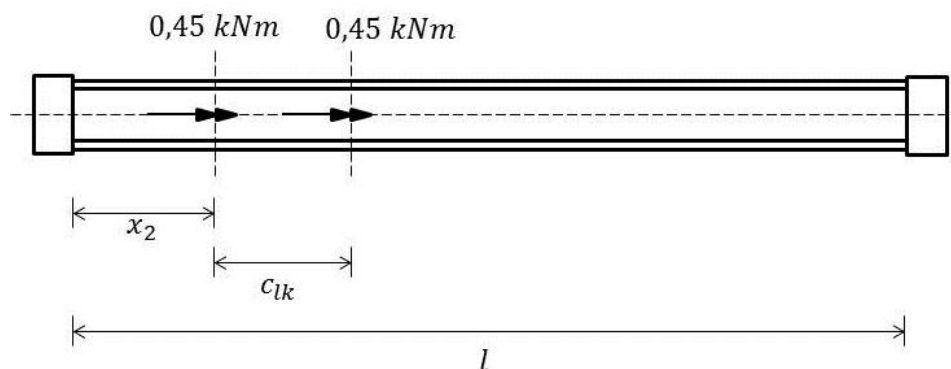
På kranbrubjelken vil det kun være den eksentriske plasseringen av lasten på skinnen som skaper et torsjonsmoment. Finner avstanden fra senter på skinnhodet til plasseringen av lasten finnes ved bruk av formel 3.56:

$$e_y = 0,25 \cdot b_r = 0,25 \cdot 55 = 0,01375 \text{ m}$$

Finner torsjonsmomentene med bruk av formel 3.58 og 3.59. Ettersom begge torsjonsmomentene er like, blir utregningen som følger:

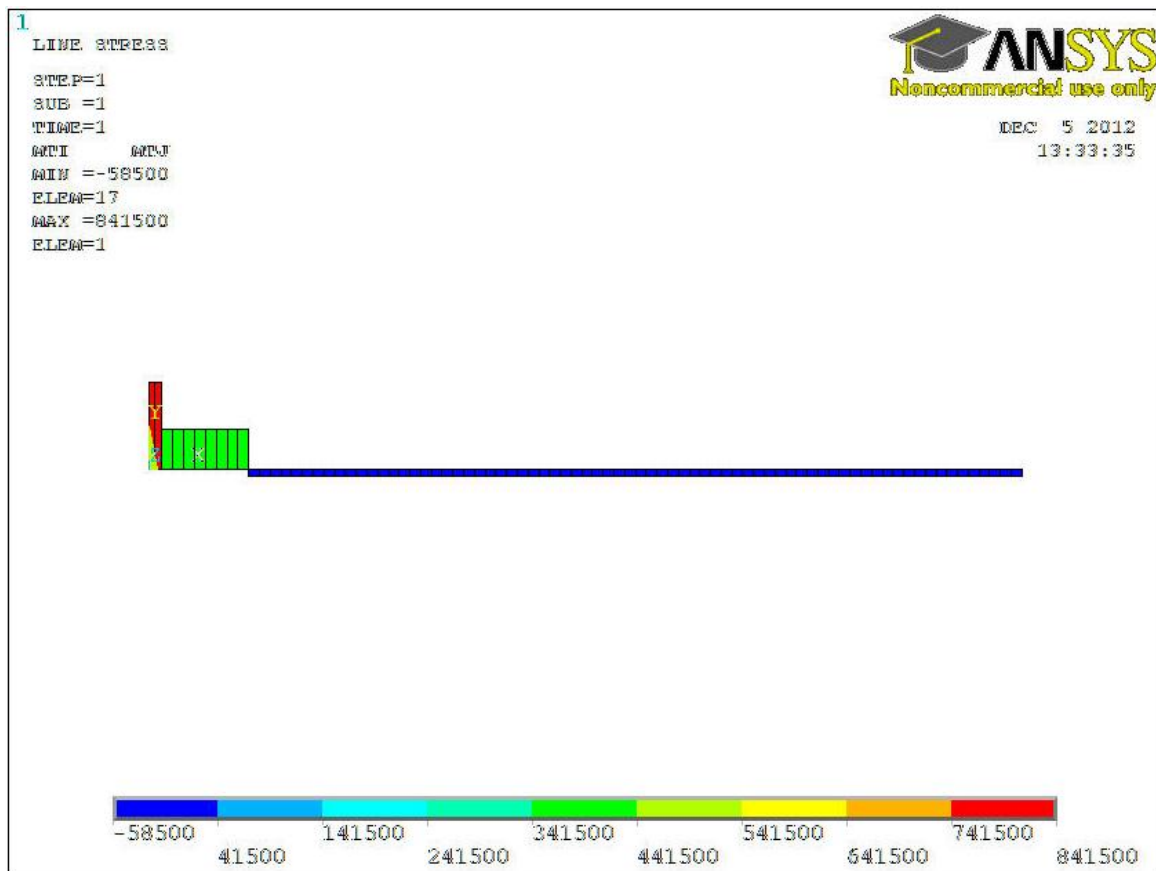
$$M_{t1} = M_{t2} = Q_{r,max,lk} \cdot e_y = 32,75 \cdot 0,01375 = 0,45 \text{ kNm}$$

Figur 4.7 viser de to torsjonsmomentene påført langs kranbrubjelkens x-akse, i den avstanden fra bruvogna som er mest ugunstig og dermed skaper størst torsjonsmoment i bjelken.



Figur 4.7 Torsjonsmomenter påført kranbrua. Rektanglene i hver ende av bjelken er bruvognene. Avstanden fra den venstre bruvognen til det nærmeste torsjonsmomentet er x_2 og c_{lk} er avstanden mellom de to torsjonsmomentene.

Setter dette inn i ANSYS for å finne det største torsjonsmomentet i bjelken, og får følgende verdi:



Figur 4.8 Torsjonsdiagram for kranbrua. Bildet er fra ANSYS og angir torsjonsmomentet i de forskjellige delene av kranbrubjelken. Det største torsjonsmomentet er farget rødt og det minste er blått. Opplagringene er låst i alle retninger.

Diagrammet i figur 4.8 viser torsjonsmomentet langs kranbrua, og viser at torsjonsmomentet er størst mellom opplagringen og det nærmeste påførte torsjonsmoment. Det største torsjonsmomentet blir i følge figuren:

$$\max M_{t,k} = 0,84 \text{ kNm}$$

4.1.6 Bruksgrensetilstand

Kontrollerer at nedbøyningen ikke er større enn maksimale tillatt nedbøyning som er gitt ved formel 3.61:

$$\delta_{z,till} \leq \frac{l}{600} = \frac{10000}{600} = 16,67 \text{ mm}$$

Finner nedbøyninger i kranbrua ved å bruke formel 3.62. Bruker laster med dynamiske faktorer.

$$\delta_z = \frac{\frac{1}{2}(Q_h + Q_{c2}) + \frac{5}{8}(g_k \cdot l)}{E \cdot I_{z,400} \cdot 48} \cdot l^3$$

$$\delta_z = \frac{\frac{1}{2}(120 + 11) \cdot 10^3 + \frac{5}{8}(1,87 \cdot 10) \cdot 10^3}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 57680 \cdot 10^4 \cdot 48} \cdot 10000^3 = 13,28 \text{ mm}$$

Nedbøyningen i kranbrua er 13,3 mm som er mindre enn den tillatte nedbøyningen på 16,67 mm.

4.1.7 Bruddgrensetilstander

Skjærkapasitet

Dersom steget oppfyller kravet i formel 3.69 er det ikke nødvendig med kontroll mot skjærknekking i steget:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta}$$

Hvor: $\eta = 1,2$ hentet fra NA i NS-EN 1993-1-5

$$\frac{298}{13,5} \leq 72 \frac{1}{1,2}$$

$$22,07 \leq 60$$

Det er ikke nødvendig å kontrollere mot skjærknekking i kranbrubjelkens steg.

Kontrollerer om dimensjonerende skjærkrefter er lavere enn skjærkapasiteten i steget

Kravet som må oppfylles for at kapasiteten ikke skal overskrides er gitt ved formel 3.65.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Finner $V_{c,Rd}$ ved å bruke formel 3.66:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{7020(235/\sqrt{3})}{1,05} = 907,10 \text{ kN}$$

Skjærarealet er gitt ved formel 3.67.

$$A_v = A_{400} - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

$$A_v = 198 \cdot 10^2 - 2 \cdot 300 \cdot 24 + (13,5 + 2 \cdot 27)24 = 7020 \text{ mm}^2$$

Kontrollen blir da med den største opptredende skjærkraften som er i punkt x_2 :

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{95,30}{907,10} = 0,11 \leq 1,0$$

Kapasiteten i steget er stor nok for den dimensjonerende skjærkraften.

Skjærkraften er mindre enn den halve plastiske kapasiteten, og det er dermed ikke nødvendig å ta hensyn til skjærkraftens virkning på momentkapasiteten.

Kontrollerer at bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot bøyemoment

Tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet mot bøyemoment dersom kravet gitt i formel 3.70 er oppfylt.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Finner momentkapasiteten for tverrsnittet med formel 3.71:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{3240 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,05} = 725,14 \text{ kNm}$$

Det dimensjonerende momentet er regnet ut tidligere og dette settes inn i formel 3.70 sammen med momentkapasiteten for å kontrollere at tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet.

$$\frac{M_{Ed,max}}{M_{pl,Rd}} = \frac{230,97}{725,14} = 0,32 < 1,0$$

Det er tilstrekkelig momentkapasitet i bjelken.

Torsjon

Kontrollerer at det er tilstrekkelig kapasitet mot skjærspenninger i tverrsnittet med hensyn på torsjon. Det er tilstrekkelig kapasitet dersom kravet i formel 3.72 oppfylles:

$$\frac{\tau_{t,Ed}}{\tau_{y,d}} \leq 1,0$$

Fra figur 4.8 er det største torsjonsmomentet i bjelken satt til:

$$\max M_{t,k} = 0,84 \text{ kNm}$$

Det dimensjonerende torsjonsmomentet blir med formel 3.60:

$$\max M_{t,Sd} = \gamma_Q \cdot \max M_{t,k} = 1,35 \cdot 0,84 = 1,13 \text{ kNm}$$

Setter dette inn i formel 3.73 og får følgende dimensjonerende skjærspenning:

$$\tau_{t,Ed} = \frac{M_{t,Sd} \cdot t_f}{I_t} = \frac{1,13 \cdot 10^6 \cdot 24}{3570 \cdot 10^3} = 7,60 \text{ N/mm}^2$$

Finner skjærkapasiteten ved å bruke formel 3.74:

$$\tau_{y,d} = \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{235 / \sqrt{3}}{1,05} = 129,22 \text{ N/mm}^2$$

Setter den dimensjonerende skjærspenningen og skjærkapasiteten inn i formel 3.73:

$$\frac{\tau_{t,Ed}}{\tau_{y,d}} = \frac{7,60}{129,22} = 0,06 \leq 1,0$$

Det er tilstrekkelig kapasitet i bjelken mot skjær med hensyn på torsjon.

Kontrollerer interaksjon mellom normal- og skjærkrefter:

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 7020 \frac{235/\sqrt{3}}{1,05} = 907,10 \text{ kN}$$

Den nye plastiske skjærkapasiteten hvor det tas hensyn til torsjon regnes ut med formel 3.75 og blir:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}} \cdot V_{pl,Rd}$$
$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{7,60}{1,25(235/\sqrt{3})/1,05}} \cdot 907,10 = 885,50 \text{ kN}$$

Setter den nye skjærkapasiteten inn i formel 3.65 for å kontrollere om kapasiteten er tilstrekkelig også når det er tatt hensyn til torsjonskreftene.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} = \frac{95,30}{885,50} = 0,11 < 1,0$$

Bjelkeprofilen tåler skjærkreftene også når det er påført torsjonsmoment. Det er ikke nødvendig med kontroll for interaksjon mellom skjær og normalkrefter siden dimensjonerende skjærkraft er mindre enn halve skjærkapasiteten når det tatt hensyn til torsjonskreftene.

Vipping av kranbrua

Kontrollerer at kranbrubjelken ikke vipper under belastningen av momentet. For at bjelken ikke skal vippe må kravet i formel 3.81 oppfylles:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

For å finne vippekapasiteten må man først finne det kritiske momentet for vipping. Det kritiske momentet for vipping er gitt i formel 3.76.

$$M_{cr} = \bar{M}_{0,cr} \cdot \mu_{cr}$$

For å finne $\bar{M}_{0,cr}$ brukes formel 3.80:

$$\bar{M}_{0,cr} = \left(\frac{\pi}{l}\right) \sqrt{GI_T \cdot EI_z}$$

$$\bar{M}_{0,cr} = \left(\frac{\pi}{10000}\right) \sqrt{81 \cdot 10^3 \cdot 3570 \cdot 10^3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 108,2 \cdot 10^6} = 805,29 \text{ kNm}$$

Det dimensjonsløse kritiske momentet, μ_{cr} , er bestemt av en rekke faktorer som regnes ut som følger:

Torsjonsparameteren etter formel 3.77, hvor k_w er hentet fra tabell 3.13:

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w l} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{1 \cdot 10000} \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 3817 \cdot 10^9}{81 \cdot 10^3 \cdot 3570 \cdot 10^3}} = 0,523$$

Lastangrepspunktets koordinat i forhold til skjærsenteret etter formel 3.78, hvor faktoren k_z er hentet fra tabell 3.13:

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z l} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}}$$

Avstanden z_g er halve høyden på bjelken pluss høyden på skinnen.

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot 265}{1 \cdot 10000} \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 108,2 \cdot 10^6}{81 \cdot 10^3 \cdot 3570 \cdot 10^3}} = 0,738$$

Det dimensjonsløse momentet blir da ved bruk av formel 3.79, hvor k_w , C_1 og C_2 er fra tabell 3.13:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + k_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g)^2} - (C_2 \zeta_g) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,04}{1} \left[\sqrt{1 + 0,523^2 + (0,43 \cdot 0,738)^2} - (0,43 \cdot 0,738) \right] = 0,894$$

Det ideelle momentet for vipping blir da:

$$M_{cr} = \bar{M}_{cr} \cdot \mu_{cr} = 805,29 \cdot 0,894 = 719,93 \text{ kNm}$$

Til utregningen av vippekapasiteten er det nødvendig å finne følgende:

Relativ slankhet for vipping fra formel 3.85:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{3240 \cdot 10^3 \cdot 235}{719,93 \cdot 10^6}} = 1,028$$

Setter dette inn i formelen 3.84, hvor $\bar{\lambda}_0 = 0,4$ og $\beta = 0,75$:

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,34 \cdot (1,028 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,028^2] = 1,003$$

Finner reduksjonsfaktoren med formel 3.83:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,003 + \sqrt{1,003^2 + 0,75 \cdot 1,028^2}} = 0,427$$

Kan nå bestemme vippekapasiteten med formel 3.82:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,pl} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{b,Rd} = 0,427 \cdot 3240 \cdot 10^3 \frac{235}{1,05} = 342,27 \text{ kNm}$$

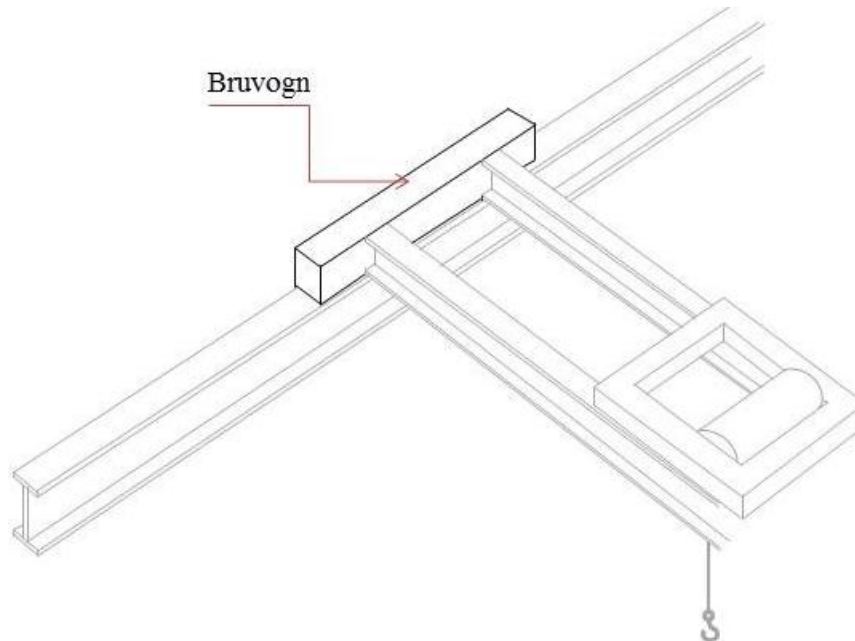
Setter det dimensjonerende momentet som er beregnet tidligere i dette kapittelet og vippekapasiteten inn i formel 3.81 for å kontrollere at det er tilstrekkelig kapasitet mot vipping.

$$\frac{M_{Ed,max}}{M_{b,Rd}} = \frac{230,97}{347,27} = 0,67 < 1,0$$

Bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot vipping.

4.2 Bruvogn

I dette kapitlet kontrolleres kapasiteten til bruvogna. Tverrsnittet kontrolleres mot skjærkapasitet og momentkapasitet i bruddgrensetilstanden og for nedbøyning i bruksgrensetilstanden.

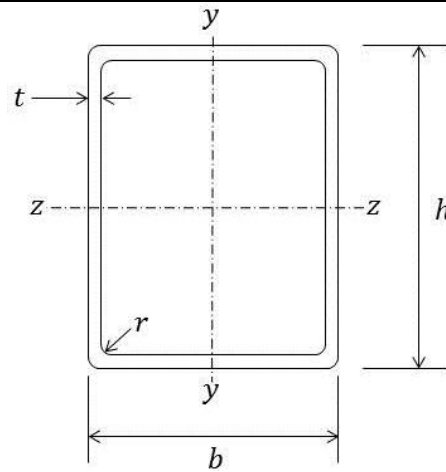


Figur 4.9 Bruvogn. Bruvogna er delen som er markert med i sort. Resten av løpekranen er farget grå.

4.2.1 Dimensjonering og klassifisering av tverrsnitt

Klassifiseringen av tverrsnittet til det rektangulære hulprofilet som skal brukes til bruvogna blir gjort etter kapitel 5 i NS-EN 1993-1-1. I tabell 4.3 er dimensjoner og størrelser gitt til det rektangulære hulprofilet som er valgt til bruvogna.

Tabell 4.3 Dimensjoner og størrelser på rektangulært hulprofil. Illustrasjonen i tabellen viser hvilke deler av skinnen de forskjellige størrelsene hører til.



Dimensjoner				Tverrsnitt	Vekt pr. m	Tregghetsmoment	Plastisk tverrsnittmodul
h	b	t	r	A_{vogn}	g_{vogn}	I_y	$W_{pl,y}$
mm	mm	mm	mm		kN	$\cdot 10^3$ mm ⁴	$\cdot 10^3$ mm
200	150	10	10*	6550	0,514	36210	441

I tabell 4.3 er verdien til radien markert med en *, dette fordi denne verdien er en antakelse og ikke en oppgitt verdi.

Med en antatt indre radier på 10 mm vil den effektive høyden og bredden bli som følger:

$$c_h = h - 2t - 2r = 200 - 4 \cdot 10 = 160 \text{ mm}$$

$$c_b = b - 2t - 2r = 150 - 4 \cdot 10 = 110 \text{ mm}$$

Hulprofilet er dobbeltsymmetrisk og det brukes plastisk nøytralakse. Bruker formel 3.6 for å finne forholdet mellom plastisk nøytralakse og den effektive høyden:

$$\alpha_h = \frac{z_{s,pl}}{c_h} = \frac{\frac{1}{2}h}{c_h} = \frac{100}{160} = 0,625$$

Sjekker om steget har tverrsnittklasse 1. Med α større enn 0,5 finner man følgende krav fra tabell 3.6 oppfylles:

$$\frac{c_h}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha_h}$$

$$\frac{160}{10} \leq \frac{36 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}}}{0,625}$$

$$16,00 < 57,60$$

Sjekker om de horisontale elementene av profilet er i tverrsnittklasse 1:

Bruker formel 3.6 for å finne α_b :

$$\alpha_b = \frac{z_{s,pl}}{c_b} = \frac{75}{110} = 0,682$$

Sjekker om steget har tverrsnittklasse 1. Med α større enn 0,5 finner man følgende krav fra tabell 3.6 som må oppfylles:

$$\frac{c_b}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha_b}$$

$$\frac{110}{10} \leq \frac{36 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}}}{0,682}$$

$$11,00 < 52,79$$

Begge elementene faller inn under tverrsnittklasse 1, dermed er hele profilet i tverrsnittklasse 1.

4.2.2 Vertikale krefter

Det vil være størst vertikale krefter fra kranbrua når kranen har maks belastning og løpekranen er nærmest bruvogna. Maksimums krefter på bruvogna blir:

Egenvekten til kranbanebjelken og skinnen blir:

$$F_{Ag} = \frac{(g_{400} + g_r) \cdot l}{2} = \frac{1,55 + 0,32}{2} \cdot 10 = 9,35 \text{ kN}$$

Hvor g_{400} vekt per lengde til kranbrubjelken og g_r er vekt per lengde til kranskinnen.

Bruker momentligning for å finne opplagringskreftene i A med belastning fra løpekatten:

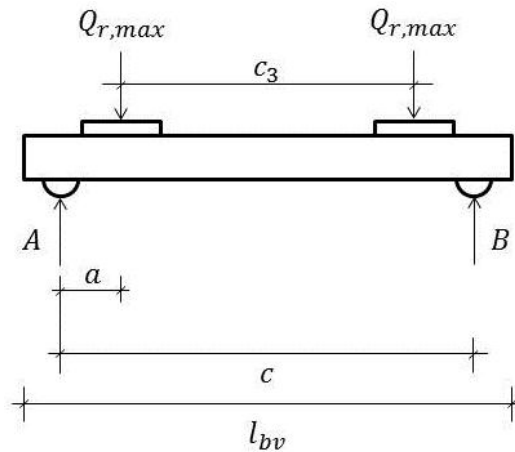
$$\sum M = 0$$

$$F_A \cdot l - Q_{r,max,lk}(l - x_2) - Q_{r,max,lk}(l - (x_2 + c_{lk})) = 0$$

$$F_{AQ} = \frac{Q_{r,max,lk}(2l - 2x_2 - c_{lk})}{l} = \frac{32,75(2 \cdot 10 - 2 \cdot 0,15 - 1)}{10} = 61,24 \text{ kN}$$

$$F_{A,tot} = F_{AQ} + F_{Ag} = 9,35 + 61,24 = 70,59 \text{ kN}$$

Lastene fra kranbrua settes opp som punktlaster på bruvogna som vist i figur 4.10. I figuren har kraften $F_{A,tot}$ blitt byttet med $Q_{r,max}$.



Figur 4.10 Vertikale krefter på bruvogna. Det lange rektangelet er bruvogna, firkantene på toppen av bruvogna er kranbrubjerkene og halvsirklene på bunnen av bruvogna er hjulene. Lastene fra kranbrubjerkene settes som punktlaster. **A** er hjulet på venstre side og **B** er hjulet på høyre side. **a** er avstanden fra senteret på hjulene til punktlasten $Q_{r,max}$, **c** er avstanden mellom bruvognas hjul og l_{bv} er den totale lengden på bruvogna.

Finner opplagringskreftene i hjulene til bruvogna. Med symmetri blir opplagringskreftene som følger:

$$F_A = F_B = \frac{1}{2}(Q_{r,max} + Q_{r,max}) + \frac{1}{2}(g_{bv} \cdot l_{bv}) = 70,59 + \frac{1}{2}(0,514 \cdot 3,5) = 71,49 \text{ kN}$$

4.2.3 Bruksgrensetilstand

I bruksgrensetilstanden til bruvogna regnes det på nedbøyning. Den største tillatte nedbøyningen er høyden fra kranbanen til undersiden av bruvogna, dersom nedbøyningen overskrider dette vil bruvogna være i kontakt med kranbaneskinnen, som naturligvis vil hindre bruvogna å bevege seg. Høyden mellom bruvogna og kranbanen avhenger på størrelsen til hjulene og hvor høyt eller lavt på bruvogna hjulenes aksling er plassert. Siden det i denne oppgaven ikke sees på oppbygningen av bruvogna med de forskjellige komponentene gjøres det en antakelse om at bruvogna har en klaring på 15 mm.

Nedbøyningen av bruvogna på grunn av de variable lastene beregnes ved bruk av formel 3.63:

$$\delta_Q = \frac{Q_{r,max} \cdot l^3}{24EI} \cdot \left(3 \left(\frac{a}{c} \right) - 4 \left(\frac{a}{c} \right)^3 \right)$$
$$\delta_Q = \frac{70,59 \cdot 10^3 \cdot 3000^3}{24 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 36210 \cdot 10^3} \cdot \left(3 \cdot \left(\frac{500}{3000} \right) - 4 \cdot \left(\frac{500}{3000} \right)^3 \right) = 5,03 \text{ mm}$$

Nedbøyning på grunn av egenvekten til bruvogna beregnes med formel 3.64:

$$\delta_g = \frac{5 \cdot g_{bv} \cdot c^4}{348EI}$$
$$\delta_g = \frac{5 \cdot 0,514 \cdot 3000^4}{348 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 36210 \cdot 10^3} = 0,08 \text{ mm}$$

Den totale nedbøyningen blir da summen av de to overnevnte nedbøyningene:

$$\delta_{max} = \delta_Q + \delta_g = 5,03 + 0,08 = 5,11 \text{ mm}$$

Nedbøyningen overskrider ikke høyden på klaringen.

4.2.4 Bruddgrensetilstander

De største skjærkreftene vil være ved hjulene til bruvogna og bøyemomentet vil være størst i senter av bjelken. De dynamiske faktorene er medregnet i lastene fra kranbrua og løpekatten.

Den dimensjonerende skjærkraften er satt sammen av skjærkrefter på grunn av lastene fra kranbrua og bruvognas egenvekt.

$$V_{Q,k,max} = 70,59 \text{ kN}$$

I skjærkraften på grunn av egenvekten brukes hele bruvognas lengde. Bruker formel 3.47 for å beregne skjærkraften, men det er ikke nødvendig å ta hensyn til et bestemt punkt for å finne

den største skjærkraften, dermed blir skjærkraften på grunn av egenvekten til bjelken som følger:

$$V_{g,k} = \frac{g_{bv} \cdot l}{2} = \frac{0,514 \cdot 3,5}{2} = 0,90 \text{ kN}$$

Den dimensjonerende skjærkraften ved hjulene beregnes med formel 3.49 og blir:

$$V_{Ed} = \gamma_g \cdot V_{g,k} + \gamma_Q \cdot V_{Q,k,max} = 1,35 \cdot 0,90 + 1,35 \cdot 70,59 = 96,51 \text{ kN}$$

Kapasiteten mot skjær i profilet settes opp med formel 3.66:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{3742,86 \cdot \left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)}{1,05} = 483,64 \text{ kN}$$

Hvor skjærarealet for rektangulært hulprofil belastet parallelt med profilets høyde beregnes med formel 3.68:

$$A_v = \frac{A \cdot h}{b + h} = \frac{6550 \cdot 200}{150 + 200} = 3742,86 \text{ mm}^2$$

Kontrollerer at tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet mot skjærkreftene med formel 3.65:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{96,51}{483,64} = 0,20 < 1,0$$

Den dimensjonerende skjærkraften overskrider ikke kapasiteten og profilet tåler de skjærkreftene det blir utsatt for.

Kontrollerer om kranbrua tåler bøyemomentet det er utsatt for. Sjekker da om det dimensjonerende momentet er mindre enn kapasiteten.

Det største momentet i bruvogna oppstår i midten og beregnes som følger:

$$M_{k,max} = F_A \cdot \frac{c}{2} - Q_{r,max} \cdot \frac{c_3}{2} - g_{bv} \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{c}{4}$$

$$M_{k,max} = \frac{F_A \cdot c}{2} - \frac{Q_{r,max} \cdot c_3}{2} - \frac{g_{bv} \cdot c^2}{8}$$

$$M_{k,max} = 71,49 \cdot \frac{3}{2} - 70,59 \cdot \frac{2}{2} - \frac{0,514 \cdot 3^2}{8} = 36,07 \text{ kNm}$$

Her er bidraget fra både egenvekten og lasten fra kranbrua medregnet i momentet og partialfaktorene har samme verdi, $\gamma_G = \gamma_Q = 1,35$. Formel 3.46 tilpasses og det dimensjonerende momentet blir:

$$M_{Ed} = 1,35 \cdot M_{k,max} = 1,35 \cdot 36,07 = 48,69 \text{ kNm}$$

Bruker formel 3.71 for å finne plastisk momentkapasitet:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{441 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,05} = 98,70 \text{ kNm}$$

Kontrollerer at det dimensjonerende momentet er lavere enn momentkapasiteten til profilet ved bruk av formel 3.70:

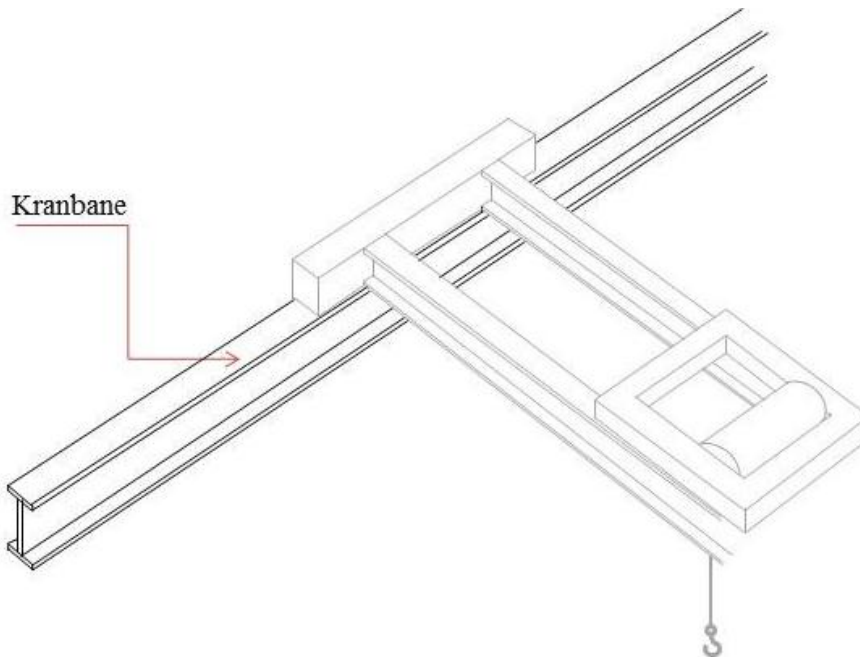
$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{48,69}{98,70} = 0,49 < 1,0$$

Ser at det dimensjonerende momentet er lavere enn kapasiteten og profilet har tilstrekkelig kapasitet mot moment.

I bruvogna er den dimensjonerende skjærkraften rundt en femtedel av kapasiteten og det er dermed kan man se bort fra skjærkraftens virkning på momentkapasiteten.

4.3 Kranbane

Kranbanen har et spenn mellom støttesøylene på 10 meter og det brukes et HE 500 B-profil til bjelken. På toppflensen til bjelken ligger en kranbinde av typen A55 som kranen kjører på. Kranbanebjelken er gaffellagret til støttesøylene. I dette eksempelet ses det kun på kranbanen mellom to slike opplagringer.



Figur 4.11 Kranbanen. Kranbanen er delen som er markert med i sort. Resten av løpekranen er farget grå.

4.3.1 Dynamiske faktorer

Det brukes samme verdier på de dynamiske faktorene til kranbanen som med kranbrua.

$$\varphi_1 = 1,1 \text{ øvre verdi}$$

$$\varphi_2 = 1,2$$

$$\varphi_3 = 1,0$$

$$\varphi_4 = 1,0$$

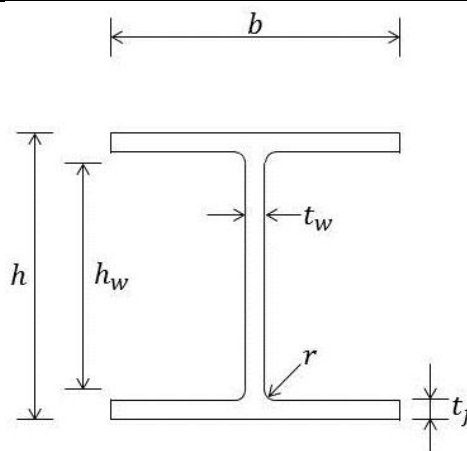
$$\varphi_5 = 1,5$$

4.3.2 Dimensjoner og klassifisering av tverrsnitt

Dimensjoner

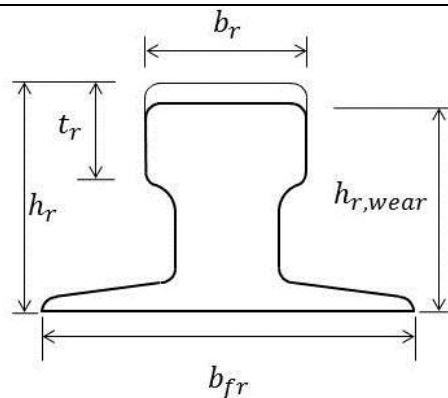
Dette eksempelet settes opp med HE 500 B til kranbanebjelkene. De relevante dimensjoner og størrelser til varmvalsede HE 500 B bjelker er gitt i tabell 4.4 og dimensjoner til kranskinnen er gitt i tabell 4.5

Tabell 4.4 Dimensjoner og størrelser på HE 500 B. Illustrasjonen i tabellen viser hvilke deler størrelsene hører til.



Dimensjoner					Tverrsnitt	Vekt per m	Plastisk tverrsnittmodul	Annet arealmoment	Annet arealmoment for torsjon	Hvelvingsmotstand
h	b	t_w	t_f	r	A_{500}	g_{500}	$W_{pl,y}$	I_z	I_t	I_w
mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	kg/m	· 10 ³ mm ³	· 10 ⁶ mm ⁴	· 10 ³ mm ⁴	· 10 ⁹ mm ⁶
500	300	14,5	28	27	239	187	4820	126,2	5400	7018

Tabell 4.5 Dimensjoner og verdier til kranskinne A55. Illustrasjonen i tabellen viser hvilke deler av skinnen de forskjellige størrelsene hører til.



Betegnelse	Dimensjoner				Tverrsnitt	Annet arealmoment	Vekt pr m
	b_r mm	h_r mm	b_{fr} mm	t_r mm	A_r $mm^2 \cdot 10^3$	I_y $mm^4 \cdot 10^6$	g_r kg/m
A55	55	65	150	25	4,07	1,82	32,0
Med hensyn for slitasje, 25 % av t_r							
A55	55	58,75*	150	18,75*	3,74*	1,36*	

I tabell 4.5 er tallene markert med * med hensyn på slitasjen som settes til 25 % av tykkelsen på skinnhodet, på samme måte som kranbrua.

Tverrsnittklassifisering

Steget

Bruker formel 3.6 for å finne forholdet mellom plastisk nøytralakse og den stegets høyde mellom flensene:

$$\alpha = \frac{z_{s,pl}}{h_w} = \frac{250}{390} = 0,641$$

I et dobbeltsymmetrisk tverrsnitt blir $z_{s,p}$ hvor arealet over denne akse er lik arealet under, dermed den halve høyden for et h-profil. Stegets høyde mellom flensene er gitt ved formel 3.7:

$$h_w = c = h - 2(r + t_f) = 500 - 2(27 + 28) = 390 \text{ mm}$$

Sjekker om steget har tverrsnittklasse 1. Med α større enn 0,5 skal følgende krav fra tabell 3.6 oppfylles:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{390}{14,5} \leq \frac{396 \cdot 1}{13 \cdot 0,64 - 1}$$

$$26,90 \leq 54,10$$

Steget oppfølger kravet og får tverrsnittklasse 1.

Flensen

Bredden c til flensen finner man med formel 3.8:

$$c = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{300 - 14,5 - 2 \cdot 27}{2} = 115,75 \text{ mm}$$

Dersom følgende krav fra tabell 3.7 oppfylles har flensen tverrsnittklasse 1:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\frac{115,75}{28} \leq 9 \cdot 1$$

$$4,13 < 9$$

Flensen er også innenfor tverrsnittklasse 1. Dermed har hele tverrsnittet i klasse 1.

4.3.3 Vertikale laster

I lastpåvirkningen fra løpekatten og heiselasten tas det hensyn til plasseringen av løpekatten i forhold til kranbanen. Dette kommer frem i beregningene og figurene i dette kapitlet.

Bestemmer de variable lastene Q for kran, løpekatt og heiselast

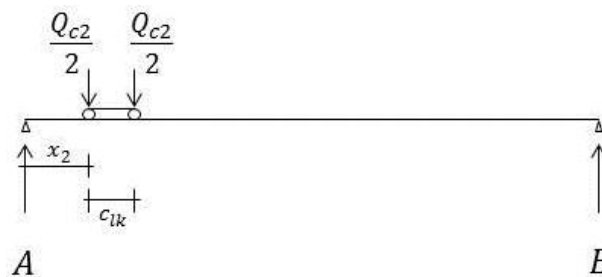
Kranens egenvekt, uten løpekatt, er satt sammen av egenvekten til kranbrubjerkene, skinnene og bruvogner, og blir som følger:

$$Q_{c1} = 2 \left((g_{400} + g_r) \cdot l_{bru} + g_{vogn} \cdot l_{vogn} \right)$$

Egenvektene gjøres om fra kg/m til kN/m :

$$Q_{c1} = 2 \left((1,87 + 0,32) \cdot 10 + 0,514 \cdot 3,5 \right) = 47,40 \text{ kN}$$

Lasten fra løpekatten blir størst når løpekatten er plassert nærmest den kranbanen man ønsker å studere. Posisjonen til løpekatten er vist i figur 4.12. Finner lasten fra løpekatten:



Figur 4.12 Lastposisjon for løpekatt. Dette er posisjonen hvor løpekatten er så nærme kranbanen som den kommer og dermed posisjonen hvor lasten fra løpekatten på kranbanen er størst. **A** og **B** angir opplagringspunktene, eller de to kranbanene. x_2 er den minste avstanden løpekatten kan ha til kranbanebjelken og c_{lk} er avstanden mellom hjulene til løpekatten.

Momentligningen gir:

$$A = \frac{\frac{Q_{c2}}{2} \cdot (l - x_2) + \frac{Q_{c2}}{2} (l - (x_2 + c_{lk}))}{l}$$

$$A = \frac{5 \cdot (10 - 0,15) + 5 \cdot (10 - (0,15 + 1))}{10} = 9,35 \text{ kN}$$

Summen av de vertikale kreftene lik null gir følgende opplagringskrefter i B, hvor løpekatten er lengst unna:

$$B = 2 \left(\frac{Q_{c2}}{2} \right) - A = 10 - 9,35 = 0,65 \text{ kN}$$

Dette gir en maksimumslast og en minimumslast på kranbanen fra løpekatten:

$$Q_{c2,A} = 9,35 \text{ kN} \quad \text{og} \quad Q_{c2,B} = 0,65$$

Lasten fra heiselasten følger samme oppsett som løpekatten og blir:

$$A = \frac{\frac{Q_h}{2} \cdot (l - x_2) + \frac{Q_h}{2} \cdot (l - (x_2 + c_{lk}))}{l}$$

$$A = \frac{50 \cdot (10 - 0,15) + 50 \cdot (10 - (0,15 + 1))}{10} = 93,50 \text{ kN}$$

Summen av de vertikale kreftene lik null gir:

$$B = 2 \left(\frac{Q_h}{2} \right) - A = 100 - 93,50 = 6,50 \text{ kN}$$

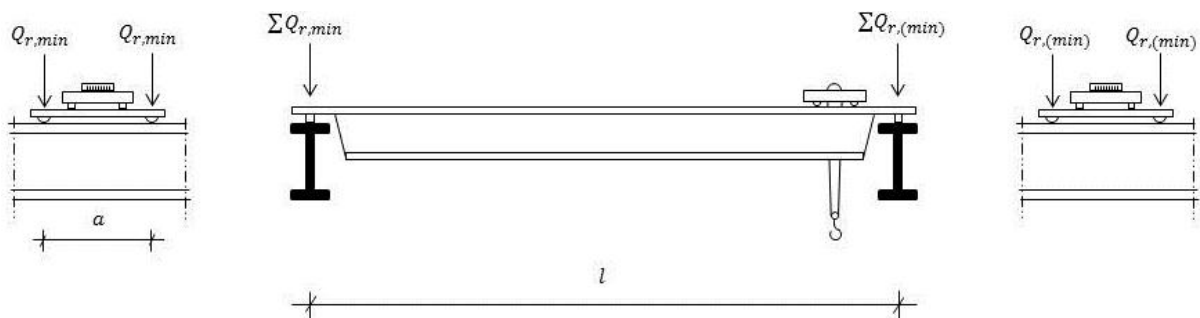
Dette gir en maksimumslast og minimumslast på kranbanen fra heiselasten:

$$Q_{h,A} = 93,50 \text{ kN} \quad \text{og} \quad Q_{h,B} = 6,50 \text{ kN}$$

Lastene med dynamiske faktorer i de forskjellige lastgruppene

Ved ubelastet kran

Figur 4.13 viser lastarrangementet for en ubelastet kran.



Figur 4.13 Lastfordeling med ubelastet kran. I illustrasjonen i midten av figuren er de fargede h-profilene kranbanene og den hvite bjelken er kranbrua, på toppen til høyre er løpekatten. Den siden av kranen hvor løpekatten står har den største lasten og har subskripten (**min**), på motsatt side av kranen hvor lasten er minst brukes subskripten **min**. Illustrasjonene til høyre og venstre i figuren viser lasten fra hvert hjul.

Lastgruppe 1 og 2 med $\varphi_1 = 1,1$

Lasten fra kranen sammen med dynamisk faktor beregnes med formel 3.9:

$$Q_{c1,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c1} = 1,1 \cdot 47,40 = 52,14 \text{ kN}$$

Lastene fra løpekatten sammen med dynamisk faktor beregnes med formel 3.10:

$$Q_{c2,A,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2,A} = 1,1 \cdot 9,35 = 10,30 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,B,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2,B} = 1,1 \cdot 0,65 = 0,72 \text{ kN}$$

Last på den mest belastede siden av kranen beregnes med formel 3.11:

$$\sum Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{c1,k} + Q_{c2,A,k} = \frac{1}{2} \cdot 52,14 + 10,30 = 36,37 \text{ kN}$$

Bruker formel 3.12 for å finne lastene fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \cdot 36,37 = 18,19 \text{ kN}$$

Last på den minst belastede siden av kranen beregnes med formel 3.13:

$$\sum Q_{r,min} = \frac{1}{2} Q_{c1,k} + Q_{c2,B,k} = \frac{1}{2} \cdot 47,40 + 0,72 = 24,42 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul etter formel 3.14:

$$Q_{r,min} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,min} = \frac{1}{2} \cdot 24,42 = 12,21 \text{ kN}$$

Lastgruppe 3,4,5, og 6 med $\varphi_4 = 1,0$

Bruker de samme formlene som ved lastgruppe 1 og 2.

$$Q_{c1,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c1} = 1,0 \cdot 47,40 = 47,40 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,A,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c2,A} = 1,0 \cdot 9,35 = 9,35 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,B,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c2,B} = 1,0 \cdot 0,65 = 0,65 \text{ kN}$$

Last på den mest belastede siden av kranen:

$$\sum Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{c1,k} + Q_{c2,A,k} = \frac{1}{2} \cdot 47,40 + 9,35 = 33,05 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,(min)} = \frac{1}{2} \cdot 33,05 = 16,53 \text{ kN}$$

Last på den minst belastede siden av kranen:

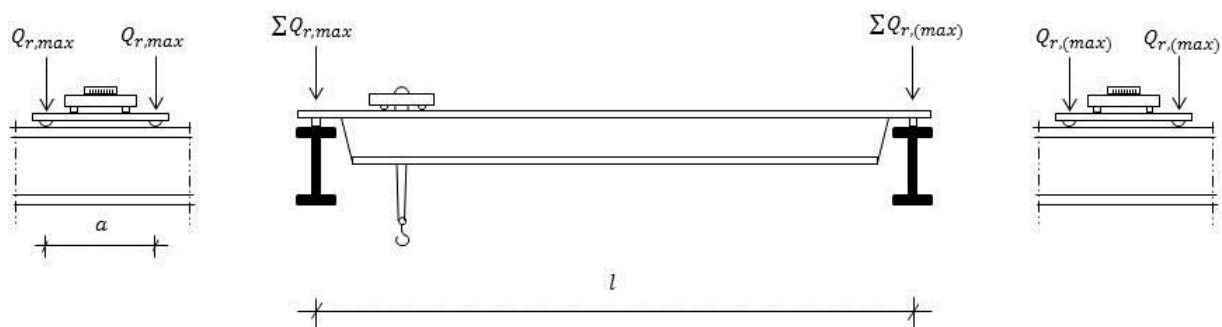
$$\Sigma Q_{r,min} = \frac{1}{2} Q_{c1,k} + Q_{c2,B,k} = \frac{1}{2} \cdot 47,40 + 0,65 = 24,35 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,min} = \frac{1}{2} \Sigma Q_{r,min} = 12,18 \text{ kN}$$

Ved belastet kran

Figur 4.14 viser lastarrangementet for en belastet kran.



Figur 4.14 Lastfordeling med belastet kran. I illustrasjonen i midten av figuren er de fargede h-profilene kranbanene og den hvite bjelken er kranbrua, på toppen er løpekatten. Den siden hvor løpekatten står har den største lasten og har subskripten **max**, på motsatt side av kranen hvor lasten er minst brukes subskripten (**max**). Illustrasjonene til høyre og venstre i figuren viser lasten på hvert hjul.

Lastgruppe 1 med $\varphi_1 = 1,1$ og $\varphi_2 = 1,2$

Bruker formel 3.9 for å finne lasten fra kranen:

$$Q_{c1,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c1} = 1,1 \cdot 47,40 = 52,14 \text{ kN}$$

Bruker formel 3.10 for å finne lastene fra løpekatten:

$$Q_{c2,A,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2,A} = 1,1 \cdot 9,35 = 10,29 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,B,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2,B} = 1,1 \cdot 0,65 = 0,72 \text{ kN}$$

Lastene fra heiselasten beregnes med formel 3.15:

$$Q_{h,A,k} = \varphi_2 \cdot Q_{h,A} = 1,2 \cdot 93,50 = 112,20 \text{ kN}$$

$$Q_{h,B,k} = \varphi_2 \cdot Q_{h,B} = 1,2 \cdot 6,5 = 7,80 \text{ kN}$$

Last på den minst belastede siden av kranen regnes ut med formel 3.16:

$$\sum Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{c1,k} + Q_{c2,B,k} + Q_{h,B,k} = \frac{1}{2} 52,14 + 0,72 + 7,80 = 34,59 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul etter formel 3.17:

$$Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot 34,59 = 17,30 \text{ kN}$$

Last på den mest belastede siden beregnes med formel 3.18:

$$\sum Q_{r,max} = \frac{1}{2} Q_{c1,k} + Q_{c2,A,k} + Q_{h,A,k} = \frac{1}{2} \cdot 52,14 + 10,29 + 112,20 = 148,56 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul blir etter formel 3.19:

$$Q_{r,max} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,max} = 74,28 \text{ kN}$$

Lastgruppe 2 med $\varphi_1 = 1,1$ og $\varphi_3 = 1,0$

Bruker de samme formlene som ble brukt for lastgruppe 1.

$$Q_{c1,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c1} = 1,1 \cdot 47,40 = 52,14 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,A,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2,A} = 1,1 \cdot 9,35 = 10,29 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,B,k} = \varphi_1 \cdot Q_{c2,B} = 1,1 \cdot 0,65 = 0,72 \text{ kN}$$

$$Q_{h,A,k} = \varphi_3 \cdot Q_{h,A} = 1,0 \cdot 93,5 = 93,50 \text{ kN}$$

$$Q_{h,B,k} = \varphi_3 \cdot Q_{h,B} = 1,0 \cdot 6,5 = 6,50 \text{ kN}$$

Last på den minst belastede siden av kranen:

$$\sum Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{c1,k} + Q_{c2,B,k} + Q_{h,B,k} = \frac{1}{2} 52,14 + 0,72 + 6,50 = 33,29 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot 33,29 = 16,65 \text{ kN}$$

Last på den mest belastede siden av kranen:

$$\sum Q_{r,max} = \frac{1}{2} Q_{c1,k} + Q_{c2,A,k} + Q_{h,A,k} = \frac{1}{2} \cdot 52,14 + 10,29 + 93,50 = 129,86 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,max} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,max} = 64,93 \text{ kN}$$

Lastgruppe 4,5,6 med $\varphi_4 = 1,0$

Bruker de samme formlene som ble brukt for lastklasse 1.

$$Q_{c1,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c1} = 1,0 \cdot 47,40 = 47,40 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,A,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c2,A} = 1,0 \cdot 9,35 = 9,35 \text{ kN}$$

$$Q_{c2,B,k} = \varphi_4 \cdot Q_{c2,B} = 1,0 \cdot 0,65 = 0,65 \text{ kN}$$

$$Q_{h,A,k} = \varphi_4 \cdot Q_{h,A} = 1,0 \cdot 93,5 = 93,50 \text{ kN}$$

$$Q_{h,B,k} = \varphi_4 \cdot Q_{h,B} = 1,0 \cdot 6,5 = 6,50 \text{ kN}$$

Last på den minst belastede siden av kranen:

$$\sum Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot Q_{c1,k} + Q_{c2,B,k} + Q_{h,B,k} = \frac{1}{2} \cdot 47,40 + 0,65 + 6,50 = 30,85 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,(max)} = \frac{1}{2} \cdot 30,85 = 15,43 \text{ kN}$$

Last på den mest belastede siden av kranen:

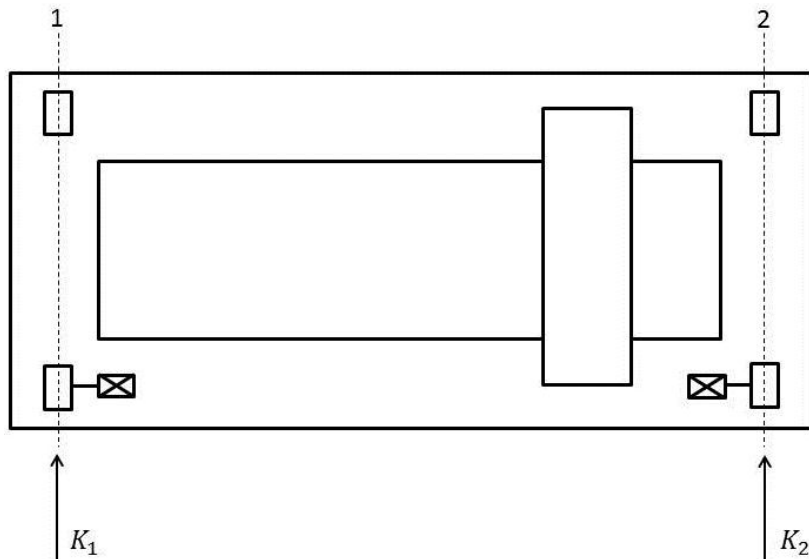
$$\sum Q_{r,max} = \frac{1}{2} Q_{c1,k} + Q_{c2,A,k} + Q_{h,A,k} = \frac{1}{2} \cdot 47,40 + 9,35 + 93,50 = 126,55 \text{ kN}$$

Fordelt på kranens hjul:

$$Q_{r,max} = \frac{1}{2} \sum Q_{r,max} = 63,28 \text{ kN}$$

4.3.4 Horisontale laster

Figur 4.15 viser kjørekraftene til kranen.



Figur 4.15 Kjørekrefter fra kranen. Kran med enkeldrift på to av hjulene, sett fra oversiden. De stiplede linjene representerer de to kranbanene. Motorene som driver hjulene vises som et rektangel med to diagonale linjer, de fire rektanglene som ligger på de stiplede linjene er kranens hjul. Rektangelet som går parallelt med kranbanene er løpekatten. De to pilene viser kjørekraftene.

Finner først kjørekraften, K med formel 3.20:

$$K = K_1 + K_2 = \mu \cdot \sum Q_{r,min}^*$$

Det brukes enkle drivhjul og ikke sentral drivhjul og bruker formel 3.21 for å finne $\sum Q_{r,min}^*$:

$$\sum Q_{r,min}^* = m_w \cdot Q_{r,min} = 2 \cdot 12,18 = 24,36 \text{ kN}$$

Hvor: $m_w = 2$ er antall drivhjul
 $\mu = 0,2$ er friksjonsfaktoren, som settes til 0,2 i NA i NS-EN 1991-3 for stål mot stål

$$K = 0,2 \cdot 24,36 = 4,87 \text{ kN}$$

Langsgående krefter

Bruker formel 3.23 for å finne de langsgående kreftene:

$$H_{L,1} = H_{L,2} = \varphi_5 \cdot \frac{K}{n_R} = 1,5 \cdot \frac{4,87}{2} = 3,65 \text{ kN}$$

Hvor: $n_R = 2$ er antall kranbanebjelker

$\varphi_5 = 1,5$ jevn endring i krefter

Tverrgående krefter

I denne utregningen følges eksempelet i «Design example for the application of...» (Sedlacek et al. 2003) hvor det brukes verdiene $\sum Q_{r,max}$ og $\sum Q_{r(max)}$ hvor det har blitt brukt den dynamiske faktoren φ_4 .

$$\sum Q_r = \sum Q_{r,max} + \sum Q_{r,(max)} = 126,55 + 30,85 = 157,40 \text{ kN}$$

$$\xi_1 = \frac{\sum Q_{r,max}}{\sum Q_r} = \frac{126,55}{157,40} = 0,804$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 = 1 - 0,804 = 0,196$$

$$l_s = (\xi_1 - 0,5) \cdot l = (0,804 - 0,5) \cdot 10 = 3,04 \text{ m}$$

$$M = K \cdot l_s = 4,87 \cdot 3,04 = 14,80 \text{ kN}$$

Setter dette inn i formel 3.24 for å finne den tverrgående kraften $H_{T,1}$:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a} = 1,5 \cdot 0,196 \cdot \frac{14,80}{3} = 1,45 \text{ kN}$$

I denne oppgaven hvor det brukes hjul med styrekant blir a , som er avstanden mellom hjulet og relevant styremekanisme, lik hjulavstanden på bruvogna som er 3 m. Finner den tverrgående kraften H_2 med formel 3.25:

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a} = 1,5 \cdot 0,804 \cdot \frac{14,80}{3} = 5,95 \text{ kN}$$

4.3.5 Horisontale krefter på grunn av vridning av kranen

Finner bidragene til vridningsvinkelen i tabell 3.10:

$$\alpha_F = \frac{0,75x}{a_{ext}} = \frac{10}{3000} = 0,0033 \text{ rad}$$

$$\alpha_V = \frac{y}{a_{ext}} = \frac{0,1 \cdot k}{a_{ext}} = \frac{0,1 \cdot 55}{3000} = 0,0018 \text{ rad}$$

Hvor: $k = 55 \text{ mm}$ er bredden på skinnehodet

$$\alpha_0 = 0,001 \text{ rad}$$

Finner vridningsvinkelen med formel 3.26:

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 = 0,0033 + 0,0018 + 0,001 = 0,0061 \text{ rad}$$

Finner så den «ikke positive» faktoren med bruk av formel 3.27:

$$f = 0,3(1 - \exp(-250\alpha)) = 0,3(1 - \exp(-250 \cdot 0,0061)) = 0,235$$

Finner så kraftfaktorene:

e_j er avstanden mellom den relevante styremekanisme og hjulpar. Ettersom det ikke brukes egen styremekanisme, men styrekant på hjulene blir avstandene som følger:

$$e_1 = 0 \text{ m} \quad \text{og} \quad e_2 = 3,0 \text{ m}$$

Det ene hjulparet vil fungere som den relevante styremekanismen og har dermed ingen avstand. For det andre hjulparet vil det være avstanden frem til det hjulparet som er den relevante styremekanismen.

I NS-EN 1991-3 (Standard Norge 2010a) deles kombinasjonene av hjulpar inn i fire grupper, for kranen i dette eksempelet brukes alternativet IFF (independent fixed/fixed) fra tabell 2.8. I samme tabell finner man også uttrykket for avstanden h .

$$h = \frac{m \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot l^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j} = \frac{\sum e_j^2}{\sum e_j} = \frac{3,0^2}{3,0} = 3,0 \text{ m}$$

Det første leddet i brøken går bort, dette fordi $m = 0$ for uavhengige hjulpar.

I tabell 3.9 er uttrykkene for kraftfaktorene oppgitt for de forskjellige kombinasjonene av hjulpar. I dette eksempelet blir de som følger:

$$\lambda_s = 1 - \frac{\sum e_j}{n \cdot h} = 1 - \frac{3,0}{2 \cdot 3,0} = 0,5$$

I samme tabell som nevnes ovenfor blir uttrykket for de langsgående kreftene på grunn av vridning lik 0.

$$\lambda_{S,1,L} = \lambda_{S,2,L} = 0$$

For hjulpar 1 som er hjulparet hvor det vil være krefter på styrekanten:

$$\lambda_{S,1,1,T} = \frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) = \frac{0,196}{2} (1 - 0) = 0,098$$

$$\lambda_{S,2,1,T} = \frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) = \frac{0,804}{2} (1 - 0) = 0,402$$

For hjulpar 2 som ikke har krefter på styrekanten (styreflensen), er avstanden mellom hjulparet og frem til styremekanismen, h , den samme som avstanden mellom hjulene. Dermed blir tverrkreftene på dette hjulparet lik 0, som vist under:

$$\lambda_{S,1,2,T} = \frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_2}{h}\right) = \frac{0,82}{2} \left(1 - \frac{3,0}{3,0}\right) = 0$$

$$\lambda_{S,2,2,T} = \frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) = \frac{0,82}{2} \left(1 - \frac{3,0}{3,0}\right) = 0$$

Hvor: $n = 2$ antall hjulpar

Bruker formlene 3.29 til 3.32 for å finne de horisontale kreftene på grunn av vridning.

De langsgående kreftene på grunn av vridning blir da:

$$H_{S,1,L} = f \cdot \lambda_{S,1,L} \cdot \sum Q_r = 0$$

$$H_{S,2,L} = f \cdot \lambda_{S,2,L} \cdot \sum Q_r = 0$$

Og de tverrgående kreftene på grunn av vridning blir:

For hjulpar 1:

$$H_{S,1,1,T} = f \cdot \lambda_{S,1,1,T} \cdot \sum Q_r = 0,233 \cdot 0,098 \cdot 157,40 = 3,59 \text{ kN}$$

$$H_{S,2,1,T} = f \cdot \lambda_{S,2,1,T} \cdot \sum Q_r = 0,233 \cdot 0,402 \cdot 157,40 = 14,74 \text{ kN}$$

For hjulpar 2:

$$H_{S,1,2,T} = f \cdot \lambda_{S,1,2,T} \cdot \sum Q_r = 0$$

$$H_{S,2,2,T} = f \cdot \lambda_{S,2,2,T} \cdot \sum Q_r = 0$$

Dette brukes for å finne horisontale skjærkrefter:

$$H_{S,1,T} = S - H_{S,1,1,T} = 17,6 - 3,2 = 14,74 \text{ kN}$$

$$H_{S,2,T} = H_{S,2,1,T} = 14,74 \text{ kN}$$

Styrekraften, S beregnes med formel 3.28:

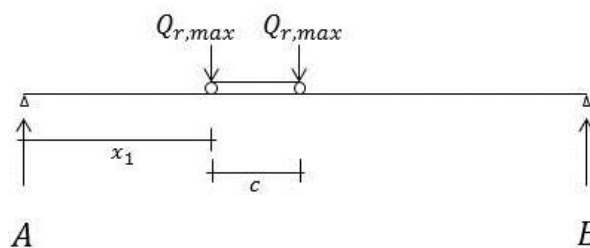
$$S = f \cdot \lambda_S \cdot \sum Q_r = 0,233 \cdot 0,5 \cdot 151 = 17,6 \text{ kN}$$

Tverrkrefter på grunn av akselerering og nedbremsing av løpekatten beregnes med formel 3.33:

$$H_{T,3} = 0,1 \cdot (Q_{c2} + Q_h) = 0,1 \cdot (10 + 100) = 11 \text{ kN}$$

4.3.6 Interne krefter og momenter

Finner kranens posisjon på kranbrua som gir det største moment:



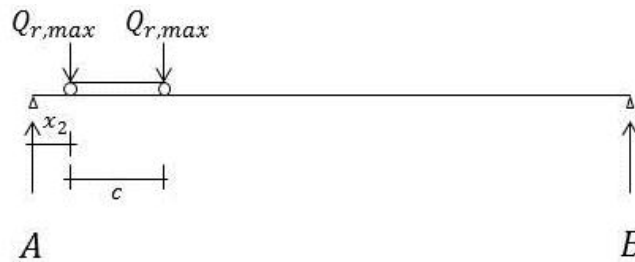
Figur 4.16 Lastposisjon for maks bøyemoment. x_1 er avstanden fra opplagringen på venstre side til nærmeste hjullast som gir det største momentet og c er avstanden mellom kranens hjul.

Bruker formel 3.37 for å finne avstanden x_1 som gir det største momentet:

$$x = \frac{2l - c}{4} = \frac{2 \cdot 10 - 3}{4} = 4,25 \text{ m}$$

Det største bøyemomentet opptrer i punkt $x_1 = 4,25 \text{ m}$.

Posisjonen som gir de største skjærkreftene er illustrert i figur 4.17:



Figur 4.17 Lastposisjon for maks skjærkrefter. x_2 er avstanden som gir størst skjærkraft, c er avstanden mellom hjulene til kranen.

Finner avstanden x_2 med formel 3.38:

$$x_2 = \frac{h_w}{2} = \frac{390}{2} = 0,195 \text{ m}$$

Hvor høyden til steget mellom flensene er gitt ved formel 3.7:

$$h_w = h - 2t_w - 2r = 500 - 2 \cdot 27 - 2 \cdot 28 = 390 \text{ mm}$$

Bruker formel 3.39 for å finne den sammenlagte vekten per lengde for kranbanebjelken og kranskinen, tyngdeakselerasjonen settes til 10 m/s^2 :

$$g_k = 10 \cdot g_{500} + 10 \cdot g_r = 1,87 + 0,32 = 2,19 \text{ kN/m}$$

Finner kreftene på grunn av egenvekten til kranbanen i punkt x_1 :

Opplagringskraften i A på grunn av kranbanens egenvekt er gitt ved formel 3.40:

$$A(g_k) = \frac{g_k \cdot l}{2} = \frac{2,19 \cdot 10}{2} = 10,95 \text{ kN}$$

Dette settes inn i formel 3.41 for å finne momentet fra egenvekten i punkt x_1 :

$$M_{y,k} = M_{g,k,x_1} = A(g_k) \cdot x_1 - \frac{x_1^2 \cdot g_k}{2} = 10,95 \cdot 4,25 - \frac{4,25^2 \cdot 2,19}{2} = 26,76 \text{ kNm}$$

Skjærkraften i punkt x_1 er gitt ved formel 3.42:

$$V_{g,k,x_1} = M'_{y,k} = A(g_k) - x_1 g_k = 11 - 4,25 \cdot 2,19 = 1,69 \text{ kN}$$

Finner kreftene på grunn av laster i punkt x_1 :

Beregner momentet i x_1 på grunn av lasten fra kranen med formel 3.43:

$$M_{Q,k,max} = \frac{x_1^2}{l} \cdot 2 \cdot Q_{r,max} = \frac{4,25^2}{10} \cdot 2 \cdot 74,28 = 268,34 \text{ kN}$$

Skjærkraften på grunn av lasten fra kranen er gitt ved formel 3.48:

$$V_{Q,k,max} = \frac{2x_1}{l} \cdot Q_{r,max} = \frac{2 \cdot 4,25}{10} \cdot 74,28 = 63,14 \text{ kN}$$

Dimensjonerende moment i x_1 beregnes med formel 3.46:

$$M_{Ed,max} = \gamma_G \cdot M_{g,k,x_1} + \gamma_Q \cdot M_{Q,k} = 1,35 \cdot 26,76 + 1,35 \cdot 268,34 = 398,39 \text{ kNm}$$

Og dimensjonerende skjærkraft beregnes med formel 3.49:

$$V_{Ed} = \gamma_G \cdot V_{g,k,x_1} + \gamma_Q \cdot V_{Q,k,max} = 1,35 \cdot 1,69 + 1,35 \cdot 63,14 = 87,52 \text{ kN}$$

Største skjærkrefter vil være når kranen står i punkt x_2 og blir som følger:

Skjærkraft på grunn av laster fra kranen, med formel 3.50:

$$V_{Q,k,max} = \frac{Q_{r,max}(2l - 2x_2 - c)}{l} = \frac{74,28(2 \cdot 10 - 2 \cdot 0,195 - 3)}{10} = 123,36 \text{ kN}$$

Og skjærkraft på grunn av kranbanens egenvekt, med formel 3.51:

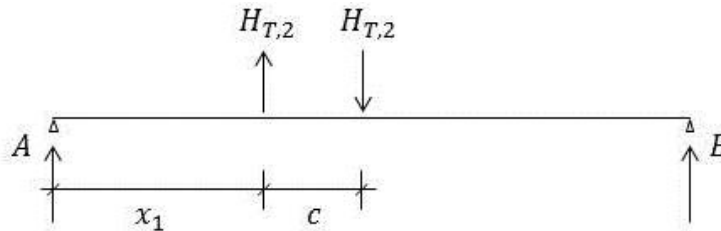
$$V_{g,k,x_2} = \frac{g_k \cdot l}{2} - g_k x_2 = \frac{2,19 \cdot 10}{2} - 2,19 \cdot 0,195 = 10,52 \text{ kN}$$

Den dimensjonerende skjærkraften blir da, med formel 3.52:

$$V_{Ed,max} = \gamma_G \cdot V_{g,k,x_2} + \gamma_Q V_{Q,k,max} = 1,35 \cdot 10,52 + 1,35 \cdot 123,36 = 180,74 \text{ kN}$$

Horisontal skjærkraft på bjelken på grunn av kjøring av kranen

Momentligningen gir følgende opplagingskrefter:



Figur 4.18 Horisontale krefter fra kranen på kranbanen. Bjelken er sett ovenfor og er påført tverrgående horisontale krefter, $H_{T,2}$, hvor kranen eller løpekatten er plassert i senter av kranbane eller kranbru. **A** og **B** er opplagingspunkter, c er avstanden mellom kreftene og x_1 er avstanden fra opplagring **A** til nærmeste kraft.

Figur 4.18 viser de horisontale tverrgående lastene som oppstår på grunn av akselerasjon av kranen. Lastene er plassert med hensyn på x_1 . Bruker formel 3.53 for å finne opplagingskraften i **A**:

$$F_A = \frac{-H_{T,2}(l - x_1) + H_{T,2}(l - (x_1 + c))}{l}$$

$$F_A = \frac{-5,95 \cdot (10 - 4,25) + 5,95 \cdot (10 - (4,25 + 3))}{10} = -1,79 \text{ kN}$$

Finner den største skjærkraften med formel 3.54:

$$V_x = F_A + H_{T,2} = -1,79 + 5,95 = 4,16 \text{ kN}$$

Bruker formel 3.55 for å bestemme den dimensjonerende skjærkraften:

$$V_{Ed,x} = \gamma_Q \cdot V_x = 1,35 \cdot 4,16 = 5,62 \text{ kN}$$

Torsjon

Finner først avstandene mellom last og aksesenter.

Finner avstanden e_y med formel 3.56:

$$e_y = 0,25 \cdot b_r = 0,25 \cdot 55 = 13,75 \text{ mm}$$

Og avstanden e_z med formel 3.57:

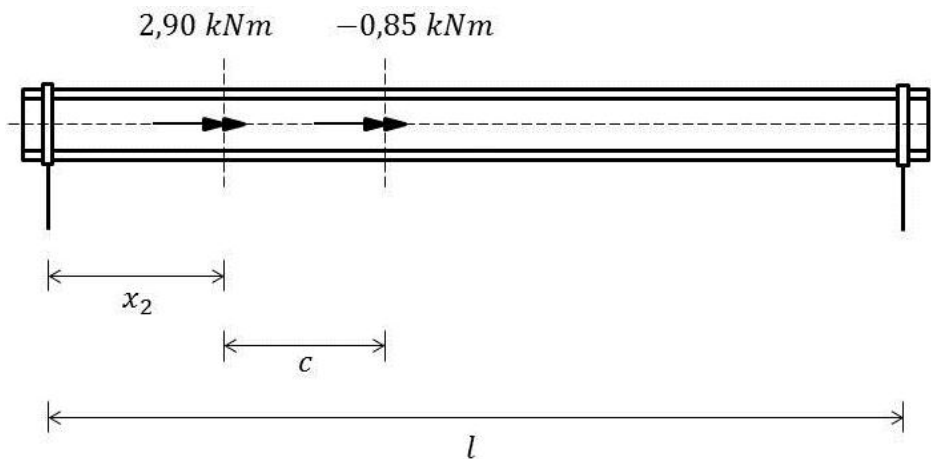
$$e_z = 0,5 \cdot h_{500} + h_r = 0,5 \cdot 500 + 65 = 315 \text{ mm}$$

Bruker formlene 3.58 og 3.59 for å bestemme de to torsjonsmomentene som påføres kranbanebjelken:

$$M_{t1} = Q_{r,max} \cdot e_y + H_{T2} \cdot e_z = 74,28 \cdot 0,01375 + 5,95 \cdot 0,315 = 2,90 \text{ kNm}$$

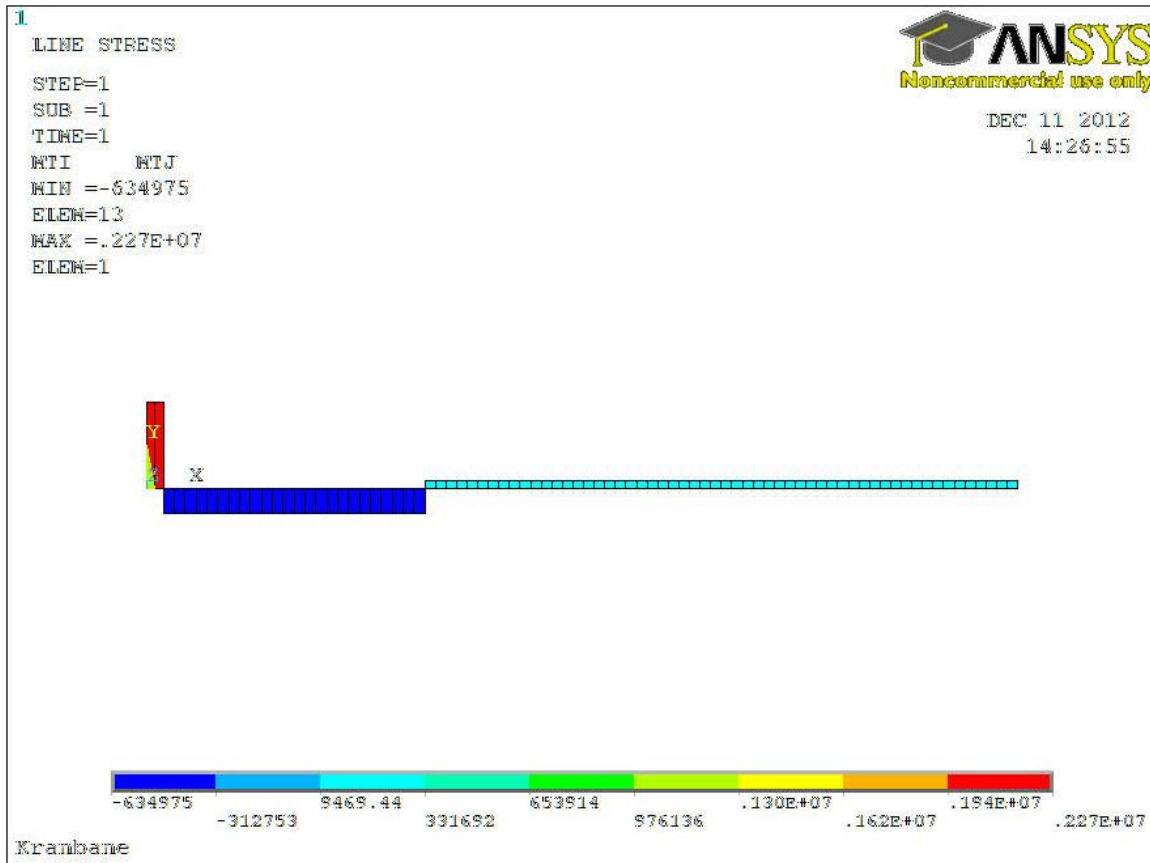
$$M_{t2} = Q_{r,max} \cdot e_y - H_{T2} \cdot e_z = 74,28 \cdot 0,01375 - 5,95 \cdot 0,315 = -0,85 \text{ kNm}$$

Setter de to torsjonsmomentene på kranbanebjelkens i den minst gunstige avstanden fra opplagringen for å finne det største torsjonsmomentet som vist i figur 4.19.



Figur 4.19 Torsjonsmomentene påført på kranbanebjelken. Bjelken er gaffellagret i begge ender. Spennvidden er l , x_2 er avstanden fra opplagringen på venstre side til nærmeste torsjonsmoment og c er avstanden mellom torsjonsmomentene.

For å finne det største torsjonsmomentet i kranbanebjelken settes verdiene og størrelsene inn i ANSYS og får følgende data ut.



Figur 4.20 Torsjonsdiagram for kranbrua. Bildet er fra ANSYS og angir torsjonsmomentet i de forskjellige delene av kranbrubjelken. Det største torsjonsmomentet er farget rødt og det minste er blått. Opplagringene er låst i alle retninger.

Fra torsjonsdiagrammet i figur 4.20 finner vi det største torsjonsmomentet i kranbanebjelken:

$$\max M_{t,k} = 0,227 \cdot 10^7 \text{ Nmm} = 2,27 \text{ kNm}$$

4.3.7 Bruksgrensetilstand

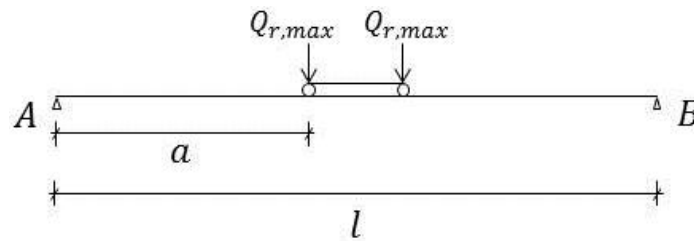
Kontrollerer at nedbøyningen er mindre enn den tillatte nedbøyningen som er gitt i formel 3.61:

$$\delta_{max} = \frac{l}{600} = \frac{10000}{600} = 16,67 \text{ mm}$$

Beregningen av nedbøyning i kranbanen gjøres med laster med dynamisk faktor. Finner nedbøyningen på grunn av egenvekten til kranbanebjelken med formel 3.64:

$$\delta_g = \frac{5 \cdot g_k \cdot l^4}{348 \cdot E \cdot I_{y,500}} = \frac{5 \cdot 2,19 \cdot 10000^4}{348 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1072 \cdot 10^6} = 1,40 \text{ mm}$$

Nedbøyningen av kranbanen vil være størst når kranen står midt på kranbanebjelken som vist i figur 4.21.



Figur 4.21 Avstander til bruk i beregning av nedbøyning. Kranen er i midten av kranbanebjelken og har hjulene har avstanden a til opplagringspunktene. l er spennvidden til kranbanen.

Den største nedbøyningen vil være når kranen er plassert på kranbanen midt i mellom to opplagringer. Avstanden mellom opplagringspunkt og nærmeste last er i figuren definert som a og har lengden 3,5 m. Bruker formel 3.63 for å finne nedbøyningen som skapes fra vekten til kranen:

$$\delta_Q = \frac{2 \cdot Q_{r,max} \cdot l^3}{48EI_y} \cdot \left(3 \left(\frac{a}{l} \right) - 4 \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right)$$

$$\delta_Q = \frac{2 \cdot (74,28 \cdot 10^3) \cdot 10000^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1072 \cdot 10^6} \cdot \left(3 \left(\frac{3,5}{10} \right) - 4 \left(\frac{3,5}{10} \right)^3 \right) = 12,08 \text{ mm}$$

Den totale nedbøyningen blir:

$$\delta = \delta_g + \delta_Q = 1,40 + 12,08 = 13,48 \text{ mm}$$

Nedbøyningen av kranbanen er mindre enn den maksimale tillatte nedbøyningen.

4.3.8 Bruddgrensetilstander

Sjekker først om det er nødvendig å kontrollere mot skjærknekking med formel 3.69:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta}$$

Hvor: $\eta = 1,2$ hentet fra NA i NS-EN 1993-1-5

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{390}{14,5} = 26,90 \leq 72 \frac{1}{1,20} = 60$$

Det er ikke nødvendig å kontrollere mot skjærknekking.

Kontrollerer at bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot skjærkrefter:

Bruker formel 3.66 for å finne den plastiske skjærkapasiteten:

$$V_{c,pl} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{9018 \cdot (235/\sqrt{3})}{1,05} = 1165,27 \text{ kN}$$

Hvor skjærarealet er gitt ve formel 3.67:

$$A_v = A_{500} - 2bt_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$$

$$A_v = 23,9 \cdot 10^3 - 2 \cdot 300 \cdot 28 + (14,5 + 2 \cdot 27)28 = 9018 \text{ mm}^2$$

Kontrollerer at skjærkapasiteten er større enn den dimensjonerende skjærkraften med formel 3.65.

$$\frac{V_{Ed,max}}{V_{pl,Rd}} = \frac{180,74}{1165,27} = 0,16 < 1,0$$

Bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot skjærkrefter.

Skjærkraften er mindre enn den halve plastiske kapasiteten, og det er dermed ikke nødvendig å ta hensyn til skjærkraftens virkning på momentkapasiteten.

Kontrollerer at bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot skjærkreftene som oppstår ved kjøring av kranen:

Antar at de horisontale kreftene tas opp i kranbanebjelkens toppflens. Bruker formel 3.67 for å finne den plastiske skjærkapasiteten for toppflensen:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{8400 \cdot (235/\sqrt{3})}{1,05} = 1085,42 \text{ kN}$$

Hvor arealet som tar opp skjærkraften er bredden til flensen ganget med flenstykkelsen:

$$A_v = b \cdot t_f = 300 \cdot 28 = 8400 \text{ mm}^2$$

Kontrollerer at det er tilstrekkelig kapasitet mot skjærkreftene i toppflensen med formel 3.66:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{5,62}{1085,42} = 0,005 < 1,0$$

Det er tilstrekkelig kapasitet i toppflensen mot skjærkreftene som oppstår når kranen kjøres.

Kontrollerer at bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot bøyemoment:

Finner plastisk momentkapasitet med formel 3.72:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{4820 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,05} = 1078,76 \text{ kNm}$$

Bruker formel 3.71 for å kontrollere om tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet mot bøyemoment:

$$\frac{M_{Ed,max}}{M_{pl,Rd}} = \frac{398,39}{1078,76} = 0,37 < 1,0$$

Kranbanebjelken har tilstrekkelig kapasitet mot bøyemoment.

Torsjon

Fra figur 4.20 er det største torsjonsmomentet i kranbanebjelken satt til:

$$\max M_{t,k} = 2,27 \text{ kNm}$$

Det dimensjonerende torsjonsmomentet er det største torsjonsmomentet i bjelken ganget med partialfaktoren for variable laster og blir:

$$\max M_{t,Sd} = \gamma_Q \cdot \max M_{t,k} = 1,35 \cdot 2,27 = 3,06 \text{ kNm}$$

Skjærmotstand på grunn av torsjon:

Finner skjærspenningen på grunn av torsjon med formel 3.74:

$$\tau_{t,Ed} = \frac{M_{t,Sd} \cdot t_f}{I_t} = \frac{3,06 \cdot 10^6 \cdot 28}{5400 \cdot 10^3} = 15,87 \text{ N/mm}^2$$

Finner kapasiteten mot skjærspenninger med formel 3.75:

$$\tau_{y,d} = \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = \frac{235/\sqrt{3}}{1,05} = 129,22 \text{ N/mm}^2$$

Kontrollerer om tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet mot skjærspenningene med formel 3.73:

$$\frac{\tau_{t,Ed}}{\tau_{y,d}} = \frac{15,87}{129,22} = 0,12 \leq 1,0$$

Tverrsnittet har tilstrekkelig kapasitet mot skjærspenningene.

For å ta hensyn til kombinasjonene av torsjon og skjærkrefter bør skjærkapasiteten reduseres og det må gjøres en kontroll om denne kapasiteten er tilstrekkelig mot dimensjonerende skjærkraft.

Skjærkapasiteten hvor det tas hensyn til interaksjonen mellom torsjon og skjærkrefter er gitt ved formel 3.76:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}} \cdot V_{pl,Rd}$$

$V_{pl,Rd}$ er satt til 1165,27 kN tidligere i dette kapitlet og settes inn i formel 3.76:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{15,87}{1,25(235/\sqrt{3})/1,05}} \cdot 1165,27 = 1106,54 \text{ kN}$$

Kontrollerer at kapasiteten fortsatt er tilstrekkelig med formel 3.65:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} = \frac{180,74}{1106,54} = 0,16 < 1,0$$

Bjelkeprofilet tåler skjærkreftene også når det er påført torsjonsmoment. Den dimensjonerende skjærkraften er også her mindre enn halve skjærkapasiteten, dermed er det ikke nødvendig å kontrollere mot skjærknekking.

Vipping av kranbanebjelken

Kontrollerer at kranbrubjelken ikke vipper under belastningen av momentet. Dette er beskrevet i NS-EN 1993-1-1 under kapittel 6. For at bjelken ikke skal vippe må følgende krav fra formel 3.8 oppfylles:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

For å finne vippekapasiteten må man først finne det kritiske momentet for vipping. Det kritiske momentet for vipping er gitt i formel 3.76.

$$M_{cr} = \bar{M}_{0,cr} \cdot \mu_{cr}$$

For å finne $\bar{M}_{0,cr}$ brukes formel 3.80:

$$\bar{M}_{0,cr} = \left(\frac{\pi}{l}\right) \sqrt{GI_T \cdot EI_z}$$

$$\bar{M}_{0,cr} = \left(\frac{\pi}{10000}\right) \sqrt{81 \cdot 10^3 \cdot 5400 \cdot 10^3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 126,2 \cdot 10^6} = 1069,62 \text{ kNm}$$

Det dimensjonsløse kritiske momentet, μ_{cr} , er bestemt av en rekke faktorer som regnes ut som følger:

Torsjonsparameteren etter formel 3.77, hvor k_w er hentet fra tabell 3.13:

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w l} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}}$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{1 \cdot 10000} \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 7018 \cdot 10^9}{81 \cdot 10^3 \cdot 5400 \cdot 10^3}} = 0,577$$

Lastangrepspunktets koordinat i forhold til skjærsenteret etter formel 3.78, hvor faktoren k_z er hentet fra tabell 3.13:

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z l} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}}$$

Avstanden z_g er halve høyden til bjelken pluss høyden til skinnen som vist under:

$$z_g = \frac{500}{2} + 65 = 315 \text{ mm}$$

Lastangrepspunktets koordinat blir da:

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot 315}{1 \cdot 10000} \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 126,2 \cdot 10^6}{81 \cdot 10^3 \cdot 5400 \cdot 10^3}} = 0,770$$

Det dimensjonsløse momentet blir da ved bruk av formel 3.79, hvor k_w , C_1 og C_2 er fra tabell 3.13:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + k_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g)^2} - (C_2 \zeta_g) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,04}{1} \left[\sqrt{1 + 0,577^2 + (0,43 \cdot 0,770)^2} - (0,43 \cdot 0,770) \right] = 0,905$$

Det kritiske momentet for vipping blir da:

$$M_{cr} = \bar{M}_{0,cr} \cdot \mu_{cr} = 1069,62 \cdot 0,905 = 968,01 \text{ kNm}$$

Til utregningen av vippekapasiteten er det nødvendig å finne følgende:

Relativ slankhet for vipping fra formel 3.85:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{4820 \cdot 10^3 \cdot 235}{968,01 \cdot 10^6}} = 1,08$$

Setter dette inn i formelen 3.84, hvor $\bar{\lambda}_0 = 0,4$ og $\beta = 0,75$:

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,34 \cdot (1,08 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,08^2] = 1,053$$

Finner reduksjonsfaktoren med formel 3.84:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,053 + \sqrt{1,053^2 + 0,75 \cdot 1,08^2}} = 0,406$$

Kan nå bestemme vippekapasiteten med formel 3.82:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,406 \cdot 4820 \cdot 10^3 \frac{235}{1,05} = 437,98 \text{ kNm}$$

Setter det dimensjonerende momentet som er beregnet tidligere i dette kapitlet og vippekapasiteten inn i formel 3.82 for å kontrollere at det er tilstrekkelig kapasitet mot vipping.

$$\frac{M_{Ed,max}}{M_{b,Rd}} = \frac{398,39}{437,98} = 0,91 < 1,0$$

Bjelken har tilstrekkelig kapasitet mot vipping.

5 DISKUSJON

Arbeidet med denne mastergradsoppgaven har vært krevende når det kommer til mengden av teori som har blitt gjennomgått, det har vært mye å holde kontroll på og det har krevd mye tid å sette seg inn i standardene.

Eurokode er et omfattende standardverk som kan være komplisert å gjøre seg kjent med. Det er nødvendig med god støttelitteratur for å få en forståelse for standardene som i seg selv er veldig konsise med lite beskrivelse av anvendelser. Medforfatter til Eurokode, Bernt Johansson anerkjenner i forordet i boka «Design of Plated Structures» at det er nødvendig med tilleggslitteratur til Eurokode for å kunne gjøre de rette tolkningene.

ECCS Eurocode Design Manuals anbefales dersom man skal dimensjonere etter Eurokode. I denne mastergradsoppgaven har det blitt brukt «Design of Plated Structures» som inneholder et eksempel med dimensjonering av kranbane.

Det å gjøre seg kjent med Eurokode er veldig tidkrevende og jeg vil anbefale andre som skal jobbe med dette standardverket, i for eksempel mastergradsarbeid, å delta på kurs i Eurokode. Norsk Stålforbund og Tekna arrangerer kurs, temakvelder og konferanser som omhandler Eurokode. Techbridge AS har etter oppdrag fra Norsk Stålforbund utviklet programmet Tech_sec som kan være lurt å sjekke opp nærmere. Svenske StruProg AB har også utviklet dataprogrammer som kan være interessante ved beregninger av Eurokode.

6 KONKLUSJON

Hvilke deler av Eurokode er nødvendige for dimensjonering av løpekraner?

De nødvendige delene av Eurokode er gjennomgått i kapittel 2.

Hvordan dimensjoneres en løpekran etter Eurokode?

Kapittel 3 forklarer bruken av nødvendig teori fra de relevante standardene i Eurokode, for å kunne beregne hovedelementene av en løpekran. Dimensjoneringsseksempelet i kapittel 4 viser hvordan beregninger på en løpekrans kranbane, kranbru og bruvogn kan gjøres etter Eurokode.

6.1 Videre arbeid

I denne mastergradsoppgaven er teorien for dimensjonering av hovedelementene til en løpekran presentert. Det som gjenstår for en komplett dimensjonering av hele løpekranen er listet opp punktvis:

- Sammenkopling mellom kranbru og bruvogn i form av boltforbindelse eller sveis
- Beregninger av tverrsnittet til profilet brukt til bruvogna hvor det tas hensyn til hull for innfestning av utstyr som drivverk, motorer, hjul og lignende.
- Bærekonstruksjon til kranbanen
- Utmatting og levetidsberegninger
- Gjennomgå flere av bruksgrensetilstandene
- Beregninger med hensyn på ulykker som brann og jordskjelv
- Materialvalg
- Påvirkning på konstruksjonen ved endring i temperatur.

7 REFERANSER

Litteratur/Skriftlige kilder

- Beg, D., Kuhlmann, U., Daviaine, L. & Braun, B. (2010). *Design of plated structures*. Berlin: ECCS. XIV, 271 s.
- Dymond, J. S. (2005). *Reliability based codification for the design of overhead travelling crane support structures*. Dissertation: PhD (Engineering): University of Stellenbosch, Department of Civil Engineering. 372 s.
- Helgesen, H. (1981). *Løfte- og transportmaskiner*. Oslo: Universitetsforlaget. 278 s. : ill. s.
- Larsen, P. K. (2010). *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*. [Trondheim]: Tapir akademisk forl. 554 s. : ill. s.
- Myhre, K. (2008). *Stål : håndbok*. Oslo: Norsk stålforbund. b. : ill. s.
- Sedlacek, G., Schneider, R. & Schäfer, N. (2003). Design example for the application of EUROCODE 1 -Part 3: Actions induced by cranes and machinery and EUROCODE 3 - Part 6: Crane supporting structures. *FABI. Cycle Eurocodes*. Aachen. 36 s.
- Standard Norge. (2008a). *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler for bygninger*. Lysaker: Standard Norge. 95, 4 s.
- Standard Norge. (2008b). *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner, Del 1-5: Plater påkjent i plateplanet*. Lysaker: Standard Norge. 95, 4 s. : ill. s.
- Standard Norge. (2008c). *Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Lysaker: Standard Norge. 72, 8 s.
- Standard Norge. (2010a). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 3: Laster fra kraner og maskineri*. Lysaker: Standard Norge. 46, 2 s.
- Standard Norge. (2010b). *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner, Del 1-9: Utmattingspåkjente konstruksjoner*. Lysaker: Standard Norge. 34, 5, 3 s.
- Standard Norge. (2010c). *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner, Del 6: Kranbaner*. Lysaker: Standard Norge. 37 s, 8 s.
- Stålkonstruksjoner : profiler og formler*. (1993). [Trondheim]: Tapir. 56 s. : ill. s.



8 VEDLEGG

- A:** Loggfil fra ANSYS til beregninger av torsjonsmomenter i kranbrua
- B:** Loggfil fra ASYS til beregninger av torsjonsmomenter i kranbanen
- C:** Fremdriftsplan

VEDLEGG A: side 1/2

Loggfil fra ANSYS til beregninger av torsjonsmomenter i kranbrua

```
/BATCH
!/COM,ANSYS RELEASE 14.0 UP20111024 13:23:50 12/05/2012
/input,start140,ans,'C:\Program Files\ANSYS Inc\v140\ANSYS\apdl',,,,,,,,,,,,,,1
!*
!/REPLOT,RESIZE
/PREP7
!*
ET,1,BEAM189
!*
SECTYPE, 1, BEAM, I, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,300,300,400,25,25,13.5,0,0,0,0,0,0
/CWD,'H:\Master\Torsjon i kranbru'
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e5
MPDATA,PRXY,1,,0.3
K,1,0,0,0,
K,2,150,1150,0,
K,2,150,0,0,
KDELE, 2
KDELE, 1
K,1,0,0,0,
K,2,150,0,0,
K,3,1150,0,0,
K,4,10000,0,0,
K,5,5000,1000,0,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
!*
LESIZE,ALL,250, , , 1, , , 1,
!*
LATT,1, ,1, , 5, ,1
FLST,2,3,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
LMESH,P51X
GPLOT
!/PNUM,KP,1
!/PNUM,LINE,0
!/PNUM,AREA,0
!/PNUM,VOLU,0
!/PNUM,NODE,0
!/PNUM,TABN,0
```

Vedlegg A: side 2/2

```
! /PNUM,SVAL,0
! /NUMBER,0
!*
! /PNUM,ELEM,0
! /REPLOT
!*
FINISH
/SOL
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,4
!*
/GO
DK,P51X, , , ,0,ALL, , , , ,
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,-3
!*
/GO
FK,P51X,MX,0.45e6
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
AVPRIN,0, ,
ETABLE,MTI,SMISC, 4
!*
AVPRIN,0, ,
ETABLE,MTJ,SMISC, 17
!*
ALLSEL,ALL
! /REPLOT
! PLLS,MTI,MTJ,1,0
! LGWRITE,'Kranbru','lgw','H:\Master\TORSJO~1\','COMMENT
```

VEDLEGG B: side 1/2

Loggfil fra ANSYS til beregning av torsjonsmoment i kranbanen

```
/BATCH
!/COM,ANSYS RELEASE 14.0 UP20111024 14:16:50 12/11/2012
/input,start140,ans,'C:\Program Files\ANSYS Inc\v140\ANSYS\apdl',,,,,,,,,,,,,,1
!*
/TITLE,Kranbane
/PREP7
!*
ET,1,BEAM189
!*
SECTYPE, 1, BEAM, I, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,300,300,500,29,29,14.5,0,0,0,0,0
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1e5
MPDATA,PRXY,1,,0.3
K,1,0,0,0,
K,2,195,0,0,
K,3,3195,0,0,
K,4,10000,0,0,
K,5,5000,1000,0,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
!*
LESIZE,ALL,250, , , 1, , , 1,
!*
LATT,1, ,1, , 5, ,1
FLST,2,3,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
LMESH,P51X
GPLOT
!/PNUM,KP,1
!/PNUM,LINE,0
!/PNUM,AREA,0
!/PNUM,VOLU,0
!/PNUM,NODE,0
!/PNUM,TABN,0
!/PNUM,SVAL,0
!/NUMBER,0
!*
!/PNUM,ELEM,0
!/REPLOT
!*
```

Vedlegg B: side 2/2

```
FINISH
/SOL
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,4
!*
/GO
DK,P51X, , , ,0,ALL, , , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,2
!*
/GO
FK,P51X,MX,2.9e6
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,3
!*
/GO
FK,P51X,MX,-0.85e6
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
AVPRIN,0, ,
ETABLE,MTI,SMISC, 4
!*
AVPRIN,0, ,
ETABLE,MTJ,SMISC, 17
!*
ALLSEL,ALL
! /REPLOT
! PLLS,MTI,MTJ,1,0
!*
!*
! SAVE, file,db,
! SAVE, Kranbane,db,H:\Løpekran\Kranbane\
! LGWRITE,'kranbane','lgw','H:\Løpekran\Kranbane\','COMMENT'
```