



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Trafikklastar på brokonstruksjoner

Traffic loads on bridges

Andreas Palmesen, 307

Benjamin Tysse, 332

Selam Abraha Gebre, 260

Bachelor ingeniørfag, Institutt for byggfag

Veileder: Jan Bernt Husebø

Antall ord: 10434

22.05.19

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 10.

Forord

Denne oppgaven er utført i samarbeid med Statens Vegvesen broseksjon i Bergen og utgjør avsluttende bacheloroppgave på byggingeniørutdanningen ved Høgskolen på Vestlandet, avdeling Bergen, våren 2019. Oppgaven utgjør 20 studiepoeng ved studiet.

Gjennom denne oppgaven har vi fått en bedre forståelse for dimensjonering av broer, veikonstruksjoner og generelle trafikklaster.

Vi takker Olav Johan Blindheim og Mathieu Pescheux i Statens Vegvesen for tildeling av oppgaven og hjelp underveis. Vi takker også vår interne veileder Jan Bernt Husebø for veiledning med oppgaven.

Andreas Palmesen

Benjamin Tysse

Sejam Abraha Gebre

Bergen, 22.mai 2019

Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg sammenligning av lasttilfeller for brokonstruksjoner med fokus på laster fra vanlig trafikk (LM1) og spesialtransport (LM3). For å danne sammenligningsgrunnlaget har vi sett på brokonstruksjoner på opptil tre spenn og med ulike spennlengder. Målet med oppgaven er å sette en pekepinn på hvilke tilfeller spesialtransport blir dimensjonerende.

Vi har også sett på en enkel bjelkedimensjonering for en bjelkebro og veikurvatur med fokus på spesialkjøretøy. Bjelkedimensjoneringen er ment som et forenklet eksempel, mens med kurvaturen er fokuset på å si noe om begrensningene dette kan ha for fremkommelighet for større kjøretøy.

For å komme frem til våre resultat har vi benyttet forenklete håndberegninger, beregninger i Excel og Robot Structural Analysis

Arbeidet med sammenligning, dimensjonering og veikurvatur bygger på data fra Statens Vegvesen sine håndbøker, Norsk Standard, Norsk lov og aktuelle formelsammenstillinger som bygger på disse.

Resultatene i denne oppgaven viser at hensynet til spesialkjøretøy kan variere i stor grad og at det helst kommer til uttrykk på broer med lengre spenn og med flere spenn.

I eksempel på dimensjonering av midtbjelke ser vi at det er lasttilfelle der LM3 last er inkludert som blir dimensjonerende, noe som var forventet.

Vedrørende veikurvatur ser vi at begrensningen hovedsakelig vil være på mindre veier og at dette ikke skal være en utfordring på nye større veier og broer.

Abstract

This thesis has compared different traffic loads for bridge constructions, with a focus on loads from lorries and cars (LM1) and special vehicles (LM3). In order to create a basis for comparison, we have investigated bridge constructions with up to three spans, and with different span lengths. The aim of the thesis has been to pinpoint in which incidences special vehicles (LM3) become dimensioning. We have also looked at a single beam dimensioning for a beam bridge, and road curvature with focus on special vehicles. The beam dimensioning serves as a simplified example, whereas with the road curvature, the focus has been on saying something about the limitations this may have on the accessibility for larger vehicles.

To reach our results, we have utilised simplified hand calculations, calculations in Excel and Robot Structural Analysis.

Our work on comparisons, dimensioning and road curvature is based on data from Statens Vegvesen's handbook, Norsk Standard, Norwegian law and other formula assemblies that are based on these.

The results in this thesis show that the consideration of special vehicles can vary greatly, and that it is most evident on bridges with longer and multiple spans. By using simplified calculations of bridge beams, we see that it is the combination where LM3 load is included that becomes dimensioning. This was what we expected.

Concerning road curvature, we see that the limitations will primarily concern smaller roads, and that it is not likely to be a challenge on newer and larger roads and bridges.

Innhold

Innhold	4
1 Innledning	11
1.1 Oppgavebeskrivelse.....	11
1.2 Problemstilling.....	11
1.3 Avgrensning.....	11
1.4 Metode.....	12
2 Generell beskrivelse av bro og brotype	13
2.1 Brotyper	13
2.2 Bjelkebro, platebro og kassebro	14
2.2.1 Bjelkebro	14
2.2.2 Platebro.....	15
2.2.3 Kassebro	16
2.2.4 Vurdering av brotype	16
2.3 Materialer.....	17
2.3.1 Stål.....	17
2.3.2 Betong	17
2.4 Laster	18
2.4.1 Permanente laster	18
2.4.2 Variable laster	18
2.5 Lastkombinasjoner.....	24
2.5.1 Bruddgrensetilstand (ULS)	24
3 Trafikkklaster fra LM1 og LM3 på bjelkebro og platebro.....	25
3.1 Lasttilfeller på bjelkebro.....	25
3.1.1 Lasttilfelle: LM1	26
3.1.2 Lasttilfelle: LM3, åpen for annen trafikk.	27
3.1.3 Lasttilfelle: LM3, stengt for annen trafikk	28
3.2 Lasttilfeller på platebro.....	28
3.2.1 Lastplassering LM1	29
3.2.2 Lastplassering LM3, åpen for annen trafikk	29

3.2.3	Lastplassering LM3, stengt for annen trafikk.	30
3.3	Eksempel på beregning i Excel	31
3.3.1	Metode.....	31
3.4	Lastplassering for å beregne momenter.....	38
3.4.1	Case 1 – Ett spenn – Feltmoment.....	38
3.4.2	Case 2 – To like spenn – Feltmoment og støttemoment	39
3.4.3	Case 3 - 3 like spenn - Feltmoment og støttemoment	41
3.5	Resultat - Bjelkebro	44
3.5.1	Case 1: 1 spenn - Feltmoment.....	44
3.5.2	Case 2: 2 spenn – Feltmoment og støttemoment.....	45
3.5.3	Case 3: 3 spenn – Feltmoment og støttemoment.....	49
3.6	Resultat – Platebro.....	52
3.6.1	Case 1: 1 spenn - Feltmoment.....	52
3.6.2	Case 2: 2 spenn – Feltmoment og støttemoment.....	53
3.6.3	Case 3: 3 spenn – Feltmoment og støttemoment.....	57
4	Eksempel på dimensjonering av midtbjelke	61
4.1	Eksponeringsklasse.....	61
4.2	Bestandighet og overdekning for armering	62
4.3	Effektiv flensbredde	62
4.4	Drøfting av resultat.....	64
5	Kurvatur	65
5.1	Dimensjoneringsgrunnlag.....	67
5.2	Begrensning for kurvatur.....	67
5.3	Oppbygning av horisontalkurvaturen	68
5.3.1	Eksempler på kurvekombinasjoner i en horisontalkurvatur.....	69
5.4	Breddeutvidelse av horisontalkurvatur.....	70
5.4.1	Sporingsøkning.....	72
5.4.2	Overheng	73
5.4.3	Breddeutvidelse	74
5.4.4	Sporingskurver	75

5.5	Konklusjon for kurvatur	77
6	Konklusjon.....	78
7	Referanseliste.....	79
8	Vedlegg.....	1
8.1	Vedlegg A.....	1
8.1.1	Beregningsgrunnlag for bjelkebro.....	1
8.2	Vedlegg B.....	1
8.2.1	Beregningsgrunnlag for platebro.....	1
8.3	Vedlegg C.....	1
8.3.1	Betongens karakteristiske verdier og faktorer.....	1
8.4	Vedlegg D.....	1
8.4.1	Beregning av midtbjelke	1
8.5	Vedlegg E	1
8.5.1	Sammenligning av beregninger.....	1
8.6	Vedlegg F	1
8.6.1	Resultater av beregninger i Excel for bjelkebro.....	1
8.7	Vedlegg G.....	1
8.7.1	Resultater av beregninger i Excel for platebro.....	1

Tabelloversikt

Tabell 1 Hovedgrupper av brotyper	13
Tabell 2 Metode for inndeling av antall kjørefelt.....	18
Tabell 3 Karakteristiske verdier for Q_{ik} og q_{ik} for LM1	19
Tabell 4 Korreksjonsfaktorer for LM1	19
Tabell 5 Laster i bruddgrense for LM1	20
Tabell 6 Engangstransport.....	21
Tabell 7 NA.A2.4(B) last Kombinasjoner i bruddgrensetilstand (Standard Norge, 2016).....	24
Tabell 8 Sikkerhetsfaktorer fra NS-EN 1990 (Standard Norge, 2016)	24
Tabell 9 NA. 4.4a (Standard Norge, 2010)	24
Tabell 10 Beregning av støttemoment	34
Tabell 11 Støttemoment og skjærkrefter	35
Tabell 12 Skjærkrefter på bjelke	37
Tabell 13 Resultat - Beregning av feltmoment	37
Tabell 14 Resultat beregning i MathCAD.....	64
Tabell 15 Dimensjonerende kjøretøy	67
Tabell 16 E.2: Breddeutvidelse for 2-felts veger avhengig av kurveradius (mål i m)	70
Tabell 17 Parametere for H2 vei	71
Tabell 18 Spøringsøkning	72
Tabell 19 Overheng.....	73
Tabell 20 Breddeutvidelse i kurve for LM3	74

Figuroversikt

Figur 1 Broelementer: Inndeling av en typisk bro i hovedelementer, grunnen, underbygning og overbygning.....	14
Figur 2 Typiske elementer i en bjelkebro (Vegdirektoratet, 2014).....	14
Figur 3 Bjelkebro med rektangulære betongbjelker.....	15
Figur 4 Bjelkebro med T-bjelker i betong.....	15
Figur 5 Bjelkebro med I-bjelker i stål.....	15
Figur 6 Platebro.....	15
Figur 7 Bjelkeplatebro.....	16
Figur 8 Kassebro med to steg i tverrsnitt.....	16
Figur 9 Trafikklast per felt for LM1.....	20
Figur 10 Forenklet trafikklast fra LM1.....	20
Figur 11 Forenkling LM3 last.....	21
Figur 12 Forenklet trafikklast fra LM3.....	22
Figur 13 Boggilast, 1 vogn.....	22
Figur 14 Boggilast, 2 vogner.....	22
Figur 15 Bjelketverrsnitt.....	25
Figur 16 LM1 Bjelkebro.....	26
Figur 17 Lastplassering i bredderetning for LM1.....	26
Figur 18 Lastplassering i lengderetning LM1.....	26
Figur 19 Modell Kombinasjon av LM1 og LM3.....	27
Figur 20 Laster i bredderetning LM3, åpen for annen trafikk.....	27
Figur 21 Laster i lengderetning for LM3, åpen for annen trafikk.....	27
Figur 22 Modell LM3, stengt for annen trafikk.....	28
Figur 23 Laster i bredderetning for LM3, stengt for annen trafikk.....	28
Figur 24 Lastplassering i lengderetning for LM, stengt for annen trafikk.....	28
Figur 25 Lastplassering i bredderetning for LM1.....	29
Figur 26 Lastplassering i lengderetning for LM1.....	29
Figur 27 Lastplassering i bredderetning for LM3, åpent for annen trafikk.....	29
Figur 28 Lastplassering i lengderetning for LM3, åpent for annen trafikk.....	30
Figur 29 Lastplassering i lengderetning for LM3, stengt for annen trafikk.....	30
Figur 30 Lastplassering i lengderetning for LM3, stengt for annen trafikk.....	30
Figur 31 Lastplassering i bredderetning, LM3, åpent for annen trafikk.....	31
Figur 32 Punktlaster felt 2.....	31

Figur 33 Lastplassering i bredderetning for LM3 Boggi	32
Figur 34 Lastplassering i bredderetning for LM1 jevnt fordelt last.....	32
Figur 35 Lastplassering i lengderetning	33
Figur 36 Avstander boggilast 1	33
Figur 37 Lastplassering for beregning av skjærkrefter	35
Figur 38 Skjærkraft	36
Figur 39 Skjærkrefter – Verdier i kN	37
Figur 40 Lastplassering LM1 - 1 spenn	38
Figur 41 Lastplassering LM3, åpent for annen trafikk - Ett spenn	38
Figur 42 Lastplassering LM3, steng for annen trafikk - Ett spenn.....	39
Figur 43 Lastplassering for LM1 - To spenn	39
Figur 44 Lastplassering – To spenn	39
Figur 45 Lastplassering – To spenn	40
Figur 46 Lastplassering - To spenn	40
Figur 47 Lastplassering - To spenn	40
Figur 48 Lastplassering LM1 - To spenn	40
Figur 49 Lastplassering LM3, åpent for annen trafikk - To spenn.....	41
Figur 50 Lastplassering LM3, steng for annen trafikk - To spenn.....	41
Figur 51 Lastplassering LM1 – Tre spenn	41
Figur 52 Lastplassering - Tre spenn	42
Figur 53 Lastplassering - Tre spenn	42
Figur 54 Lastplassering - Tre spenn	42
Figur 55 Lastplassering - Tre spenn	42
Figur 56 Lastplassering LM1 - Tre spenn	42
Figur 57 Lastplassering LM3, åpent for annen trafikk – Tre spenn.....	43
Figur 58 Lastplassering LM3, stengt for annen trafikk - Tre spenn.....	43
Figur 59 Feltmoment for bjelkebro på ett spenn	44
Figur 60 Støttemoment LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - To spenn	45
Figur 61 Støttemoment LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - To spenn	46
Figur 62 Grenseområder for støttemoment - Tilfelle 1 og 2	47
Figur 63 Feltmoment for LM1 og LM3 - 2 spenn.....	48
Figur 64 Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - 3 spenn	49
Figur 65 Støttemoment LM1 og LM3. midtplassert i spenn AB - 3 spenn.....	50
Figur 66 Grenseområde for støttemoment - Tilfelle 1 og 2	50

Figur 67	Feltmoment for LM1 og LM3 - 3 spenn.....	51
Figur 68	Feltmoment - Ett spenn.....	52
Figur 69	Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - 2 spenn	53
Figur 70	Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - 2 spenn	54
Figur 71	Grenseområde for støttemoment - Tilfelle 1 og 2	55
Figur 72	Feltmoment for LM1 og LM3 - 2 spenn.....	56
Figur 73	Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - 3 spenn	57
Figur 74	Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - 3 spenn	58
Figur 75	Grenseområde for støttemoment – Tilfelle 1 og 2.....	59
Figur 76	Feltmoment for LM1 og LM3 - 3 spenn.....	60
Figur 77	T-tverrsnitt	61
Figur 78	Definisjon av l_0 for beregning av effektiv flensbredde	62
Figur 79	Effektiv flensbredde	63
Figur 80	Beregningsformler	63
Figur 81	Resultat for LM1 begge felt fra Robot	64
Figur 82	LM3 Eksempel lengde.....	65
Figur 83	LM3 Eksempel Bredde	65
Figur 84	Spesialkjøretøy Statnett Transport.....	66
Figur 85	Målsatt tegning av spesialkjøretøy	66
Figur 86	«Sammensetning av ulike elementer i horisontalkurvaturen».....	68
Figur 87	Sirkel, klotoide og rettlinje	69
Figur 88	Vendeklotoide.....	69
Figur 89	Eggkurve.....	69
Figur 90	Prinsippskisse for breddeutvidelse for en 2-felts vei.....	70
Figur 91	Formel for bestemmelse av breddeutvidelse	74
Figur 92	Sporingskurver for personbil (P)	75
Figur 93	Sporingskurver for modulvogntog (MVT)	75
Figur 94	Sporingskurver for LM3	76

1 Innledning

1.1 Oppgavebeskrivelse

I arbeidet med dimensjonering av broer har man allerede i mange år tatt hensyn til at spesifikke broer må kunne bære laster fra spesialtransport som går inn under kategorien LM3. (Standard Norge, 2010) (Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo, 2007) (Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo, 2019) (Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo, 2019)

Derimot i senere år har kravene blitt strengere og man må oftere enn før se på hvilke belastninger som kan komme fra spesialtransport på en gitt veistrekning og brokonstruksjon. Vi har i vår oppgave jobbet med å belyse denne problemstillingen.

1.2 Problemstilling

I vår oppgave ser vi nærmere på når man må ta særskilt hensyn til spesialkjøretøy definert som LM3 i prosjektering av nye broer. Ved hvilke spennlengder og antall spenn vil det være LM3 man må beregne etter.

Målet med dette er å finne et krysningspunkt/en tommelfingerregel som gir et inntrykk av når LM3 blir dimensjonerende og i hvilke tilfeller man kan anta at det ikke er dimensjonerende. Vi vil også gjennomføre en forenklet beregning av en midtbjelke i en bjelkebrokonstruksjon ved to ulike lasttilfeller for å danne et sammenligningsgrunnlag av to ulike lasttilfeller. Til slutt skal vi belyse hvilke krav som ligger til grunn for horisontalkurvaturen inn mot en brokonstruksjon.

1.3 Avgrensning

Avgrensningen for oppgaven vår er at vi ser vekk fra underbygning, andre ytre laster enn trafikklast og neglisjerer egenlasten i sammenligningsgrunnlaget. Ved forenklet beregning av midtbjelke vil vi forøvrig medregne egenlasten.

I delen om veiutforming har vi fokusert på horisontalkurvatur.

Bakgrunnen for disse begrensningene er at det er sammenligningen av LM1 og LM3 som er det vi ønsker å fremheve. De andre påvirkningene vil stort sett være lik ved gitt område og brotype. Veiutformingen er begrenset til horisontalkurvatur da fremkommelighet i kurver er vårt fokus.

1.4 Metode

Oppgaven er bygget på data fra Statens Vegvesens håndbøker, relevante Eurokoder, relevant regelverk og betongkonstruksjoner.

Statens Vegvesen håndbok N400 «Broprosjektering» (Statens Vegvesen, 2015) angir retningslinjer for dimensjonering av brokonstruksjoner og henviser til henholdsvis NS-EN 1991-2:2003+NA:2010 «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 2: Trafikklast på broer» (Standard Norge, 2010) og «Forskrift for trafikklast på broer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner i det offentlige vegnettet (trafikklastforskrift for broer m.m.)» (Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo, 2019). Disse er sammen med Statens Vegvesens håndbok R412 «Bruklassifisering» (Vegdirektoratet, 2014) og «Elastisk analyse av kontinuerlige bjelker med enkle matematiske ligninger» (Fallsen) er benyttet som grunnlagsdata for våre beregninger av brokonstruksjoner.

Statens Vegvesens håndbøker N100 «Veg- og gateutforming» (Statens Vegvesen, 2017) og V120 «Premisser for geometrisk utforming av veger» (Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014) gir bestemmelser for veiutforming og er benyttet til vurdering av horisontalkurvatur. Til vurdering av aktuell brokonstruksjon har vi hentet informasjon fra Statens Vegvesens håndbok V440 «Broregistrering» (Vegdirektoratet, 2014).

Ved forenklet beregning av midtbjelke har vi brukt NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008 «Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger» (Standard Norge, 2018), og «Betongkonstruksjoner» (Sørensen, 2013).

Til håndberegninger har vi benyttet Microsoft Excel og MathCAD. Vi har også benyttet Autodesk programmet Robot Structural Analysis til å gjennomføre beregninger. Her har vi brukt funksjonen «moving loads» for å tilnærme oss lastpåvirkningen fra trafikklastene. Vi har også brukt dette programmet til å sammenligne resultater og å hente ut diagrammer. Modeller og tegninger er utarbeidet i Autodesk Revit.

2 Generell beskrivelse av bro og brotype

En bro kan defineres som en bærende konstruksjon med spennvidde større enn eller lik 2,5 meter, som bærer trafikkklaster. Brobegrepet inkluderer også nedfylte konstruksjoner, som rør og kulverter. Broer spenner typisk over vassdrag, daler, jernbaner eller andre veger og gangveger. (Øderud & Nordahl, 2019)

2.1 Brotyper

Hvilken brotype man velger må gjøres på grunnlag av en helhetsvurdering. Det er atskillige hensyn man må ta og krav som må tilfredsstilles. Statens Vegvesens V440 deler inn i ni hovedgrupper av brotyper, som gjengitt i tabell 1.

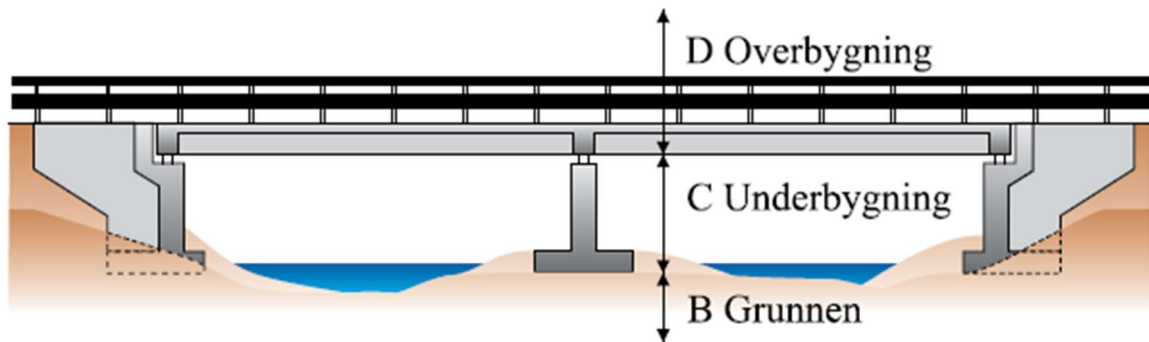
Kodenummer	Kategori
1	Kulvert, bjelkeramme, rør og hvelv i fylling
2	Platebro, bjelkeplatebro og ribbeplatebro
3	Bjelkebro
4	Kassebro
5	Buebro og hvelvbro
6	Fagverksbro, sprengverksbro og hengeverksbro
7	Hengebro, skråstagbro, flytebro og neddykket rørbro
8	Kai, bevegelig bro og andre brotyper
9	Annen byggverkstype

Tabell 1 Hovedgrupper av brotyper
(Vegdirektoratet, 2014)

2.2 Bjelkebro, platebro og kassebro

Disse tre brotypene er de enkleste og mest grunnleggende brotypene som finnes. De har mange felles kjennetegn når det kommer til konstruksjonens statiske system, virkemåte og oppbygning. En bro består av overbygning, underbygning og grunnen (Figur 1). Vi skal se nærmere på overbygningen til bjelkebro og platebro.

Overbygningen beskriver normalt de elementer som holdes oppe av underbygningen og som utgjør hovedbæresystemet til brokonstruksjonen.

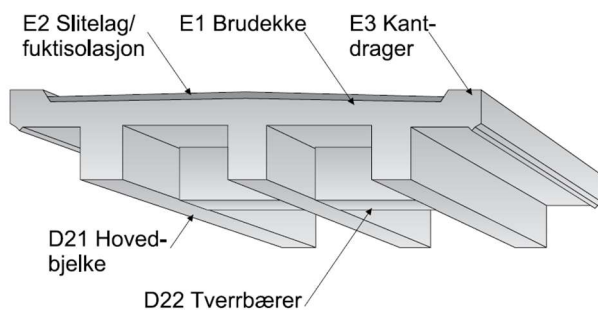


Figur 1 Broelementer: Inndeling av en typisk bro i hovedelementer, grunnen, underbygning og overbygning (Vegdirektoratet, 2014)

2.2.1 Bjelkebro

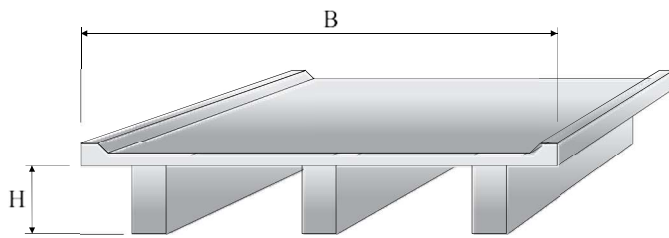
Bjelkebro er en undertype av hovedgruppe 3 etter Statens Vegvesen kategorisering av brotyper. Bjelkebro er en bro som består av en flere bjelker som hviler på pilarer/opplegg. I denne brotypen utgjør bjelkene broens hovedbæresystem. Lastene fra brodekket blir overført direkte til bjelkene broens lengderetning. Deretter går lastene til broens underbygning enten i endeopplagrene eller via tverrbærerne (figur 2) og ned i søylene/oppleggene.

Betongbjelkebro er en av de vanlige brotype da den er rimelig og ofte sees som estetisk pent.

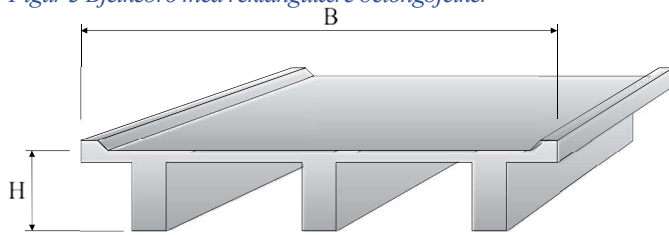


Figur 2 Typiske elementer i en bjelkebro (Vegdirektoratet, 2014)

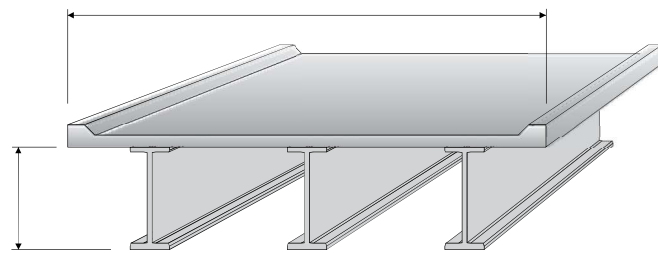
Bjolkene er som regel i betong eller i stål og kan ha en hvilken som helst tverrsnittform. Det mest vanlige for broer er rektangulære bjelker: I-bjelker, T-bjelker eller U-formende bjelker med vertikale steg og horisontale flenser. Se figur 3,4 og 5.



Figur 3 Bjelkebro med rektangulære betongbjelker



Figur 4 Bjelkebro med T-bjelker i betong

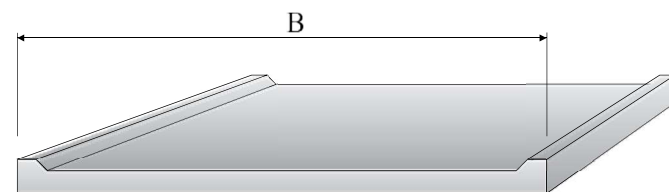


Figur 5 Bjelkebro med I-bjelker i stål
(Vegdirektoratet, 2014)

2.2.2 Platebro

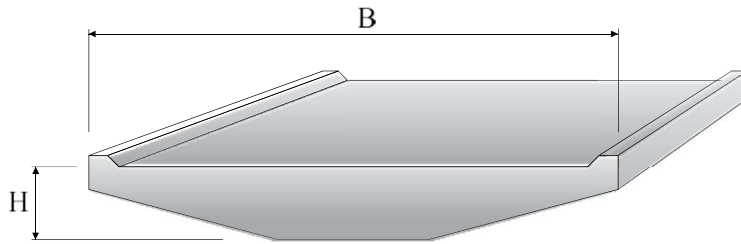
Platebro skiller seg fra bjelkebro ved at bjelkene byttes ut med plater og platen utgjør hovedbæresystemet. Platen overfører lastene direkte til underbygningen uten understøttelse av bjelker. Hovedbæreretningen er i broens lengderetning.

«Broer regnes som platebro dersom $\frac{B}{H} > 5$, hvor B er total brobredde og H er platetykkelsen.» Se figur 6.



Figur 6 Platebro

«Dersom $1 < \frac{b}{H} \leq 5$ regnes broen som en bjelkeplatebro. B er minste bredde i underkant av platen.» Se figur 7.

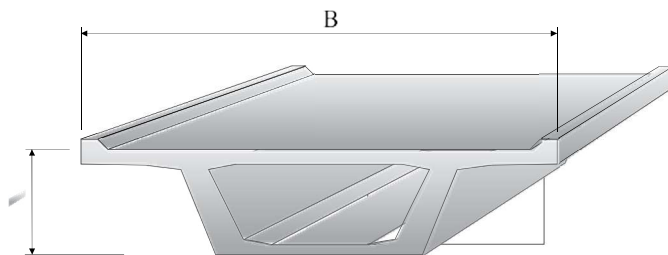


Figur 7 Bjelkeplatebro

2.2.3 Kassebro

Kassebro er i prinsippet lik de foregående, men her er hovedbæresystemet formet som en kasse hvor hovedbjelken er formet som et hulprofil. Kassebro bygges normalt i betong, men også i kompositt av stål og betong hvor broplaten er i betong og bunnplaten og steg i stål. Formen har typisk et rektangulært eller trapesformet tverrsnitt.

Eksempel på hvordan et typisk kassetverrsnitt kan se ut vises i figur 8.



Figur 8 Kassebro med to steg i tverrsnitt

(Vegdirektoratet, 2014)

2.2.4 Vurdering av brotype

Vi velger videre å se nærmere på bjelkebro og platebro da dette gir godt grunnlag for våre beregninger.

2.3 Materialer

I dette delkapitlet presenteres ulike materialer som kan være aktuelle å bruke i konstruksjonen

2.3.1 Stål

Stål er en legering av jern med innhold av karbon opptil 2,1%. Konstruksjonsstål har betydelig mindre karboninnhold (maks. 0,2%) og inneholder også flere andre legeringselementer for å oppnå ønskende materialegenskaper. Legeringselementene er for eksempel aluminium, fosfor, hydrogen, kobber, krom, mangan, nikkel, nitrogen, oksygen, silisium og svovel.

Konstruksjonsstål spesifiseres etter fasthetsklasse og stålkvalitet. Fasthetsklasse angir materialets flytespenning og stålkvalitet angir den kjemiske sammensetningen, termisk og mekanisk bearbeiding og slagseighet. Generelt ønsker vi konstruksjonsstål med høy fasthet og høy duktilitet som viser stor deformasjon før brudd.

Konstruksjonselementer i stål blir hovedsakelig produsert som standardiserte profiler (bjelker, plater stenger, rør osv.). Elementene blir satt sammen til en ferdig konstruksjon ved sveis eller skruer.

(Norsk Stålforbund, 2010)

2.3.2 Betong

Betong er et meget bestandig byggemateriale som brukes i broer, bygninger, dammer, tunneler etc. Det er sammensatt av vann, sement og tilslag. For å få en god betong må tilslagsmaterialene ha tilstrekkelig fasthet og bestandighet. Materialet har stor trykkfasthet, lang levetid og god motstandsdyktighet mot brann. Strekkfastheten i betong er veldig lav i forhold til trykkfastheten og derfor må strekkrefter tas opp av armering. Det er to armeringstyper som benyttes i bro: slakkarmering og spennarmering (Thue, 2019).

«Slakkarmering er armeringsstål som støpes inn i betongkonstruksjoner uten å bli påført ytre krefter. Spennarmering er armering som spennes opp med strekkraft, slik at man får trykkspenninger i betongen».

(Store Norske Leksikon, 2009)

Betong klassifiseres etter fasthetsegenskaper som angitt i [tab. 3.1] i NS-EN 1992-1-1 (8).

Med fasthet menes hvor mye en konstruksjonsdel har evne til å tåle før brudd.

(Standard Norge, 2018)

2.4 Laster

2.4.1 Permanente laster

En permanent last er en last som ikke varierer med tiden. Eksempler på en permanent last er egenlast, tyngde av fastmontert utstyr og jordtrykk. Vi ser i utgangspunktet vekk fra egenlaster, med unntak av ved «Eksempel på dimensjonering av midtbjelke».

2.4.2 Variable laster

Variable laster er laster som varierer over tid. Dette omfatter blant annet:

- ♦ Trafikklaster
- ♦ Støt- og fortøyningslaster fra ferje
- ♦ Naturlaster
- ♦ Andre variable laster som:
 - Last fra variabel ballast og utstyr som kan fjernes.
 - Laster påført konstruksjonen i midlertidige faser som fabrikkasjon, installering, spesielle kortvarige operasjoner, fjerning og lignende.
 - Lastene er definert i NS-EN 1991-2 og håndbok R412.

(Vegdirektoratet, 2014) (Standard Norge, 2010)

2.4.2.1 Trafikklaster

Trafikklaster bestemmes i henhold til NS – EN 1991-2:2003+NA:2010 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 2: Trafikklast på broer

Last fra biler, tungtransport, spesialtransport, gående og syklende er definert i tabell

NA.4.2.1.(1).

(Standard Norge, 2010)

Trafikklast er belastningen i vertikal og horisontal retning på kjørebane. Den plasseres ugunstig i lengderetning og tverretning innenfor den tilgjengelige føringsbredden.

Tabell 4.1 i NS 1991-2 angir metode for inndeling av antall kjørefelt og bredde av resterende område, vist i tabell 2.

Bredde av kjørebane	Antall kjørefelt	Bredde av kjørefelt	Bredde av resterende område
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w_r = w - 3 * n_1$

Tabell 2 Metode for inndeling av antall kjørefelt

2.4.2.1.1 Vertikale trafikklaster

Med hensyn på vertikale trafikklaster har vi valgt å se på de to følgende modellene:

2.4.2.1.1.1 Lastmodell 1

Lastmodell 1 (LM1) består av to delsystemer. Dobbeltakslet konsentrert last og jevnt fordelt last. Dobbeltakslet konsentrert last: Hver aksel har lasten $\alpha Q \times Q_k$. Hvor αQ er korreksjonsfaktor. Lasten fordeles på to identiske hjul slik at lastene for hvert hjul blir $0,5 \times \alpha Q \times Q_k$.

Jevnt fordelt last: Kan plasseres vilkårlig for å danne de minst gunstige lastkombinasjonene $\alpha q \times q_k$. Hvor αq er korreksjonsfaktor.

Disse lastene er definert i NS-EN 1991-2: Figure 4.2a, se tabell 3.

De karakteristiske verdiene for Q_{ik} og q_{ik} for Last Modell 1

Plassering	Tandemsystem TS	UDL system
	Aksellast Q_{ik} (kN)	q_{ik} (eller q_{rk}) ($\frac{kN}{m^2}$)
Lastfelt 1	300	9
Lastfelt 2	200	2,5
Lastfelt 3	100	2,5
Andre lastfelt	0	2,5
Resterande areal (q_{rk})	0	2,5

Tabell 3 Karakteristiske verdier for Q_{ik} og q_{ik} for LMI

Korreksjonsfaktorer er definert i punkt [NA. 4.3.2(3)] NS-EN 1991-2, se tabell 4.

Korreksjonsfaktorer
$\alpha_{Qi} = 1.0$ for $i = 1, 2$ og 3
$\alpha_{q1} = 0,6$
$\alpha_{qi} = 1,0$ for $i > 1$
$\alpha_{qr} = 1.0$

Tabell 4 Korreksjonsfaktorer for LMI

Disse korreksjonsfaktorene gjelder for beregning av globale lastvirkninger på broer med største spennvidde på opptil 500 meter.

(Standard Norge, 2010)

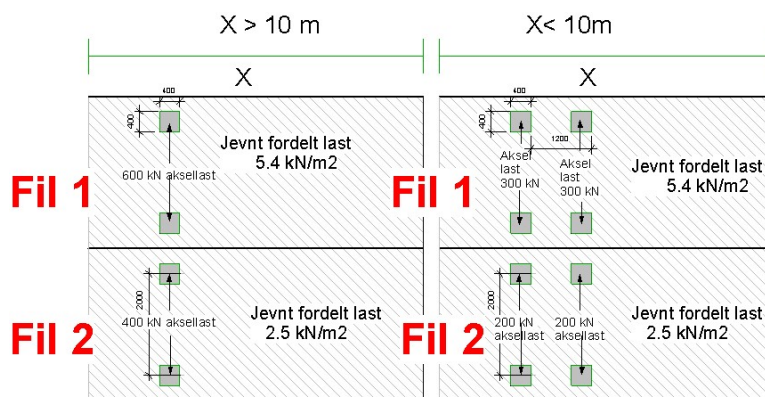
Tabell 5 viser laster i bruddgrense for LM1 trafikklast. Det er disse lastene som danner grunnlaget for våre beregninger.

Plassering	Tandemsystem	Jevnt fordelt last
Lastfelt 1	300 kN	$5,4 \frac{kN}{m^2}$
Lastfelt 2	200 kN	$2,5 \frac{kN}{m^2}$
Resterende areal (qrk)		$2,5 \frac{kN}{m^2}$

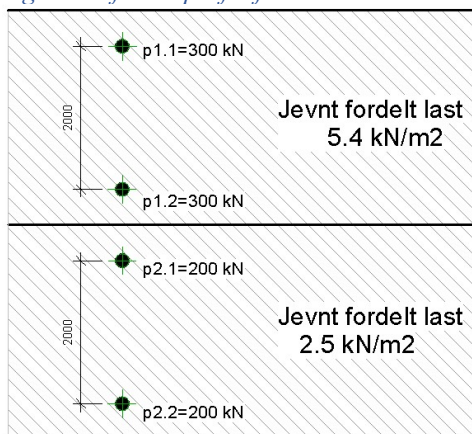
Tabell 5 Laster i bruddgrense for LM1

Lastdefinisjoner for LM1, som vi har valgt å forenkle for å gjøre håndberegningen mer håndterbar. Den aktuelle forenklingen her er at vi har gjort om boggilastene fra en flatelast (figur 9) på $0.4 m \times 0.4 m$ til punktlaster (figur 9). Punktlastene er plassert i senter av flatelastene. Avgrensningen på 10 meter er definert i [4.3.2(6)b], men vi har valgt å bruke forenklingen i figur 10 i alle beregninger.

(Standard Norge, 2010)



Figur 9 Trafikklast per felt for LM1



Figur 10 Forenklet trafikklast fra LM1

(Standard Norge, 2010)

2.4.2.1.1.2 Lastmodell 3

Lastmodell 3 (LM3) er definert etter «Forskrift for trafikklast på bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner i det offentlige vegnettet (trafikklastforskrift for bruer m.m.)» Dette er vist i tabell 6. (Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo, 2019) og NS-EN 1991-2 (Standard Norge, 2010).

”Trafikklastforskrift for bruer m.m. § 5.Engangstransporter”

<i>Totallast</i>	<i>Akselsammenstilling</i>	<i>Akselavstander</i>	<i>Total lengde</i>
	Antall x linjeakselast	(antall-1) x e + 12 + ...	
2 700 kN	18 x 150 kN	17 x 1,50 m	25,5 m
4 500 kN	15 x 150 kN + 15 x 150 kN	14 x 1,50 m + 12 m + 14 x 1,50 m	54,0 m

Tabell 6 Engangstransport

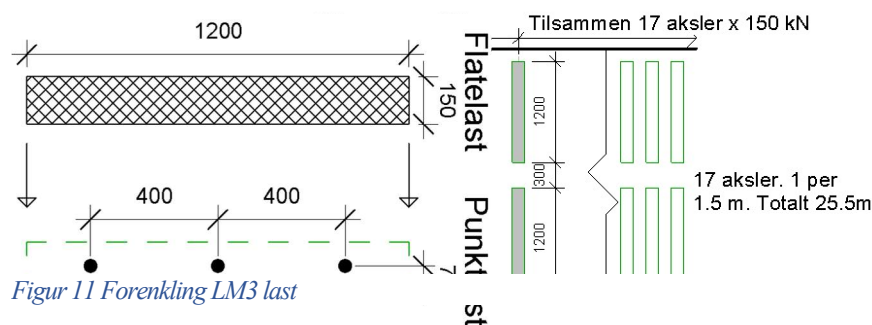
Engangstransporter skal alltid ha følge og kontroll med hensyn til sentrisk passering, hastighet eller annen pålagt passeringmåte. Det forutsettes at kontrollen for engangstransporter er strengere enn for spesialtransporter med følge.

Engangstransporter kan ikke tillates uten at broene kontrolleres etter nærmere kriterier for tillatt overbelastning og at det utstedes dispensasjon.

Det regnes ikke med horisontale trafikkklaster på broen ved engangstransporter.

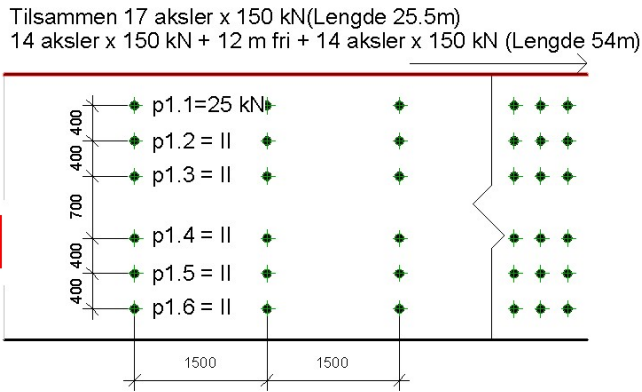
Engangstransporter er kjøretøy med så store aksellaster og/eller totalvekt og/eller utforming at de fører til større påkjenninger på broene enn spesialtransport. Det forutsettes at slike transportert kun forekommer en eller svært få ganger i levetiden til en bro. For slike transportert kreves det dispensasjon for kjøring med følge. Dispensasjonen inneholder normalt instruks om passeringmåte for de utsatte broene på transportruten. Dispensasjonen utstedes enkeltvis for hver transport.» (Vegdirektoratet, 2014)

Lastdefinisjon for LM3 som vi har valgt å forenkle for å gjøre håndberegningen mer håndterbar. Den aktuelle forenklingen her er og at vi har gjort om boggilastene fra en flatelast (figur 11) på 0.15 m x 1.2 m til punktlaster (figur 11 og 12).



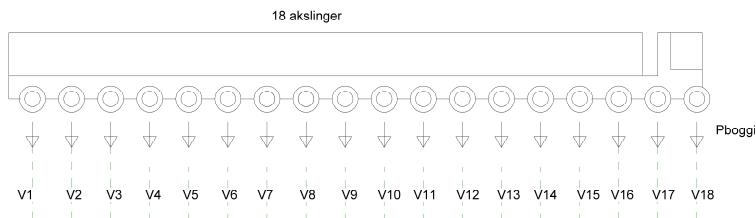
Figur 11 Forenkling LM3 last

Fil 1



Figur 12 Forenklet trafikklast fra LM3

Ved beregning vil boggilast (p_{boggi}) virke i to tilfeller: 1 vogn på 25,5m, 18 aksellaster med 1,5 m mellomrom mellom hver last, vist i figur 13.



Figur 13 Boggilast, 1 vogn

2 vogner på totalt 54 m, 15 akslinger med 1,5 m avstand mellom hver last + 12 m mellomrom mellom vognene + 15 akslinger med 1,5 m avstand mellom hver last. Vist i figur 14.



Figur 14 Boggilast, 2 vogner

2.4.2.2 Horisontale trafikklaster

I et beregningshenseende vil man måtte ta hensyn til følgende horisontale trafikklaster: bremselast og akselerasjonslast, side og sentrifugallast. I vår oppgave har vi valgt å fokusere på de vertikale trafikklaster, og våre beregninger tar derfor ikke hensyn til de horisontale trafikklaster.

2.4.2.2.1 Bremselast (B) og akselerasjonslaster

Bremselast Q_{lk} er definert som en langsgående kraft som virker i kjørebanelens overflate.

«Øvre grense for bremskraft og akselerasjonskraft Q_{lk} settes lik 900 kN.»

Bremselast for LM3 spesifiseres, hvis aktuelt, for hvert enkelt prosjekt.

Akselerasjonskrefter antas å ha samme størrelse som bremselaster, men i motsatt retning.

(Standard Norge, 2010)

2.4.2.2.2 Sidelast (S)

Virking av skjev eller usymmetrisk bremsing av kjøretøy, sidestøt, beregnes på grunnlag av en vilkårlig plassert horisontallast $S = 25\%$ av bremselasten ovenfor. Den opptrer samtidig med bremselasten og den tilhørende vertikallasten.

$$S = 0,25 * B$$

Sidelasten forutsettes å virke vinkelrett på broens lengderetning og i høyde med kjørebanelen.

2.4.2.2.3 Sentrifugallast (S_c)

Sentrifugallaster er lastene som kommer av at kjøretøyene svinger når de kjører over broen.

Disse lastene virker i broens tverretning og virker samtidig med vertikallasten, men ikke samtidig med bremselast og sidelast.

(Vegdirektoratet, 2014)

2.5 Lastkombinasjoner

Lastkombinasjoner gjøres etter NS-EN 1990 tabell [NA.A2.4(B)] og NS-EN 1991-2 [Tabell 4.4a], punkt [4.3.2] og [4.3.4]. I [Tabell 4.4a] har vi brukt gruppe gr1a og gr5.

2.5.1 Bruddgrensetilstand (ULS)

I bruddgrensetilstand gjøres kombinasjonene etter [Tabell NA.A2.4(B)], se tabell 7.

Sikkerhetsfaktorer er vist i tabell 8.

	Permanente laster		For- spenning	Dominerende variabel last	Øvrig variable laster
	Ugunstig	Gunstig			
6.10a	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	γ_p^P	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
6.10b	$\xi \gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	γ_p^P	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Tabell 7 NA.A2.4(B) last kombinasjoner i bruddgrensetilstand (Standard Norge, 2016)

Symbol	Verdi	Merknad
$\gamma_{G,sup}$	1,35	Gunstig permanent last
$\gamma_{G,j,inf}$	1,0	Ugunstig permanent last
ξ	0,89	Egenvekt
γ_p		Se Eurokode, spennarmering
γ_Q	1,35	Veitrafikk (0 hvis gunstig)
γ_Q	1,5	Øvrige variable laster (0 hvis gunstig)

Tabell 8 Sikkerhetsfaktorer fra NS-EN 1990 (Standard Norge, 2016)

Ved beregning av lasttilfeller med LM1 og LM3 er tabell NA.4.4a brukt for å bestemme verdien på de ulike lastene, se tabell 9.

		Kjørebane	
Lastmodell		Vertikale krefter	
Referanse		4.3.2	4.3.4
Lastsystem		LM1	LM3
Lastgrupper	gr1a	Karakteristisk verdi	
	gr5	Se tillegg A	Karakteristisk verdi

Tabell 9 NA. 4.4a (Standard Norge, 2010)

3 Trafikklaster fra LM1 og LM3 på bjelkebro og platebro

I dette delkapittel har vi sett nærmere på hvilke tilfeller som gjelder når enten trafikklast fra LM1 eller LM3 klassifiserte kjøretøy blir dimensjonerende. Dette har vi gjort ved å beregne lasttilfeller ved ulikt antall spenn og spennlengder. I hvert tilfelle har vi sammenlignet:

- ♦ Last LM1 i begge felt - gitt navnet “LM1”
- ♦ Last LM1 i felt 1; Last LM3, enten 1 vogn eller 2 vogner, i felt 2 - gitt navnet “LM3, åpen for annen trafikk”
- ♦ Last LM3, midtplassert, enten 1 vogn eller 2 vogner - gitt navnet “LM3, stengt for annen trafikk”
- ♦ Regner på hovedvei H2 etter Statens Vegvesen håndbok N100. Velger her forenklet å regne på laster kun i kjørebane. Det vil si en feltbredde på 3,5 m, i to felt som gir en total bredde på 7 m.

(Statens Vegvesen, 2017)

3.1 Lasttilfeller på bjelkebro

Vi forenkler tverrsnittet for bjelkebroen i beregningen, og plasserer sidebjelker (A og C) ut til ende av plate og bjelke B plasseres i midten.

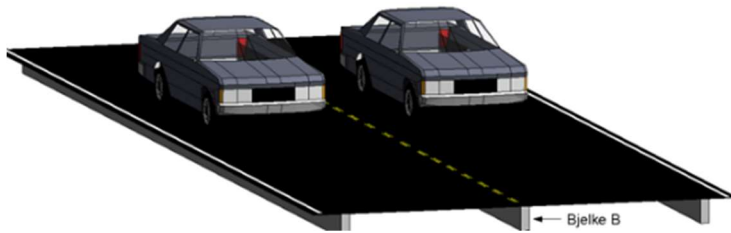
Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på bjelke B, vist i figur 15. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y-aksen som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene.



Figur 15 Bjelketverrsnitt

3.1.1 Lasttilfelle: LM1

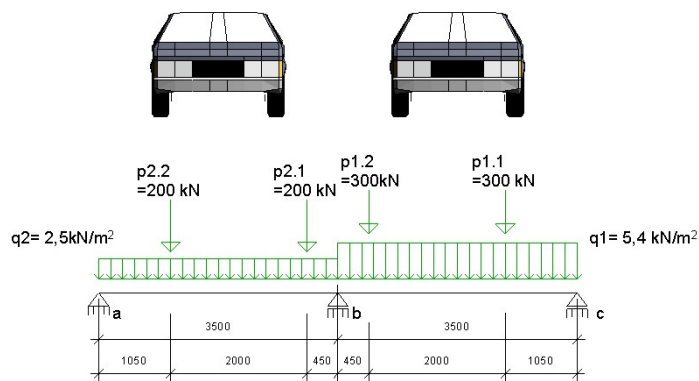
Modell av LM1 last på bjelkebro med tre bjelker, vist i figur 16. Kjøretøyene i modell er kun til visuell hjelp for å skille mellom de forskjellige lastmodulene.



Figur 16 LM1 Bjelkebro

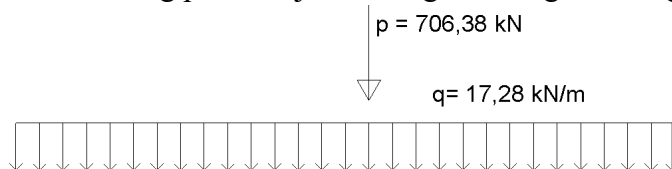
3.1.1.1 Lastplassering i bredderetning LM1

Figur 17 viser lastene fra LM1 i begge felt i bredderetning.



Figur 17 Lastplassering i bredderetning for LM1

Lastfordeling på midtbjelke i lengderetning, vist i figur 18.



Figur 18 Lastplassering i lengderetning LM1

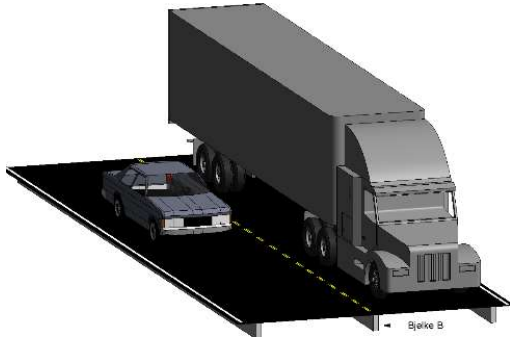
Punktlast (p) virker i ett punkt i lengderetning og plasseres ugunstig på bjelke for å finne høyeste feltmoment og støttemoment.

UDL last (q) virker jevnt fordelt i lengderetning, og plasseres ugunstig for å finne høyeste feltmoment og støttemoment.

3.1.2 Lasttilfelle: LM3, åpen for annen trafikk.

En kombinasjon av LM3 i et felt og LM1 i det andre feltet, vist i figur 19. Lastene for LM1 er de samme som benyttes i felt nummer to ved en ren LM1 beregning, se figur 9 og 10.

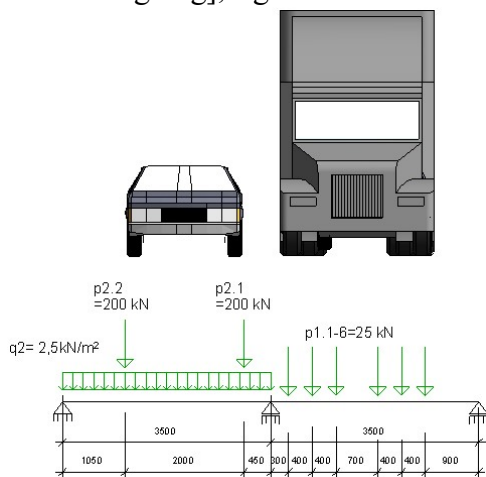
LM3 last er i dette tilfellet plassert i felt 2 og LM1 plassert i felt 1.



Figur 19 Modell Kombinasjon av LM1 og LM3

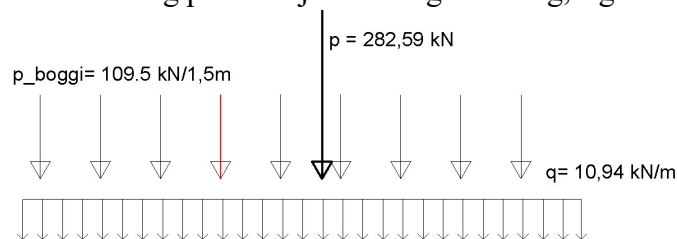
3.1.2.1 Lastplassering i bredderetning LM3, åpen for annen trafikk

Lastplassering i bredderetning LM3, felt 1 åpen for LM1 felt 2 last (Lik last som felt 2 har i LM1 beregning], figur 20.



Figur 20 Laster i bredderetning LM3, åpen for annen trafikk

Lastfordeling på midtbjelke i lengderetning, figur 21.

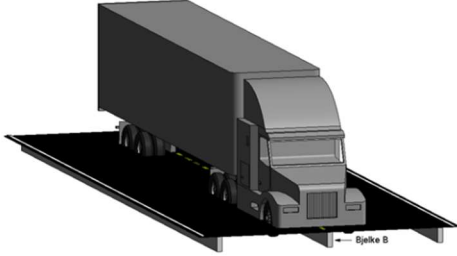


Figur 21 Laster i lengderetning for LM3, åpen for annen trafikk

3.1.3 Lasttilfelle: LM3, stengt for annen trafikk

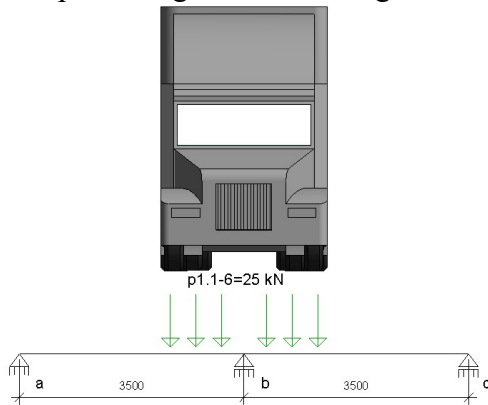
3.1.3.1 Lastplassering i bredderetning LM3, stengt for annen trafikk.

LM3 last er i dette tilfellet midtplassert, figur 22.



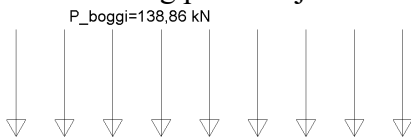
Figur 22 Modell LM3, stengt for annen trafikk

Lastplassering i bredderetning LM3, stengt for annen trafikk, figur 23.



Figur 23 Laster i bredderetning for LM3, stengt for annen trafikk

Lastfordeling på midtbjelke i lengderetning, figur 24.



Figur 24 Lastplassering i lengderetning for LM, stengt for annen trafikk

3.2 Lasttilfeller på platebro

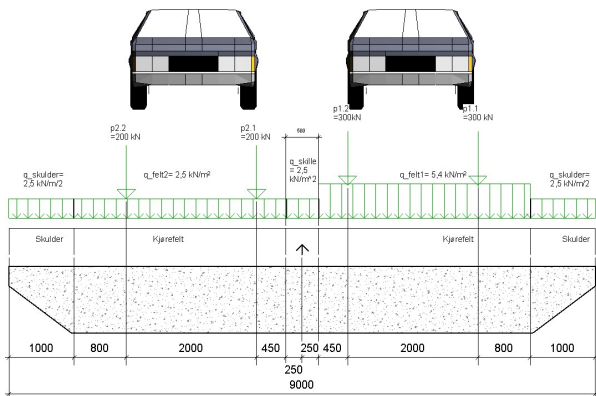
For platebro har vi beregnet de samme tilfellene som ved bjelkebro. Det vil si lasttilfellene:

LM1; LM3, åpen for annen trafikk og LM3, stengt for annen trafikk.

Regner her på hovedvei type H1 etter Statens Vegvesen håndbok N100. Total veibredde er 9 m. Hvert kjørefelt er 3,25 m. Skille kjøreretning er 0,5 m. Skulderbredde er 1 m på hver side av kjørefelt. Som vist i figur 25.

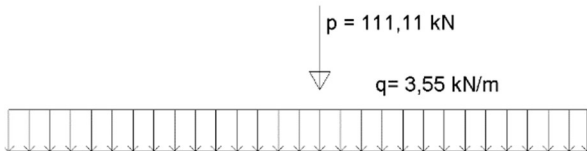
3.2.1 Lastplassering LM1

Lastplassering per meter i bredderetning LM1, se figur 25.



Figur 25 Lastplassering i bredderetning for LM1

Lastplassering i lengderetning LM1, figur 26.



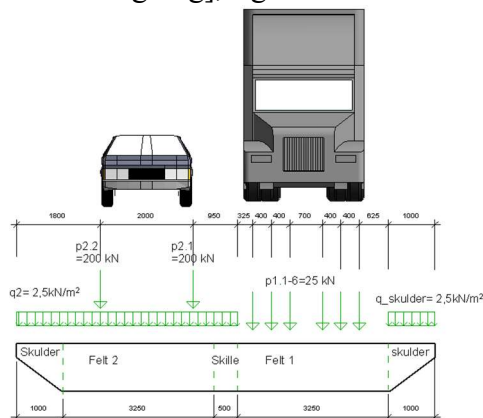
Figur 26 Lastplassering i lengderetning for LM1

Punktlast (p) virker i ett punkt i lengderetning og plasseres ugunstig på bjelke for å finne høyeste feltmoment og støttemoment.

UDL last (q) virker jevnt fordelt i lengderetning, og plasseres ugunstig for å finne høyeste feltmoment og støttemoment.

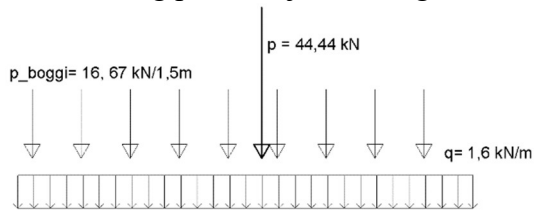
3.2.2 Lastplassering LM3, åpen for annen trafikk

Lastplassering i bredderetning LM3, felt 2 åpen for LM1 felt 2 last (Lik last som felt 2 har i LM1 beregning], figur 27.



Figur 27 Lastplassering i bredderetning for LM3, åpent for annen trafikk

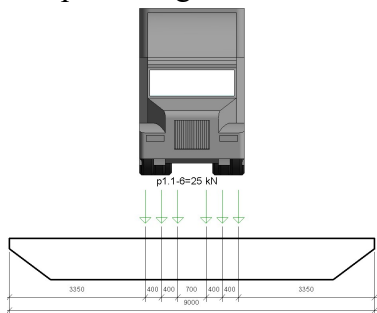
Lastfordeling på midtbjelke i lengderetning, figur 28.



Figur 28 Lastplassering i lengderetning for LM3, åpent for annen trafikk

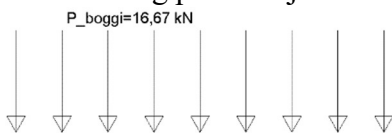
3.2.3 Lastplassering LM3, stengt for annen trafikk.

Lastplassering i bredderetning LM3, stengt for annen trafikk, figur 29.



Figur 29 Lastplassering i lengderetning for LM3, stengt for annen trafikk

Lastfordeling på midtbjelke i lengderetning, figur 30.



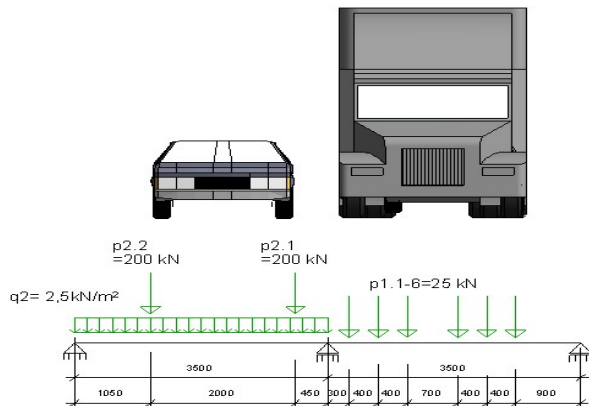
Figur 30 Lastplassering i lengderetning for LM3, stengt for annen trafikk

3.3 Eksempel på beregning i Excel

Eksempelet under viser en beregning av en bjelkebro med lasttilfelle LM3, åpent for annen trafikk, 1 vogn. Her er det to spenn med en spennlengde på 31,5 m. Vi skal beregne feltmomentet.

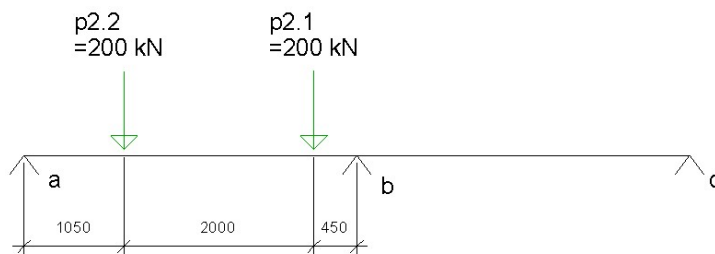
3.3.1 Metode

Steg 1: Beregner vi laster i bredderetning for å finne lastfordeling på midtbjelke, figur 31.



Figur 31 Lastplassering i bredderetning, LM3, åpent for annen trafikk

Beregner punktlasten P_{felt2} , til venstre i figur 32. Denne virker i et punkt i lengderetning på bjelke B.



Figur 32 Punktlaster felt 2

Beregning av P_{felt2}

$$4M_b = l \times p \times \text{sum}\left(\left(\frac{ax}{l}\right) - \left(\frac{ax}{l}\right)^3 \dots \text{antall ledd}\right)$$

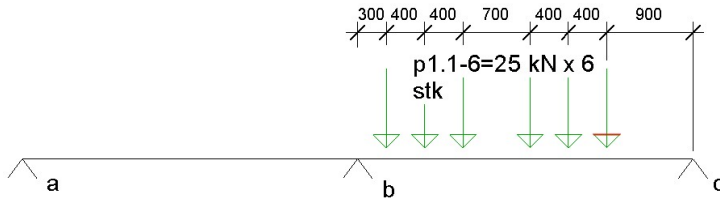
$$M_b = \frac{1}{4} \times l \times p \times \left(\left(\left(\frac{1,05}{3,5} \right) - \left(\frac{1,05}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{3,05}{3,5} \right) - \left(\frac{3,05}{3,5} \right)^3 \right) \right) = 84,47 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{M_b + p_{200} \times (1,05 + 3,05)}{l} = 258,42 \text{ kN} \quad A_y = V_a = P_{200} \times 2 \text{ stk} - V_b = 141,58 \text{ kN}$$

$$\sum M_c = 0 = -A_y \times 2l - B_y \times l + p_{200} \times (0,45 + l + 2,45 + l).$$

$$B_y = 282,55 \text{ kN} = P_{felt2}$$

Steg 2: Beregner vi boggilasten P_{boggi} i felt 1, til høyre i figur 33, som virker i lengderetning på bjelke B.



Figur 33 Lastplassering i bredderetning for LM3 Boggi

Beregner P_{boggi} :

$$4M_b = l \times p_{boggi} \times \text{sum}\left(\left(\frac{ax}{l} - \left(\frac{ax}{l}\right)^3 \dots \text{antall ledd}\right)\right)$$

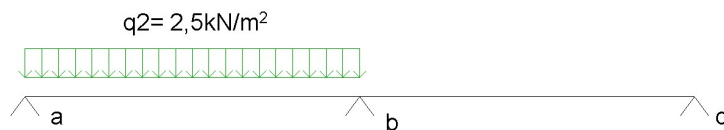
$$M_b = \frac{1}{4} \times l \times p_{boggi} \times \left(\left(\left(\frac{0,9}{3,5} - \left(\frac{0,9}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{1,3}{3,5} - \left(\frac{1,3}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{1,7}{3,5} - \left(\frac{1,7}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{2,4}{3,5} - \left(\frac{2,4}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{2,8}{3,5} - \left(\frac{2,8}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{3,2}{3,5} - \left(\frac{3,2}{3,5} \right)^3 \right) \right) \right) \right) \right) = 10,81 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{M_b + P_b(0,9 + 1,3 + 1,7 + 2,4 + 2,8 + 3,2)}{l} = 90,946 \text{ kN} \quad C_y = V_c = P_b \times 6 \text{ stk} - V_b = 59,05 \text{ kN}$$

$$\sum M_a = 0 = -C_y \times 2l - B_y \times l + p_b \times (l + 0,3 + l + 0,7 + l + 1,1 + l + 1,8 + l + 2,2 + l + 2,6).$$

$$B_y = 94,04 \text{ kN} = P_{boggi}$$

Steg 3: Beregner q_{felt2} som virker i lengderetning på bjelke B, figur 34.



Figur 34 Lastplassering i bredderetning for LMI jevnt fordelt last

Beregner q_{felt2} :

$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

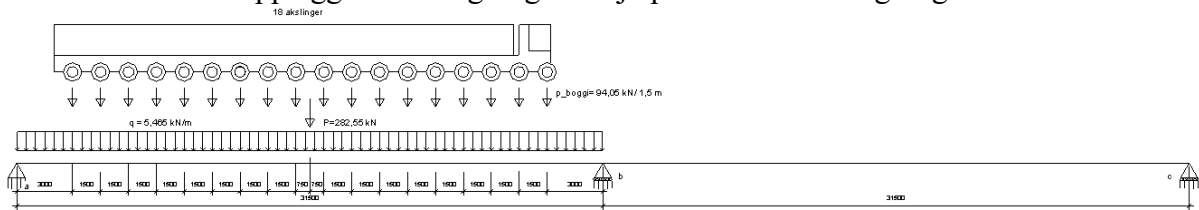
$$M_b = \frac{q}{16} \times l^2 = 1,914 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{M_b + \frac{q \times l^2}{2}}{l} = 4,92 \text{ kN} \quad A_y = V_a = q \times l - V_b = 3,83 \text{ kN}$$

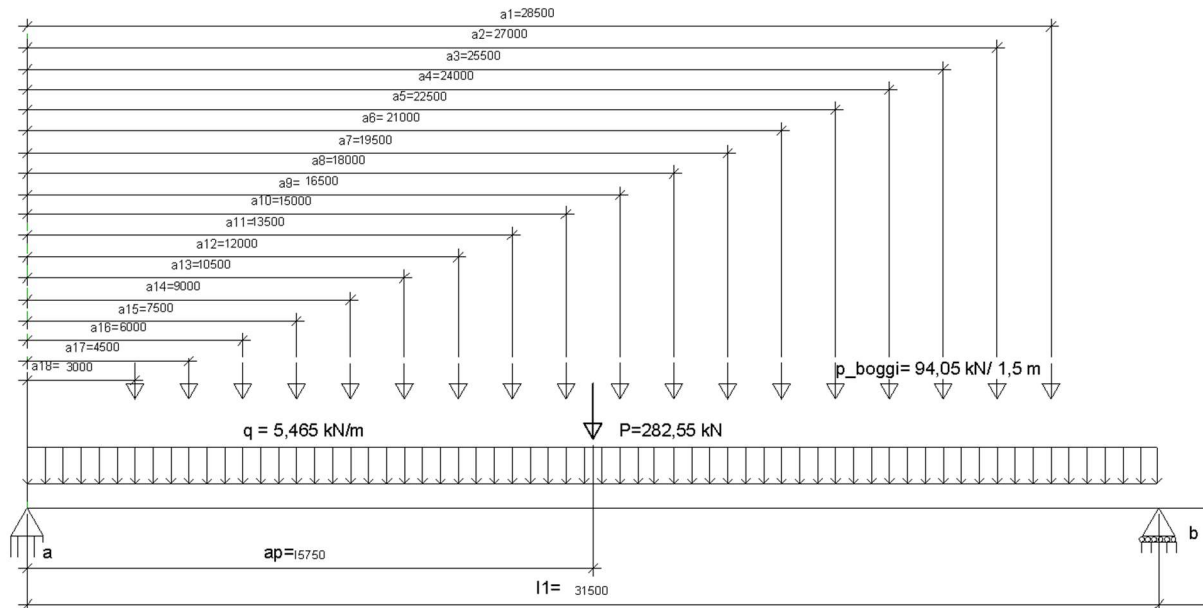
$$\sum M_c = 0 = -A_y \times 2 \times l - B_y \times l + q \times l \times \left(l + \frac{l}{2} \right).$$

$$B_y = 5,465 \text{ kN} = q_{felt2} = 5,465 \text{ kN/m}$$

Figur 35 viser lastplassering i lengderetning for LM3_{lvogn}, åpent for annen trafikk, og figur 36 viser avstander til opplegg a for utregning ved hjelp av 3-momentslikningen.



Figur 35 Lastplassering i lengderetning



Figur 36 Avstander boggilast l

Steg 4: Benytter 3-momentslikning for å beregne støttemoment

$$M_A l_1 + 2M_B(l_1 + L_2) + M_C l_2 = -\frac{q_1}{4} \times l_1^3 - \frac{q_2}{4} \times l_2^3 - l_1^3 \sum p_{1,i} \left(\frac{a_{1,i}}{l_1} - \left(\frac{a_{1,i}}{l_1} \right)^3 \right) -$$

$$l_2^3 \sum p_{1,i} \left(\frac{a_{2,i}}{l_2} - \left(\frac{a_{2,i}}{l_2} \right)^3 \right)$$

$$M_a = M_c = 0$$

$$a_p = 0,5 \times l = 15,75 \text{ m}$$

Endrer om til positive verdier.

$$a_{1,i} = a_i$$

$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_i}{l} \right) - \left(\frac{a_i}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{16} \times l^2 + \frac{1}{4} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_i}{l} \right) - \left(\frac{a_i}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right)$$

$$l = 31,5 \text{ m} \quad p_{boggi} = 94,05 \text{ kN} \quad P = 282,55 \text{ kN} \quad q = 5,465 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 28,5 \text{ m} & a_2 &= 27 \text{ m} & a_3 &= 25,5 \text{ m} & a_4 &= 24 \text{ m} & a_5 &= 22,5 \text{ m} & a_6 &= 21 \text{ m} & a_7 &= \\
 19,5 \text{ m} & & a_8 &= 18 \text{ m} & a_9 &= 16,5 \text{ m} & a_{10} &= 15 \text{ m} & a_{11} &= 13,5 \text{ m} & a_{12} &= 12 \text{ m} & & \\
 & & a_{13} &= 10,5 \text{ m} & a_{14} &= 9 \text{ m} & a_{15} &= 7,5 \text{ m} & a_{16} &= 6 \text{ m} & a_{17} &= 4,5 \text{ m} & & \\
 & & a_{18} &= 3 \text{ m} & & & & & & & & & & &
 \end{aligned}$$

$$\sum \left(\left(\frac{a_i}{l} \right) - \left(\frac{a_i}{l} \right)^3 \right) = \left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_3}{l} \right) - \left(\frac{a_3}{l} \right)^3 + \dots \dots + \left(\frac{a_{18}}{l} \right) - \left(\frac{a_{18}}{l} \right)^3 = 5,102$$

$$M_b = \frac{5,465 \text{ kN/m}}{16} \times 31,5^2 \text{ m} + \frac{1}{4} \times 31,5 \text{ m} \times 94,05 \text{ kN} \times 5,102 + \frac{1}{4} \times 31,5 \text{ m} \times 282,55 \text{ kN} \times \left(\left(\frac{15,75 \text{ m}}{31,5 \text{ m}} \right) - \left(\frac{15,75 \text{ m}}{31,5 \text{ m}} \right)^3 \right) = 4952,1 \text{ kNm}$$

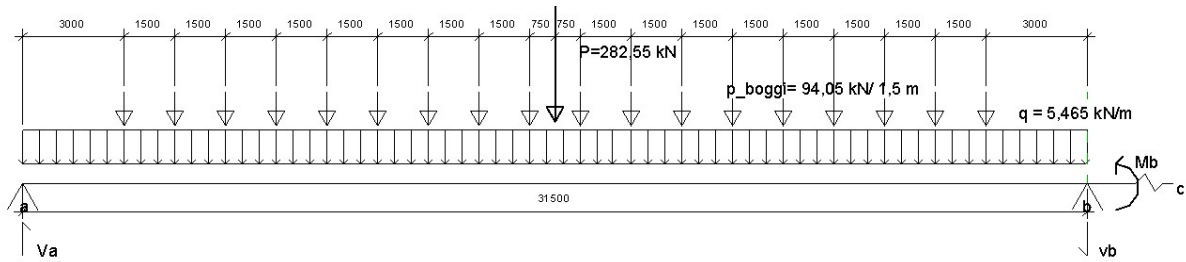
Tabell 10 viser et utklipp fra Excel, der beregningene er gjort likt som i eksemplet over.

l	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18	Antall	P enkelt	q	P boggi	Sum((ax/l)-(ax/l)^3)	Mstøtte	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	282,55	5,465	94,05	#DIV/0!	#DIV/0!
1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	282,55	5,465	94,05	0	40,502109
4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	282,55	5,465	94,05	0,666666667	196,65492
7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	282,55	5,465	94,05	1,2	429,49336
10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	282,55	5,465	94,05	1,714285714	739,01742
13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	282,55	5,465	94,05	2,222222222	1125,2271
16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	282,55	5,465	94,05	2,727272727	1588,1224
19,5	18	16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	12	282,55	5,465	94,05	3,230769231	2127,7034
22,5	21	19,5	18	16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	0	0	14	282,55	5,465	94,05	3,733333333	2743,9699
25,5	24	22,5	21	19,5	18	16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	0	0	16	282,55	5,465	94,05	4,235294118	3436,9221
28,5	27	25,5	24	22,5	21	19,5	18	16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	0	18	282,55	5,465	94,05	4,736842105	4206,5599
31,5	28,5	27	25,5	24	22,5	21	19,5	18	16,5	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	3	1,5	18	282,55	5,465	94,05	5,102040816	4952,1155

Tabell 10 Beregning av støttemoment

Denne metoden er brukt i alle beregningene vi har gjort ved 2 og 3 spenn. Vi har valgt å plukke ut denne beregningen som eksempel fordi den går igjennom både støttemoment og feltmoment. I beregningene vi har gjort med 3 spenn, er framgangsmåten nesten lik. Eneste forskjellen er at man må løse to ligninger for å finne støttemomentet ved opplegg B. Se i vedlegg A: «Beregningsgrunnlag for bjelkebro» for å se nærmere på hvordan dette er løst.

Steg 5: Vi beregner skjærkrefter i z-retning, og bruker disse til å finne feltmomentet. Figur 37 viser lastene er fordelt for å beregne skjærkraften.



Figur 37 Lastplassering for beregning av skjærkrefter

$$V_b = \frac{M_b + p \times \frac{l}{2} + p_b \times \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n) + \frac{q \times l^2}{2}}{l}$$

$$\text{Sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n) = (3 + 4,5 + 6 + 7,5 + 9 + 10,5 + 12 + 13,5 + 15 + 16,5 + 18 + 19,5 + 21 + 22,5 + 24 + 25,5 + 27 + 28,5) = 283,5 \text{ m}$$

$$V_b = \frac{4952,11 \text{ kNm} + 28,55 \text{ kN} \times \frac{31,5 \text{ m}}{2} + 94,05 \text{ kN} \times (283,5 \text{ m}) + \frac{5,465 \text{ kN/m} \times 31,5^2 \text{ m}}{2}}{31,5 \text{ m}} = 1231 \text{ kN}$$

$$V_a = q \times l + p + p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b =$$

$$n = 18$$

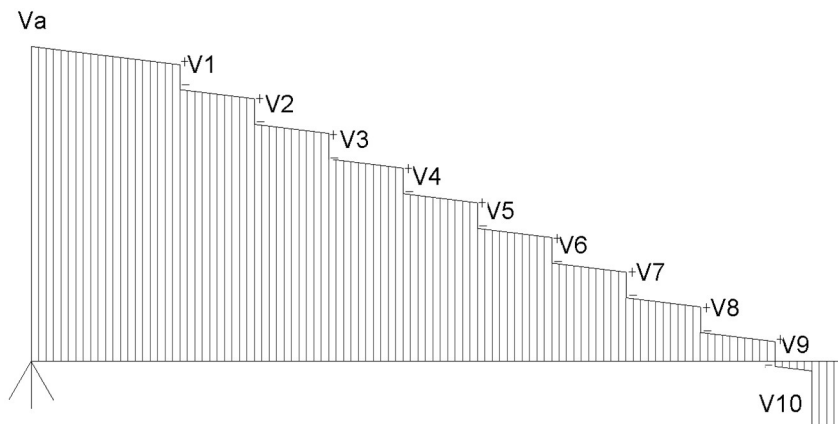
$$V_a = 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 31,5 \text{ m} + 282,55 \text{ kN} + 94,05 \text{ kN} \times 18 \text{ stk} - 1231 \text{ kN} = 916,6 \text{ kN}$$

Tabell 11 viser et utklipp fra Excel, der beregningene er gjort likt som over.

L	Mstøtte	L/2	Vb	Va
0	#DIV/0!	0	0	0
1,5	40,50211	0,75	172,3752	118,3723
4,5	196,6549	2,25	291,3223	203,9202
7,5	429,4934	3,75	407,1345	292,603
10,5	739,0174	5,25	522,4989	381,7336
13,5	1125,227	6,75	637,7139	471,0136
16,5	1588,122	8,25	752,8611	560,3614
19,5	2127,703	9,75	867,9717	649,7458
22,5	2743,97	11,25	983,0605	739,152
25,5	3436,922	12,75	1098,135	828,5725
28,5	4206,56	14,25	1213,2	918,0027
31,5	4952,116	15,75	1231,009	916,5887

Tabell 11 Støttemoment og skjærkrefter

Figur 38 viser hvordan skjærkraften virker på bjelken. Punktene V_z (utenom V_a) representerer to verdier; V_{z+} = Verdien i punktet før boggilast inntreffer. V_{z-} = Verdien i punktet etter boggilast inntreffer.



Figur 38 Skjærkraft

$$V_a = 916.6 \text{ kN}$$

$$V_{1+} = V_a - q \times l_{V_a \rightarrow V_1} = 916,6 \text{ kN} - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 3 \text{ m} = 900,2 \text{ kN}$$

$$V_{1-} = V_{1+} - p_b = 900,2 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 806,15 \text{ kN}$$

$$V_{2+} = V_{1-} - q \times l_{V_1 \rightarrow V_2} = 806,15 - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 797,95 \text{ kN}$$

$$V_{2-} = V_{2+} - p_b = 797,95 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 703,9 \text{ kN}$$

$$V_{3+} = V_{2-} - q \times l_{V_2 \rightarrow V_3} = 703,9 - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 695,7 \text{ kN}$$

$$V_{3-} = V_{3+} - p_b = 695,7 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 601,65 \text{ kN}$$

$$V_{4+} = V_{3-} - q \times l_{V_3 \rightarrow V_4} = 601,65 - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 593,455 \text{ kN}$$

$$V_{4-} = V_{4+} - p_b = 593,455 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 499,405 \text{ kN}$$

$$V_{5+} = V_{4-} - q \times l_{V_4 \rightarrow V_5} = 499,405 - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 491,21 \text{ kN}$$

$$V_{5-} = V_{5+} - p_b = 491,21 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 397,16 \text{ kN}$$

$$V_{6+} = V_{5-} - q \times l_{V_5 \rightarrow V_6} = 397,16 \text{ kN} - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 388,96 \text{ kN}$$

$$V_{6-} = V_{6+} - p_b = 388,96 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 294,91 \text{ kN}$$

$$V_{7+} = V_{6-} - q \times l_{V_6 \rightarrow V_7} = 294,91 \text{ kN} - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 286,71 \text{ kN}$$

$$V_{7-} = V_{7+} - p_b = 286,71 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 192,66 \text{ kN}$$

$$V_{8+} = V_{7-} - q \times l_{V_7 \rightarrow V_8} = 192,66 \text{ kN} - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 184,465 \text{ kN}$$

$$V_{8-} = V_{8+} - p_b = 184,465 \text{ kN} - 94,05 \text{ kN} = 90,415 \text{ kN}$$

$$V_{9+} = V_{8-} - q \times l_{V_8 \rightarrow V_9} = 90,415 \text{ kN} - 5,465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,5 \text{ m} = 82,218 \text{ kN}$$

$$V_{9-} = V_{9+} - p_B = 82,218 \text{ kN} - 94,05 \text{ kNm} = -11,832 \text{ kN}$$

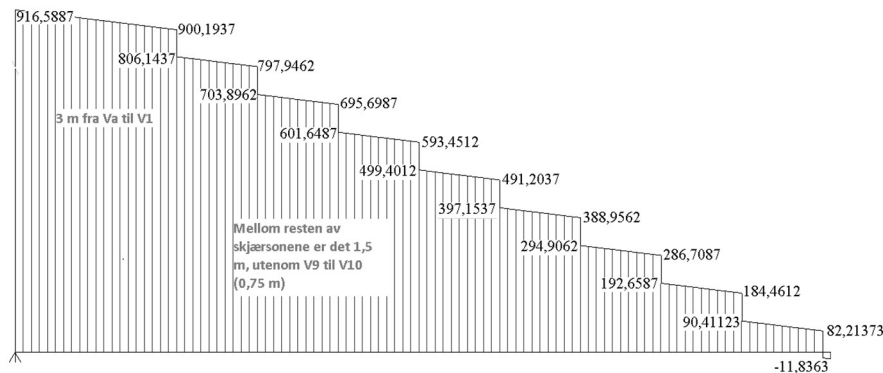
Regner V til punktet på bjelken der V=0

Tabell 12 viser et utklipp fra beregninger i Excel, gjort likt som i eksempelet over.

L	avstand til	avstand mellom	avstand til p	V1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6	V6	V7	V7	V8	V8	V9	V9
	V1 (m)	Vsoner (m)	i senter	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
0	1,5	1,5	0	0	0																
1,5	0,75	1,5	0,75	114,3	-168	under: 0,75 m fra V1 til L/2															
4,5	1,5	1,5	2,25	195,7	101,7	97,57	-185	under: 0,75 m fra V2 til L/2													
7,5	1,5	1,5	3,75	284,4	190,4	182,2	88,11	84,01	-199	under: 0,75 m fra V3 til L/2											
10,5	1,5	1,5	5,25	373,5	279,5	271,3	177,2	169	74,99	70,89	-212	under: 0,75 m fra V4 til L/2									
13,5	1,5	1,5	6,75	462,8	368,8	360,6	266,5	258,3	164,3	156,1	62,02	57,92	-225	under: 0,75 m fra V5 til L/2							
16,5	1,5	1,5	8,25	552,2	458,1	449,9	355,9	347,7	253,6	245,4	151,4	143,2	49,12	45,03	-238	under: 0,75 m fra V6 til L/2					
19,5	1,5	1,5	9,75	641,5	547,5	539,3	445,3	437,1	343	334,8	240,8	232,6	138,5	130,3	36,26	32,16	-250	under: 0,75 m fra V7 til L/2			
22,5	1,5	1,5	11,25	731	636,9	628,7	534,7	526,5	432,4	424,2	330,2	322	227,9	219,7	125,7	117,5	23,42	15,22	-267		
25,5	1,5	1,5	12,75	820,4	726,3	718,1	624,1	615,9	521,8	513,6	419,6	411,4	317,3	309,1	215,1	206,9	112,8	104,6	10,59	2,395	-91,7
28,5	1,5	1,5	14,25	909,8	815,8	807,6	713,5	705,3	611,3	603,1	509	500,8	406,8	398,6	304,5	296,3	202,3	194,1	100	91,83	-2,22
31,5	3	1,5	15,75	900,2	806,1	797,9	703,9	695,7	601,6	593,5	499,4	491,2	397,2	389	294,9	286,7	192,7	184,5	90,41	82,21	-11,8

Tabell 12 Skjærkrefter på bjelke

Bruker skjærkreftene til å beregne feltmomentet. Skjærkrefter vist i figur 39.



Figur 39 Skjærkrefter – Verdier i kN

$$M_{\text{felt}} = \frac{V_a + V_{1+}}{2} \times l_{V_a - V_1} + \sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{V(x) - V(x-1)}$$

$$M_{\text{felt}} = \frac{916,59 \text{ kN} + 806,14 \text{ kN}}{2} \times 3 \text{ m} + \frac{806,14 \text{ kN} + 797,95 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{797,95 \text{ kN} + 703,9 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{703,9 \text{ kN} + 695,7 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{695,7 \text{ kN} + 601,65 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{601,65 \text{ kN} + 593,45 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{593,45 \text{ kN} + 499,4 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{499,4 \text{ kN} + 491,2 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{491,2 \text{ kN} + 397,15 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{397,15 \text{ kN} + 388,96 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{388,96 \text{ kN} + 294,91 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{294,91 \text{ kN} + 286,71 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{286,71 \text{ kN} + 192,66 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{192,66 \text{ kN} + 184,46 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{184,46 \text{ kN} + 90,41 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} + \frac{90,41 \text{ kN} + 82,21 \text{ kN}}{2} \times 1,5 \text{ m} = 8055,32 \text{ kNm}$$

Tabell 13 viser resultatet av beregninger fra excel ved spennlengde fra 0 – 31,5 m, ved to spenn.

L	M felt
0	0
1,5	87,24223
4,5	374,4496
7,5	776,6854
10,5	1293,95
13,5	1926,242
16,5	2673,563
19,5	3535,913
22,5	4675,51
25,5	5599,29
28,5	6816,338
31,5	8055,319

Tabell 13 Resultat - Beregning av feltmoment

3.4 Lastplassering for å beregne momenter

Lasttilfellene i lengderetning er like for beregning av bjelkebro og platebro, lastverdiene er derimot forskjellige, slikt det er vist i forrige kapittel.

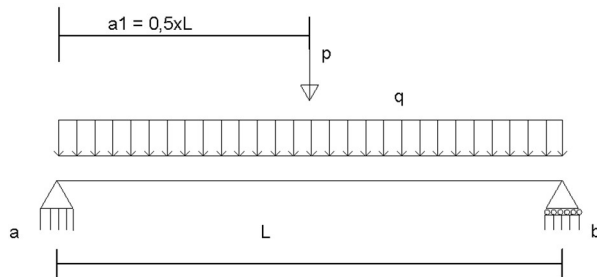
3.4.1 Case 1 – Ett spenn – Feltmoment

3.4.1.1 Sammenligner feltmoment mellom LM1 og LM3.

For ett spenn skal vi se på ett lasttilfelle for LM1 og to lasttilfeller for LM3 som tidligere beskrevet.

Lastplassering i lengderetning for LM1.

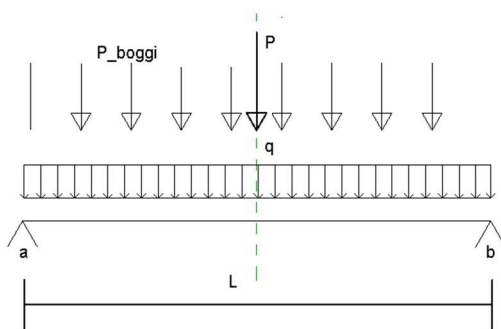
Her blir punktlasten plassert midt i spennet og en jevnt fordelt last dekker hele spennet som vist i figur 40. Beregning er vist i vedlegg A og B.



Figur 40 Lastplassering LM1 - 1 spenn

Lastplassering i lengderetning for LM3, åpent for annen trafikk.

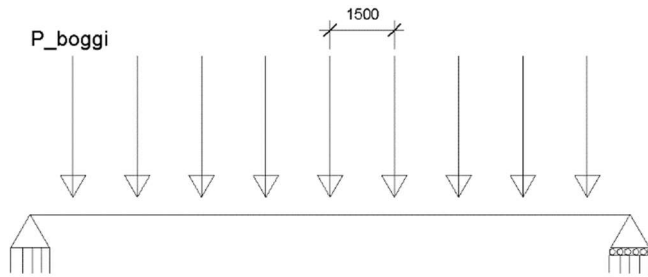
Punktlast og boggilast plasseres midt i spenn, og en jevnt fordelt last dekker hele spennet, som vist i figur 41. Beregning vist i vedlegg A og B.



Figur 41 Lastplassering LM3, åpent for annen trafikk - Ett spenn

Lastplassering i lengderetning LM3, stengt for annen trafikk.

Boggilast plasseres midt i spenn, som vist i figur 42.



Figur 42 Lastplassering LM3, steng for annen trafikk - Ett spenn

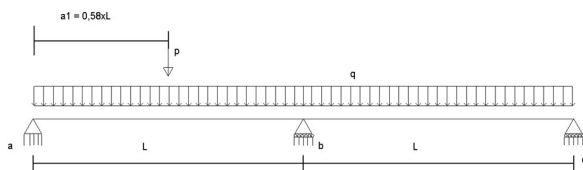
3.4.2 Case 2 – To like spenn – Feltmoment og støttemoment

3.4.2.1 Sammenligner støttemoment mellom LM1 og LM3 ved to like spenn.

For to spenn skal vi se på ett lasttilfelle for LM1 og fire lasttilfeller for LM3 som tidligere beskrevet.

Lastplassering i lengderetning LM1

Punktlast plasseres $0,58 * l$ fra opplegg A. En jevnt fordelt last dekker spenn AB og BC som vist i figur 43.

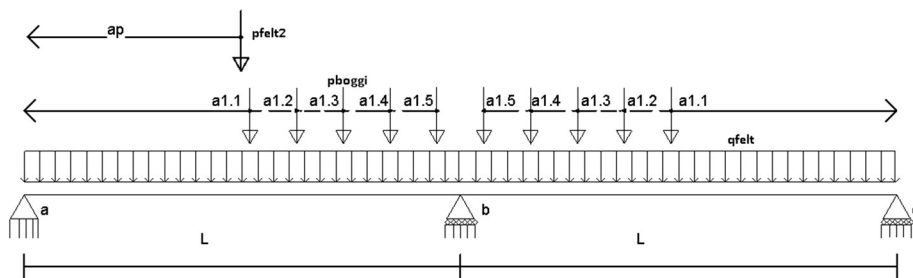


Figur 43 Lastplassering for LM1 - To spenn

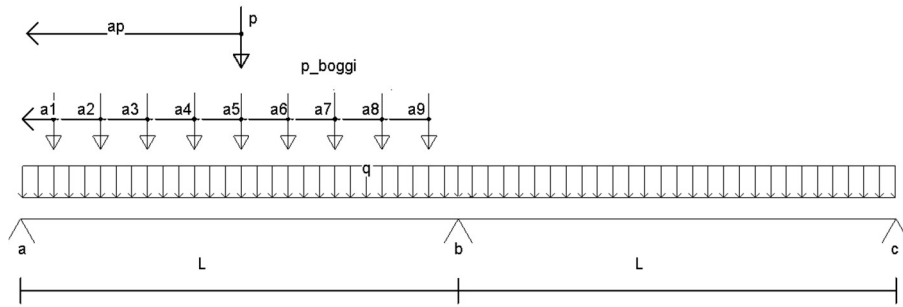
Lastplassering i lengderetning LM3, åpent for annen trafikk

Her skal vi se på to forskjellige tilfeller, vist i figur 44 og 45.

- ◆ Tilfelle 1: Boggilast plasseres midt over opplegg B, jevnt fordelt last dekker spenn AB og BC.
- ◆ Tilfelle 2: Boggilast plasseres midt i spenn AB, jevnt fordelt last dekker spenn AB og BC.



Figur 44 Lastplassering – To spenn

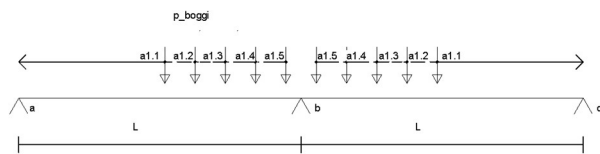


Figur 45 Lastplassering – To spenn

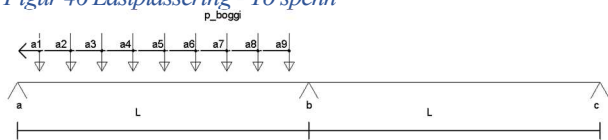
Lastplassering i lengderetning LM3, stengt for annen trafikk

Her skal vi se på to ulike tilfeller, som vist i figur 46 og 47:

- ◆ Tilfelle 1: Boggilast plasseres midt over opplegg B.
- ◆ Tilfelle 2: Boggilast plasseres midt i spenn AB



Figur 46 Lastplassering - To spenn



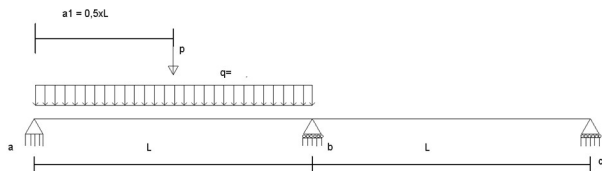
Figur 47 Lastplassering - To spenn

3.4.2.2 Sammenligner feltmoment mellom LM1 og LM3 ved 2 like spenn

Her skal vi se på ett lasttilfelle for LM1 og to lasttilfeller for LM3.

Lastplassering i lengderetning LM1

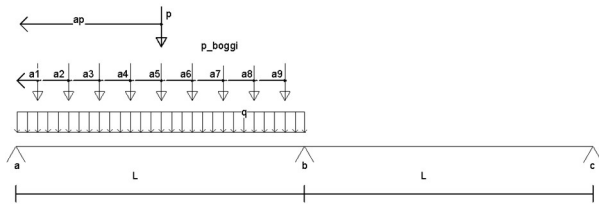
Punktlast plasseres i midt i spenn AB, og en jevnt fordelt last dekker spenn AB, vist i figur 48.



Figur 48 Lastplassering LM1 - To spenn

Lastplassering i lengderetning LM3 ved felt nummer 2 åpent for annen trafikk

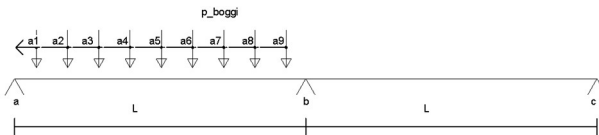
Punktlast og boggilast plasseres midt i spenn AB. UDL last dekker spenn AB, som vist i figur 49.



Figur 49 Lastplassering LM3, åpent for annen trafikk - To spenn

Lastplassering i lengderetning LM3, ved bro stengt for annen trafikk

Boggilast plasseres midt i spenn AB, som vist i figur 50.



Figur 50 Lastplassering LM3, stengt for annen trafikk - To spenn

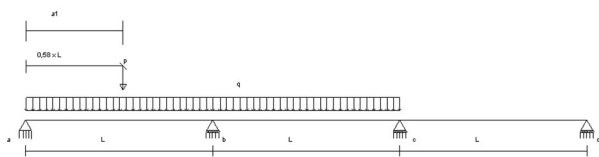
3.4.3 Case 3 - 3 like spenn - Feltnmoment og støttemoment

3.4.3.1 Sammenligner støttemoment mellom LM1 og LM3 ved 3 like spenn.

Her skal vi se på ett lasttilfelle for LM1 og fire lasttilfeller for LM3 som tidligere beskrevet.

Lastplassering i lengderetning LM1

Punktlast plasseres $0,58x L$ fra opplegg B. En jevnt fordelt last dekker spenn AB og BC. Dette er vist i figur 51.

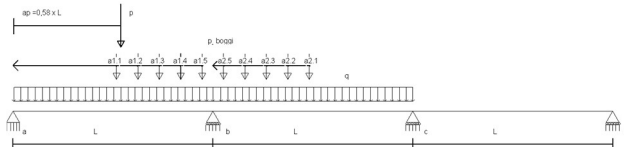


Figur 51 Lastplassering LM1 – Tre spenn

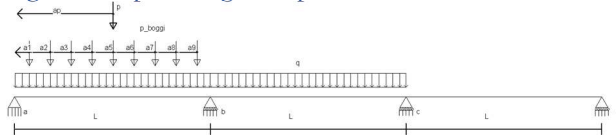
Lastplassering i lengderetning LM3, åpent for annen trafikk

Her skal vi se på to forskjellige tilfeller, vist i figur 52 og 53.

- ◆ Tilfelle 1: Punktlast plasseres $0,58 \times L$ fra opplegg B. Boggilast plasseres midt over opplegg B. Jevnt fordelt last dekker spenn AB og BC.
- ◆ Tilfelle 2: Boggilast plasseres midt i spenn AB. Punktlast og jevnt fordelt last er lik som i tilfelle 1.



Figur 52 Lastplassering - Tre spenn

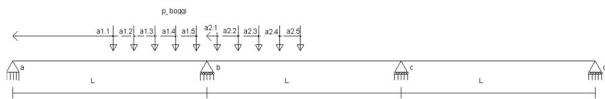


Figur 53 Lastplassering - Tre spenn

Lastplassering i lengderetning LM3, stengt for annen trafikk.

Her skal vi se på to forskjellige tilfeller, som vist i figur 54 og 55.

- ◆ Tilfelle 1: Boggilast plasseres midt over opplegg B.
- ◆ Tilfelle 2: Boggilast plasseres midt i spenn AB.



Figur 54 Lastplassering - Tre spenn



Figur 55 Lastplassering - Tre spenn

3.4.3.2 Sammenligner feltmoment mellom LM1 og LM3 ved 3 like spenn.

Her skal vi se på ett lasttilfelle for LM1 og to lasttilfeller for LM3.

Lastplassering i lengderetning LM1

Punktlast plasseres midt i spenn AB. Jevnt fordelt last dekker spenn AB og CD, som vist i figur 56.



Figur 56 Lastplassering LM1 - Tre spenn

Lastplassering i lengderetning LM3, åpent for annen trafikk.

Punkt last og boggilast plasseres midt i spenn AB. Jevnt fordelt last dekker spenn AB og CD.

Dette er vist i figur 57.



Figur 57 Lastplassering LM3, åpent for annen trafikk – Tre spenn

Lastplassering i lengderetning LM3, stengt for annen trafikk.

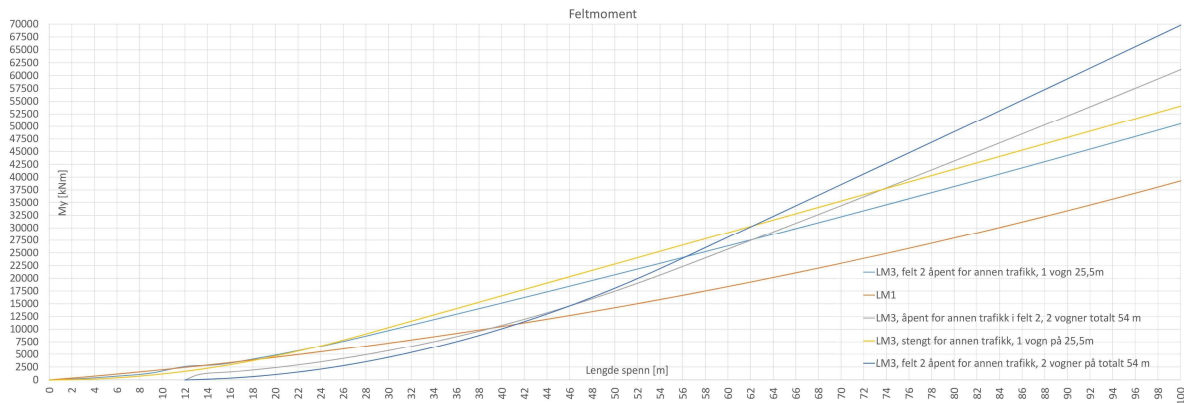
Boggilast plasseres midt i spenn AB, som vist i figur 58.



Figur 58 Lastplassering LM3, stengt for annen trafikk - Tre spenn

3.5 Resultat - Bjelkebro

3.5.1 Case 1: 1 spenn - Feltmoment



Figur 59 Feltmoment for bjelkebro på ett spenn

3.5.1.1 Sammenligning av LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 59 viser at ved opptil 11 meter spenn er det LM1 som gir det største momentet. Fra 11 m spenn opp til 67 m spenn, er det LM3₁ vogn som gir det største momentet. Videre fra 67 m spenn og opp til 100 m spenn er det LM3₂ vogner som gir størst moment.

3.5.1.2 Sammenligning av LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

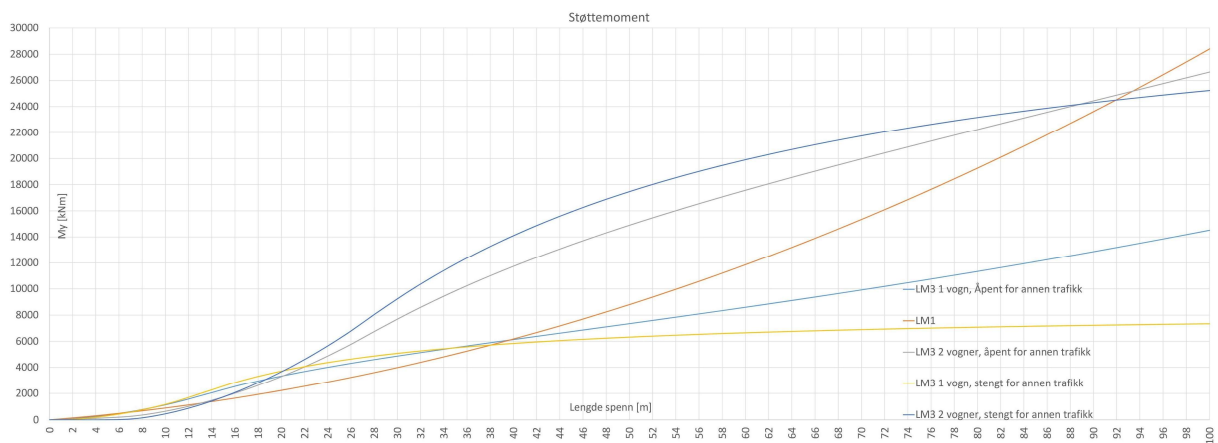
Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Videre i figur 59 viser denne at LM1 gir det største momentet fra 0 til 18 m spenn. Fra 18 m til 62 m spenn er det LM3₁ vogn som gir størst moment. Fra 62 m til 100 m spenn er det LM3₂ vogner som gir det største momentet.

3.5.1.2.1 Drøfting av resultat

Ved korte spenn er det viser resultatene at det er LM1 som er dimensjonerende, mens ved lengre spenn er det LM3 som er dimensjonerende. Dette er fordi LM1 lasten har en stor punktlast som kun virker i et punkt på broen i lengderetning. Denne er vesentlig større enn verdien av hver boggilast, som innvirker ved tilfellet for LM3. Boggilastene som virker ved LM3, øker i antall etter hvert som lengden på spennet øker.

3.5.2 Case 2: 2 spenn – Feltmoment og støttemoment



Figur 60 Støttemoment LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - To spenn

3.5.2.1 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk (Tilfelle 1)

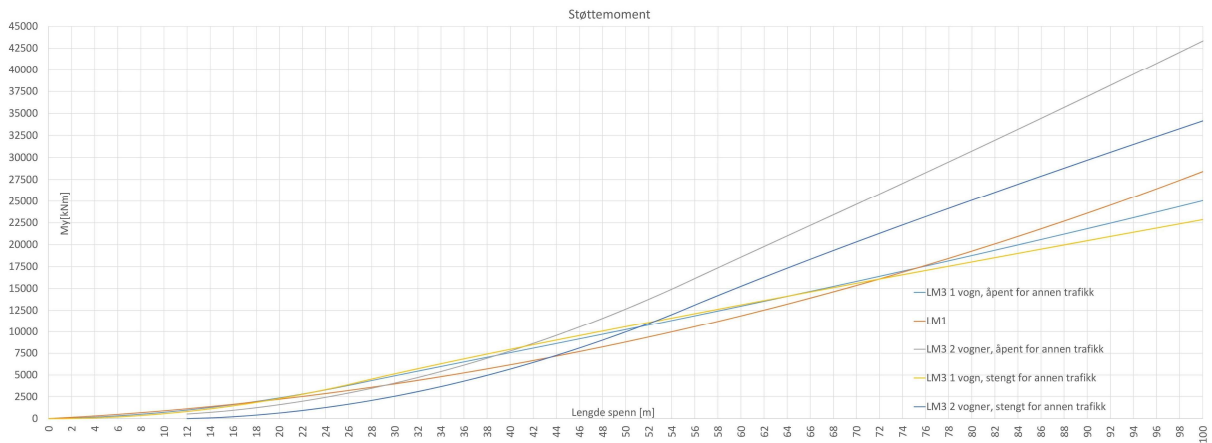
Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 60 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 6 m spenn. Fra 6 m til 20 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 93 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 93 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.

3.5.2.2 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk (Tilfelle 1)

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 60 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 6 m spenn. Fra 6 m til 20 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 92 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 92 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.



Figur 61 Støttemoment LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - To spenn

3.5.2.3 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

(Tilfelle 2)

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 61 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 17 m spenn. Fra 17 m til 39 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 39 til 93 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 93 m til 100 m gir LM1 det største støttemomentet.

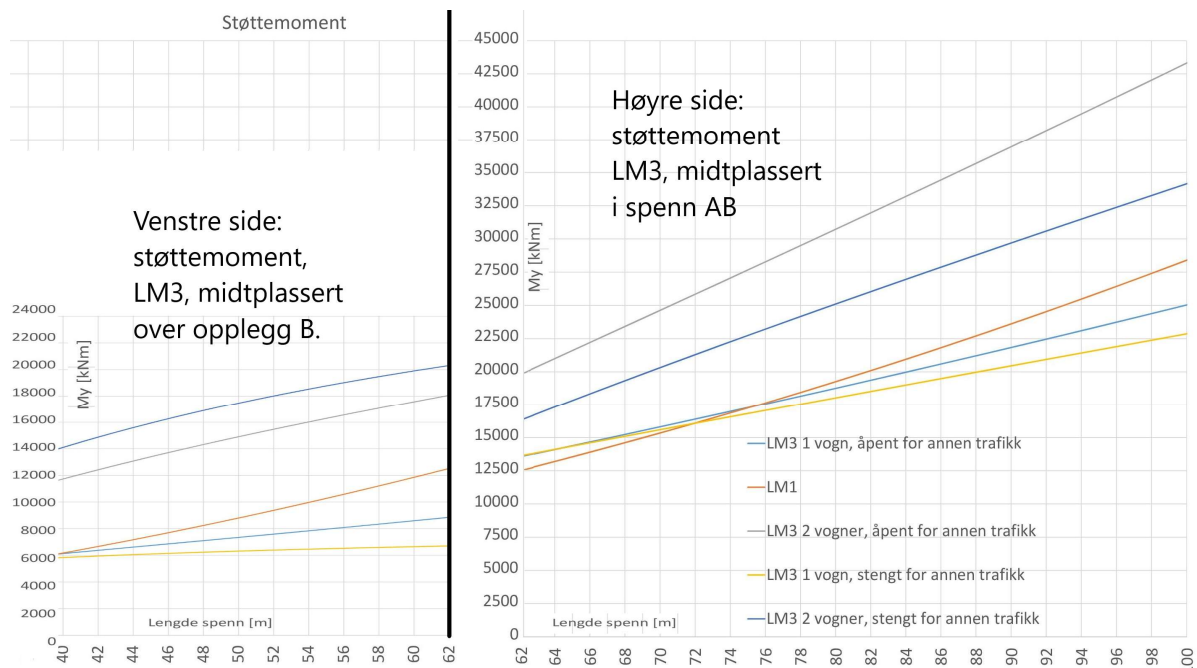
3.5.2.4 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

(Tilfelle 2)

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 61 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 17 m spenn. Fra 17 m til 20 m gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 100m gir LM3₂ vogner det største støttemomentet.

3.5.2.5 Drøfting av resultat for støttemoment:



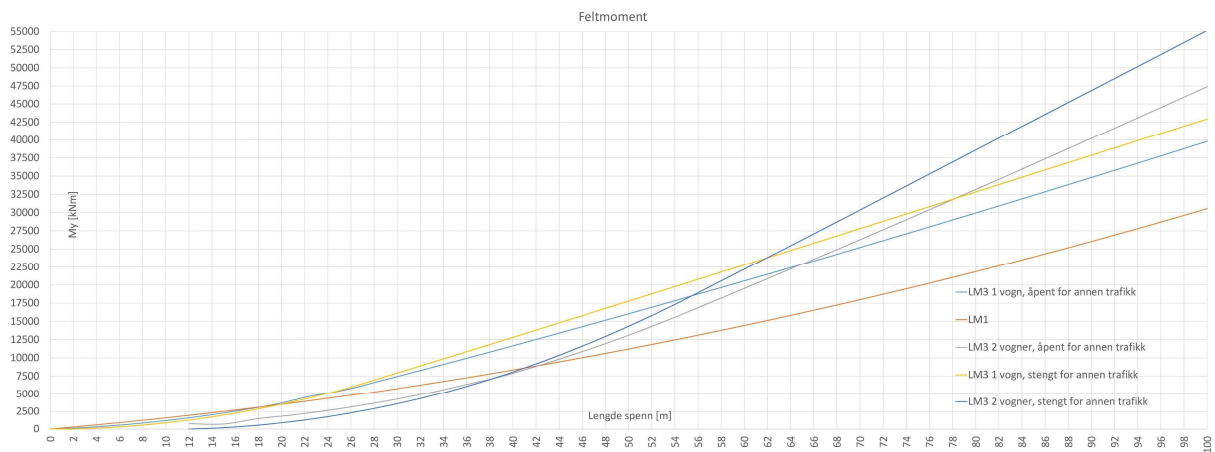
Figur 62 Grenseområder for støttement - Tilfelle 1 og 2

Ved rundt 62 meter spenn går det fra at støttemomentet for LM3 er størst når LM3 er midtplassert over opplegg B. Deretter er støttemomentet størst når LM3 er midtplassert i spenn AB.

Figur 62 viser at LM1 er dimensjonerende fra 0 m til 6 m spenn, mens LM3 er dimensjonerende fra 6 m til 100 m, når man skal dimensjonere for støttemoment.

Resultatene viser at det ved kortere spenn lønner det seg å plassere LM3 lasten midt over opplegg B. Dette gjelder spesielt i tilfellene med LM3₂ vogner, da disse fordeler seg på hver side av opplegget som da er den mest ugunstige lastplasseringen og vil gi det største støttemomentet. Ved lengre spenn lønner det seg å plassere LM3_{Boggi} (1 og 2 vogner) midt i ene spennet da også dette er den mest ugunstige lastplasseringen og vil gi størst støttemoment.

Feltmoment



Figur 63 Feltmoment for LM1 og LM3 - 2 spenn

3.5.2.6 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 63 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 17 m spenn. Fra 17 m til 65 m spenn gir LM3₁ vogn det største feltmomentet. Fra 65 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største feltmomentet.

3.5.2.7 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

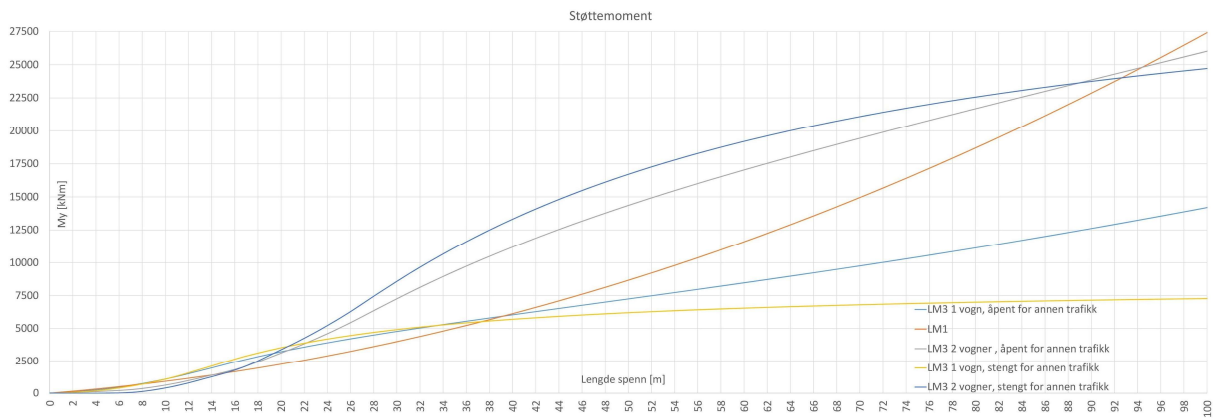
Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 63 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 19 m spenn. Fra 19 m til 61 m gir LM3₁ vogn det største feltmomentet. Fra 61 til 100m gir LM3₂ vogner det største feltmomentet.

3.5.2.8 Drøfting av resultat for feltmoment

Resultatene viser at LM1 er dimensjonerende ved korte spennlengder, opptil maksimalt 19 meter. Deretter er det lastene fra LM3_{stengt} for annen trafikk som blir dimensjonerende.

3.5.3 Case 3: 3 spenn – Feltmoment og støttemoment



Figur 64 Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - 3 spenn

3.5.3.1 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk (Tilfelle 1)

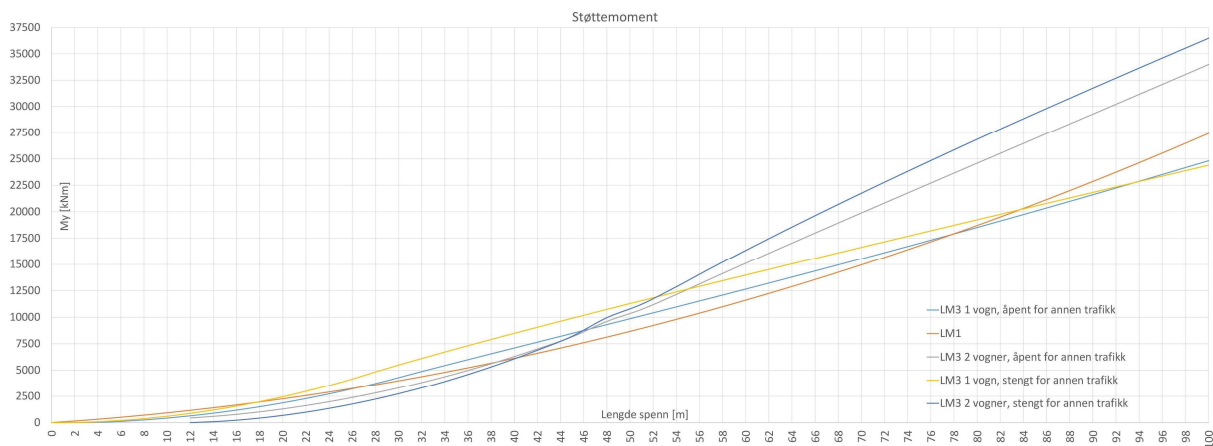
Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

Figur 64 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 7 m spenn. Fra 7 m til 21 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 21 til 94 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 94 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.

3.5.3.2 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk (Tilfelle 1)

Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

Figur 64 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 8 m spenn. Fra 8 m til 21 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 93m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 93 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.



Figur 65 Støttemoment LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - 3 spenn

3.5.3.3 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk (Tilfelle 2)

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

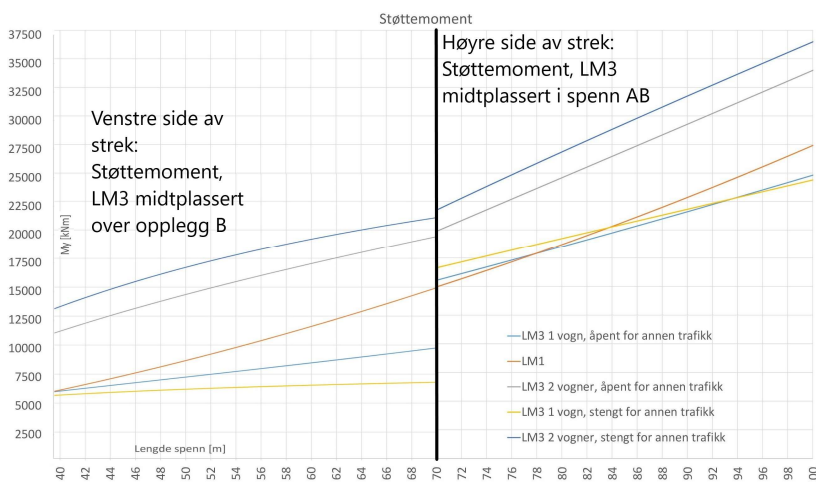
Figur 65 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 26 m spenn. Fra 26 m til 47 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 47 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet.

3.5.3.4 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk (Tilfelle 2)

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 65 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 17 m spenn. Fra 17 m til 52 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 52 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet.

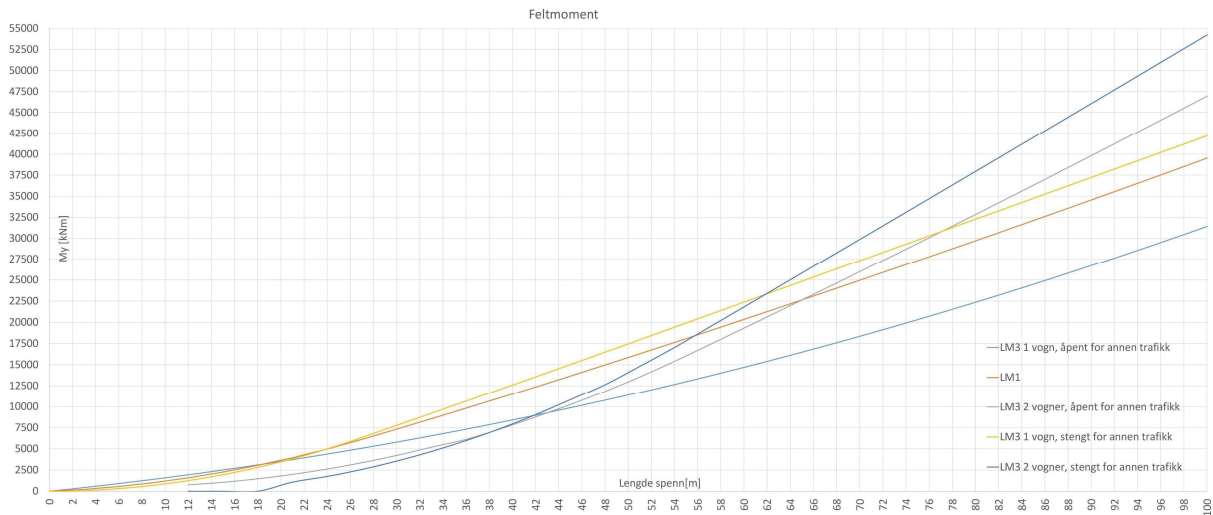
3.5.3.5 Drøfting av resultat for støttemoment



Figur 66 Grenseområde for støttemoment - Tilfelle 1 og 2

Ved rundt 70 m spenn, går det fra at støttemomentet for LM3 er størst når LM3 er midtplassert over opplegg B, til at støttemomentet er størst når det er midtplassert i spenn AB. Figur 66 viser at LM1 er dimensjonerende fra 0 m til 7 m spenn, mens LM3 er dimensjonerende fra 7 m til 100 m.

Feltmoment:



Figur 67 Feltmoment for LM1 og LM3 - 3 spenn

3.5.3.6 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 67 viser at LM3₁ vogn gir størst feltmoment fra 0 til 19 m spenn. Fra 19 m til 65 m spenn gir LM1 det største feltmomentet. Fra 65 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største feltmomentet.

3.5.3.7 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

Gjeldende kurver: LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 67 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 24 m spenn. Fra 24 m til 62 m spenn gir LM3₁ vogn det største feltmomentet. Fra 62 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største feltmomentet.

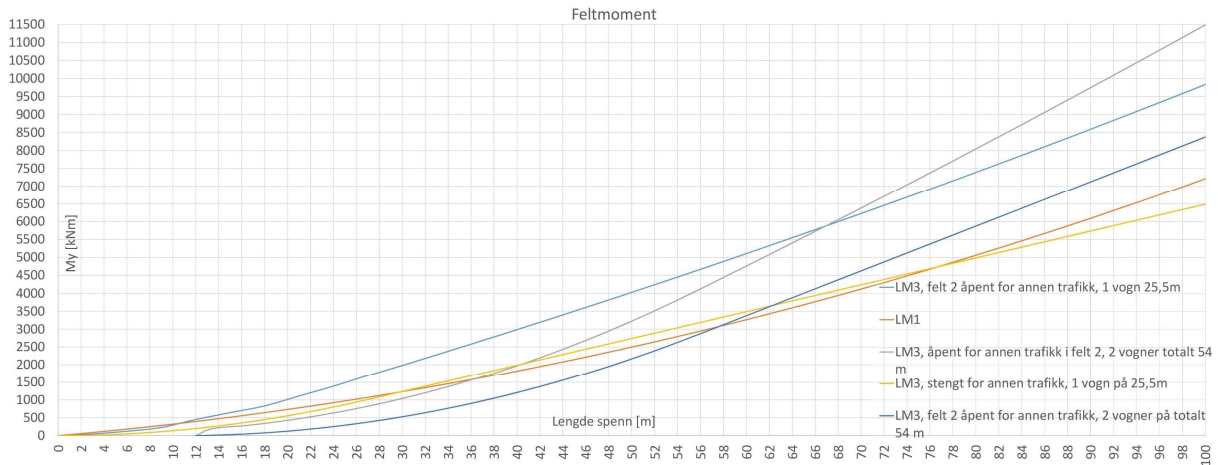
3.5.3.8 Drøfting av resultat for feltmoment

Resultatene viser at ved korte spennlengder vil LM3₁ vogn, åpent for annen trafikk være dimensjonerende. Opptil 62 m vil LM3₁ vogn, stengt for annen trafikk bli dimensjonerende, mens til slutt vil LM3₂ vogner være størst.

3.6 Resultat – Platebro

Vi velger her å ta med Case 1: 1 spenn, og resten vil legges inn som vedlegg. Vedleggene vil da inneholde beregninger av feltmoment og støttemoment ved to og tre spenn, med ulike spennlengder.

3.6.1 Case 1: 1 spenn - Feltmoment



Figur 68 Feltmoment - Ett spenn

3.6.1.1 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 68 viser at ved opptil 10 m spenn er det LM1 som gir det største momentet. Fra 10 m spenn opp til 67 m spenn er det LM3₁ vogn som gir størst moment. Videre fra 67 m spenn og opp til 100 m spenn er det LM3₂ vogner som gir størst moment.

3.6.1.2 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

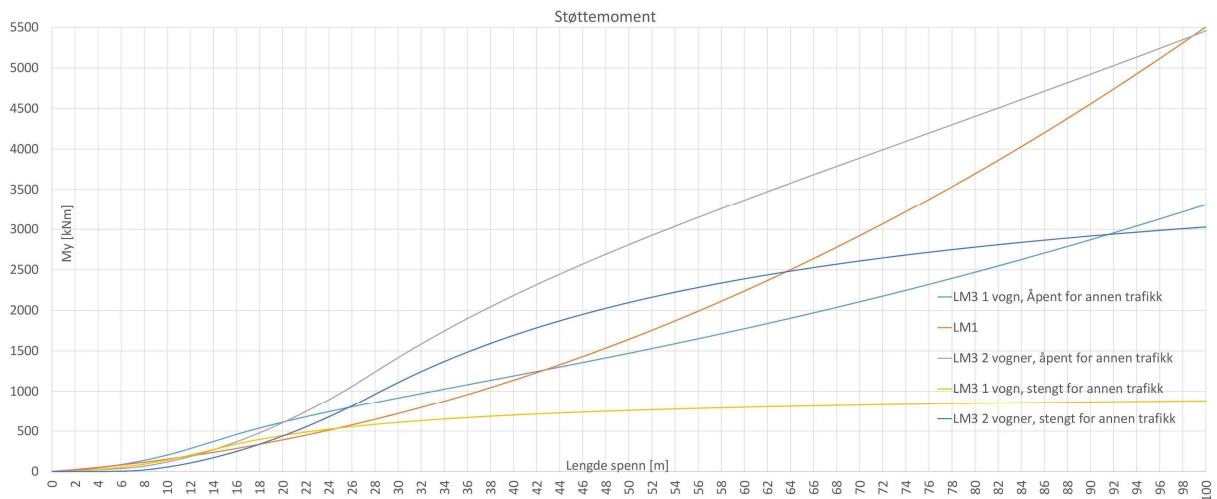
LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 68 viser at LM1 gir det største momentet fra 0 til 30 m spenn. Fra 30 m til 62 m spenn er det LM3₁ vogn som gir størst moment. Fra 62 m til 100 m spenn er det LM3₂ vogner.

3.6.1.3 Drøfting av resultat for feltmoment

Ved korte spenn er det LM1 som gir det største momentet, mens ved lengre spenn er det LM3 som gir størst moment. Dette av samme årsak som beskrevet i punkt 3.5.1.2.1.

3.6.2 Case 2: 2 spenn – Feltmoment og støttemoment



Figur 69 Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - 2 spenn

3.6.2.1 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk (Tilfelle 1)

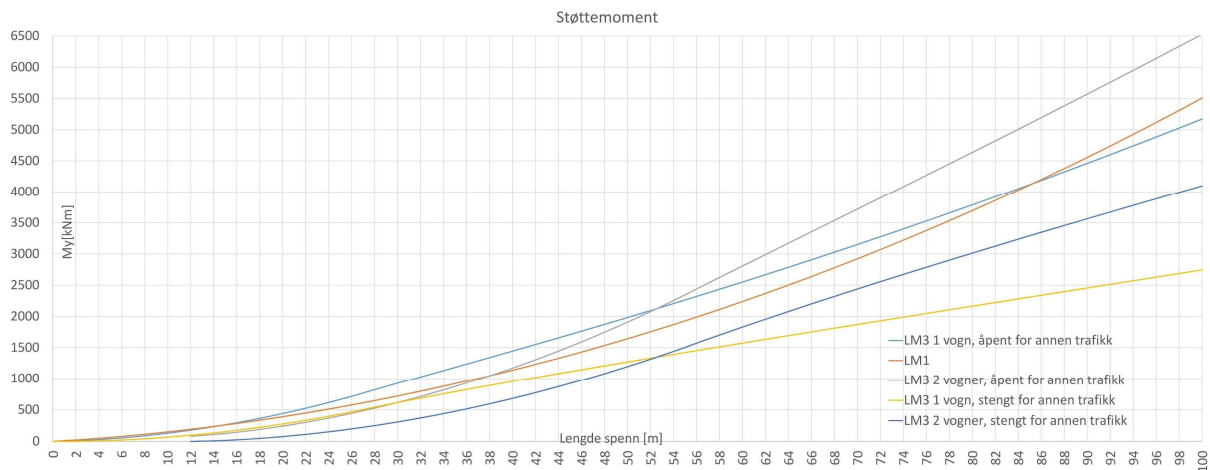
Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

Figur 69 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 6 m spenn. Fra 6 m til 20 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 98 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 98 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.

3.6.2.2 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk (Tilfelle 1)

Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

Figur 69 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 11 m spenn. Fra 11 m til 20 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 64 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 64 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.



Figur 70 Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - 2 spenn

3.6.2.3 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk (Tilfelle 2)

Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

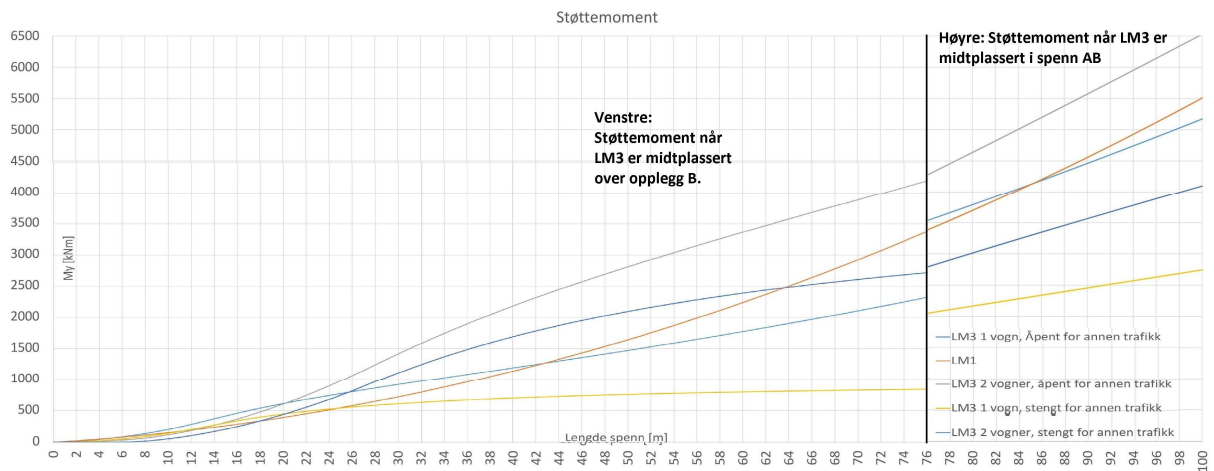
Figur 70 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 14 m spenn. Fra 14 m til 52 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 52 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet.

3.6.2.4 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk (Tilfelle 2)

Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

Figur 70 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 100 m spenn.

3.6.2.5 Drøfting av resultat for støttemoment

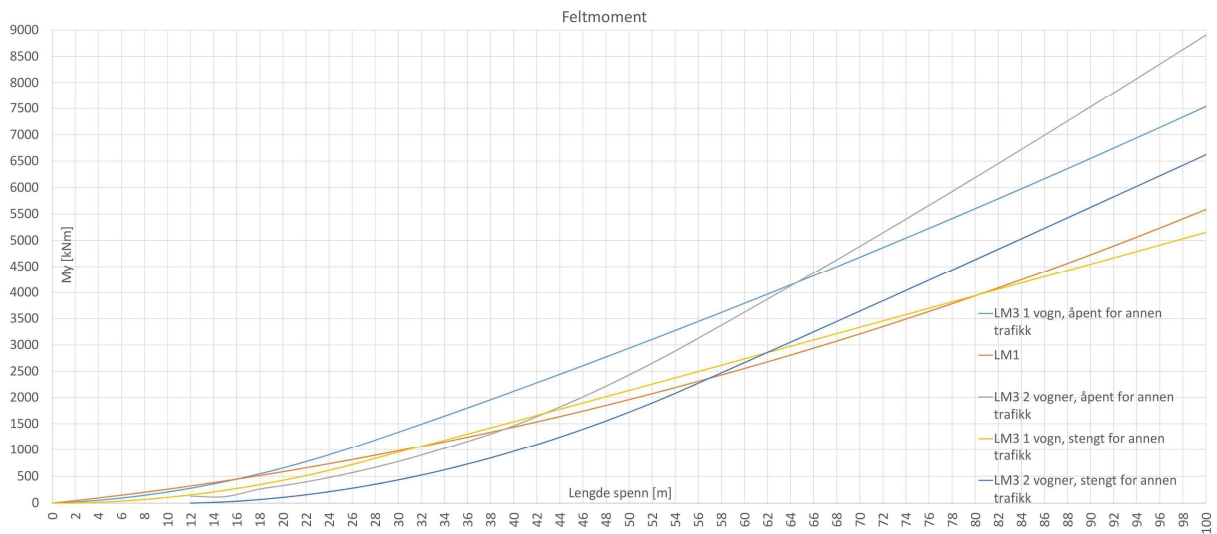


Figur 71 Grenseområde for støttemoment - Tilfelle 1 og 2

Figur 71 viser at ved 76 m spenn er forandrer det seg fra at LM3 midtplassert over opplegg B gir størst støttemoment, til at LM3 midtplassert i spenn AB gir største momentet ved beregning.

Det lønner seg å stenge broen for annen trafikk og midtplassere LM3 last i bredderetning. Da blir LM1 lasten dimensjonerende uansett spennlengde (0 til 100 m). I virkeligheten inntreer laster tilsvarende LM3 sjelden og det lønner seg å stenge broen. Hvis ikke ender man opp med å overdimensjonere broen ift. vanlig bruk.

Feltmoment



Figur 72 Feltmoment for LM1 og LM3 - 2 spenn

3.6.2.6 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 72 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 16 m. Fra 16 m til 64 m gir LM3₁vogn størst feltmoment. Etter 64 m gir LM3₂vogner størst feltmoment.

3.6.2.7 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

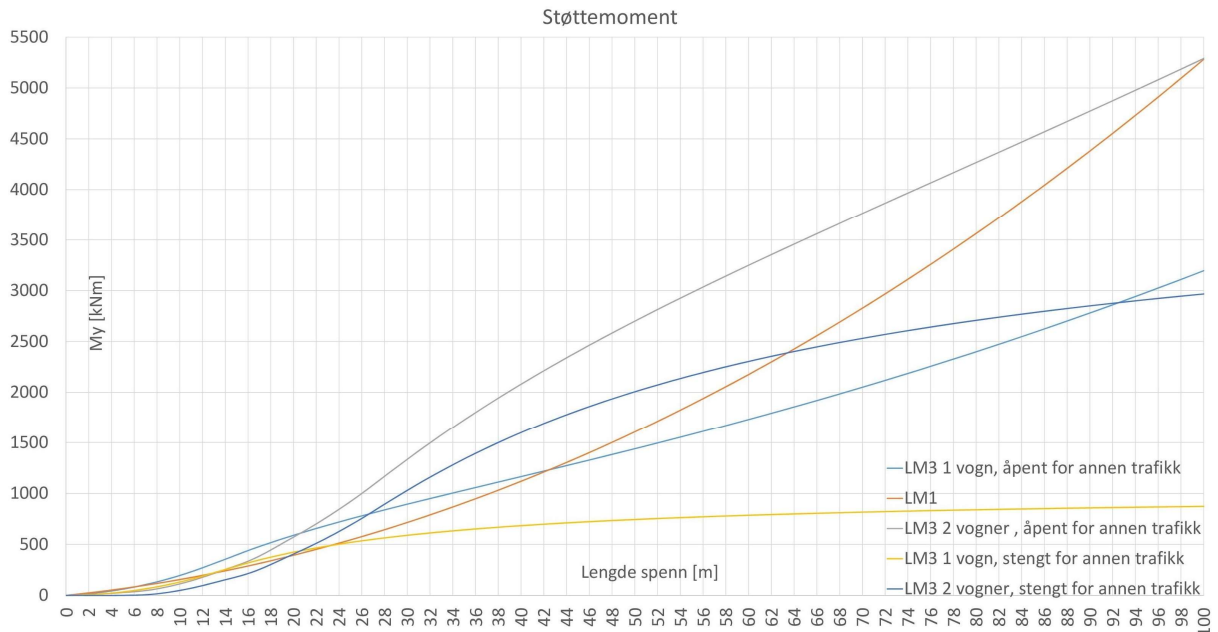
Figur 72 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 31 m. Fra 31 m til 62 m gir LM3₁vogn størst feltmoment. Fra 62 m gir LM3₂vogner størst feltmoment.

3.6.2.8 Drøfting resultat for feltmoment

Resultatene viser at LM1 gir størst feltmoment på ved korte spennlengder, mens LM3 gir det største feltmomentet ved større spennlengder. LM3, stengt for annen trafikk gir mindre moment enn LM3, åpent for annen trafikk.

3.6.3 Case 3: 3 spenn – Feltmoment og støttemoment

Støttemomenter



Figur 73 Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert over opplegg B - 3 spenn

3.6.3.1 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

(Tilfelle 1)

Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

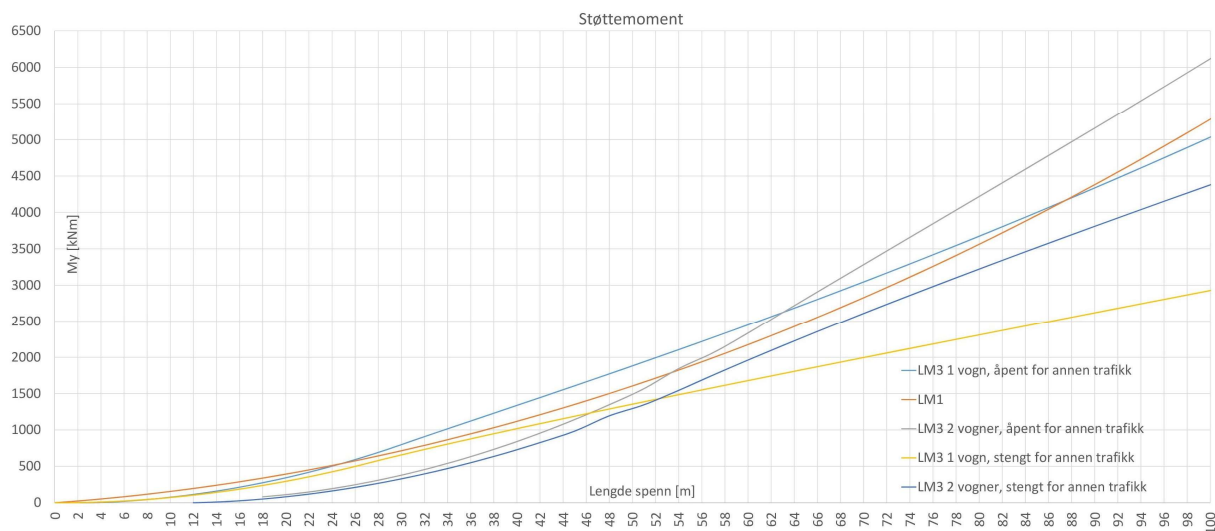
Figur 73 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 7 m spenn. Fra 7 m til 20 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 98 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 98 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.

3.6.3.2 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

(Tilfelle 1)

Gjeldende kurver: LM1: █ LM3₁ vogn: █ LM3₂ vogner: █

Resultat i diagram viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 11 m spenn. Fra 11 m til 20 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 20 til 64 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet. Fra 64 m til 100 m spenn gir LM1 det største støttemomentet.



Figur 74 Støttemoment for LM1 og LM3, midtplassert i spenn AB - 3 spenn

3.6.3.3 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk (Tilfelle 2)

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

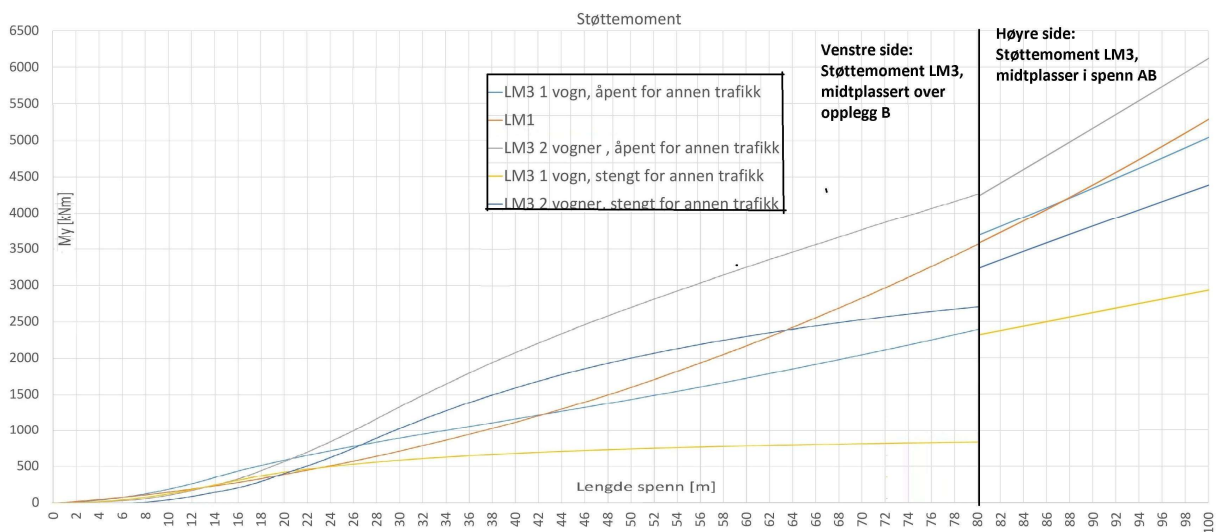
Figur 74 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 23 m spenn. Fra 23 m til 63 m spenn gir LM3₁ vogn det største støttemomentet. Fra 63 til 100 m spenn gir LM3₂ vogner det største støttemomentet.

3.6.3.4 Sammenligning av støttemoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk (Tilfelle 2)

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 74 viser at LM1 gir størst støttemoment fra 0 til 100 m.

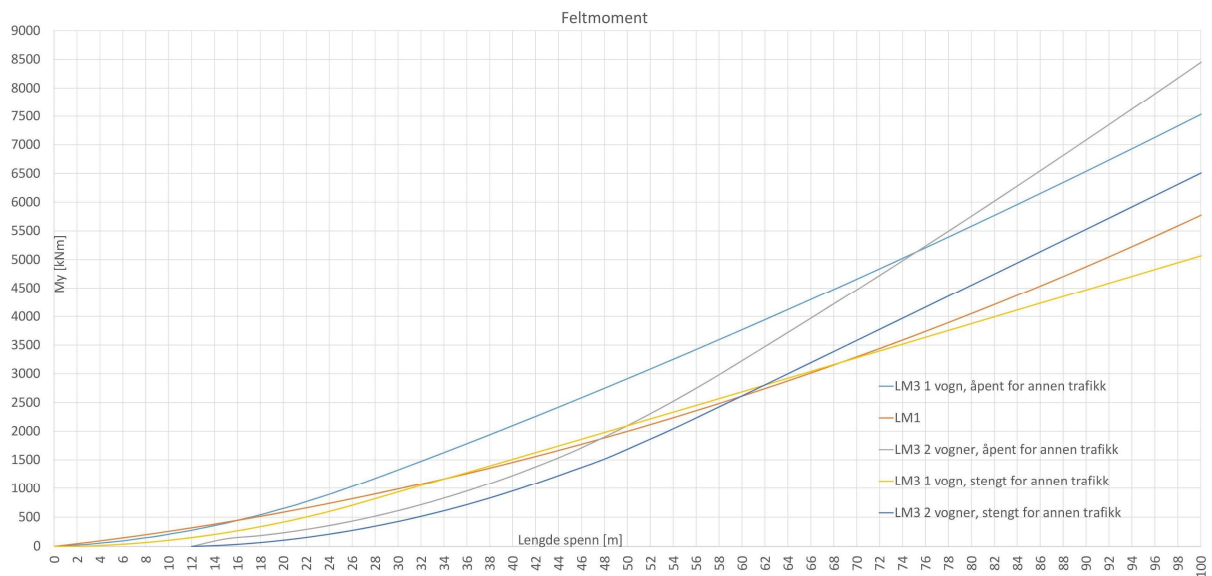
3.6.3.5 Drøfting av resultat for støttemoment



Figur 75 Grenseområde for støttemoment – Tilfelle 1 og 2

Figur 75 viser at det ved rundt 80 m spennlengde lønner seg å plassere LM3 last midt i spenn AB for å få det største feltmomentet ved beregning. Det beste alternativet her er å stenge broen ved laster fra LM3 ved større spennlengder. LM1 blir da dimensjonerende fra rundt 62 m til 100 m.

Feltmoment



Figur 76 Feltmoment for LM1 og LM3 - 3 spenn

3.6.3.6 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, åpent for annen trafikk

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 76 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 14 m. Fra 14 m til 75 m gir LM3₁vogn størst feltmoment. Fra 75 til 100 m gir LM3₂vogner størst feltmoment.

3.6.3.7 Sammenligning av feltmoment for LM1 og LM3, stengt for annen trafikk

LM1: LM3₁ vogn: LM3₂ vogner:

Figur 76 viser at LM1 gir størst feltmoment fra 0 til 34 m. Fra 34 m til 62 m gir LM3₁vogn størst feltmoment. Fra 62 til 100 m gir LM3₂vogner størst feltmoment.

3.6.3.8 Drøfting av resultat for støttemoment

Vi ser av resultatene at LM1 gir det største feltmomentet ved korte spennlengder, og vil da være dimensjonerende ved beregning. Ved større spennlengder vil laster fra LM3₁ vogn eller LM3₂ vogner bli dimensjonerende, med mindre man velger å stenge broen. Da blir LM1 dimensjonerende for noe større spennlengder, her opptil rundt 34 meter.

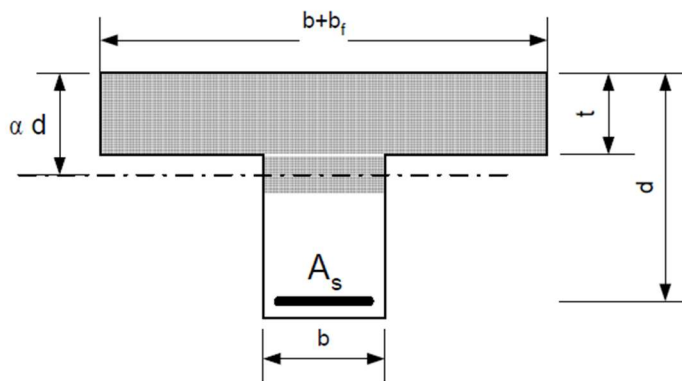
4 Eksempel på dimensjonering av midtbjelke

I denne delen av oppgaven har vi valgt å se på et tilfelle av dimensjonering av en midtbjelke i en bjelkebro. Her skal vi se på to forskjellige lasttilfeller: LM1 begge felt og LM3, åpent for annen trafikk, som tidligere beskrevet.

Vi har satt bjelkehøyden til $\frac{L_s}{20} = 1500 \text{ mm}$ og bredden på steget til 650 mm . Lengden på spennet er satt til 30 m . Vi ser for oss at bjelken blir en del av brodekket og har beregnet denne som et T-tverrsnitt. T-tverrsnitt vist i figur 77.

Betongen har vi valgt til fasthetsklasse B45 og armeringskvaliteten er valgt til B500NC.

Vi har valgt å begrense beregningene til moment om sterk akse. Lastfaktorer er hentet i NS-EN 1990 Tabell NA.A2.4(A).



Figur 77 T-tverrsnitt

4.1 Eksponeringsklasse

Kategorisert etter hvilke typer miljø som konstruksjonene utsettes for. Av de fem ulike eksponeringsklassene oppgitt i NS-EN 1992-1-1 Tabell 4.1, er både XC, XD og XS aktuelle for betongbroer. Disse tre eksponeringsklassene karakteriseres etter faren for korrosjon og hva korrosjonen påvirkes av. Opphavet av klorider som fremkaller korrosjon er skillelinjen mellom de tre klassene. Hver klasse er i tillegg delt inn etter hvor stor påkjenningen det er fra miljøet. For eksempel om konstruksjonen er utsatt for permanent tørt eller vekselvis fuktig og tørt miljø. Hvis vi tenker at broen skal bygges på Vestlandet velger vi XD3 fordi været her er vekselvis vått og tørt som definert.

4.2 Bestandighet og overdekning for armering

Ifølge Statens Vegvesen er bestandighet definert som: «Byggematerialets evne til å beholde sin styrke og sitt utseende over den forutsatte dimensjonerende brukstiden uten store vedlikeholdsutgifter.»

(Statens Vegvesen, 2015)

C_{nom} nominell overdekning

C_{min} minste overdekning

$C_{min,b}$ minste overdekning etter kravene til heft

$C_{min,dur}$ minste overdekning etter miljøpåvirkninger

ΔC_{dev} største tillatte negative avvik; = 10 mm definert i NA.4.4.1.3(1)P

Minste overdekning, C_{min} , beregnes etter EK2 pkt. 4.4.1.2 og skal tilfredsstillere kravene til heft og miljøpåvirkninger.

$$C_{min} = \max(C_{min,b}; C_{min,dur}; \Delta C_{dev} = 10 \text{ mm})$$

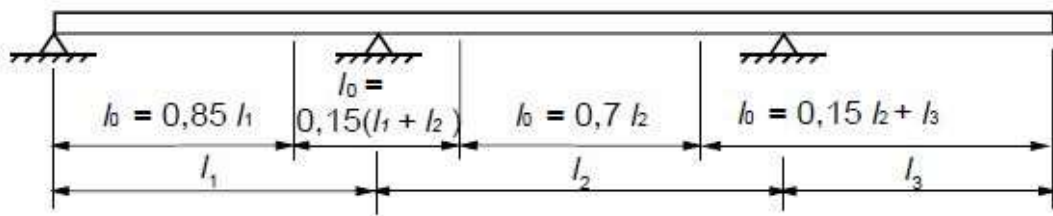
Beregning av C_{min} danner grunnlaget for beregningen av den nominelle overdekningen som er aktuell i hvert tilfelle. Den nominelle overdekningen beregnes ved bruk av følgende formel:

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

4.3 Effektiv flensbredde

I pkt. 5.3.2.1 i NS-EN 1992-1-1 står definisjon av l_0 , for beregning av effektiv flensbredde:

- (1) *P I T-bjelker avhenger den effektive flensbredden, som kan forutsettes å ha en jevn spenningsfordeling, av målene på steg og flens, typen belastning, spennvidde, opplagring og tverrarmring.*
- (2) *Effektiv flensbredde bør velges basert på avstanden l_0 mellom momentnullpunktene som gitt på figur.*



Figur 78 Definisjon av l_0 for beregning av effektiv flensbredde

(3) Den effektive flensbredde b_{eff} for en T-bjelke eller L-bjelke kan bestemmes som:

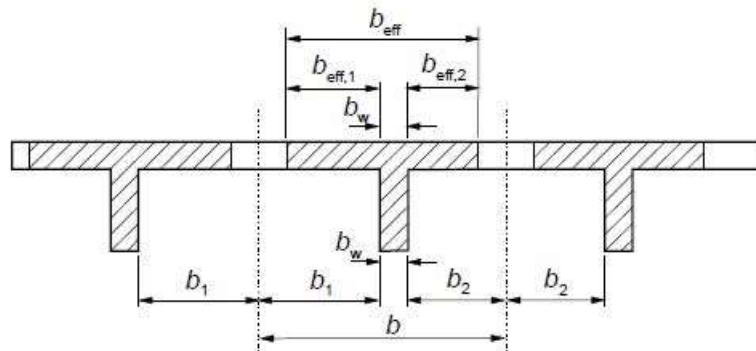
$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \quad (5.7)$$

der

$$b_{eff,i} = 0,2 b_i + 0,1 l_0 \leq 0,2 l_0 \quad (5.7a)$$

og

$$b_{eff,i} \leq b_i \quad (5.7b)$$



Figur 79 Effektiv flensbredde

I våre beregninger har vi blant annet brukt formlene som vist i figur 80.

Formeloversikt	
Trykksjonens momentkapasitet	$M_{Rd} := f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot t \cdot \left(d - \frac{t}{2} \right)$
Strekksjonens momentkapasitet	$M_{Rd} := f_{yd} \cdot A_s \cdot \left(d_{ny2} - \frac{t}{2} \right)$
Trykkspenning i flens	$\sigma_{cd} := \frac{M_{Rd}}{t \cdot b_{eff} \cdot \left(d - \frac{t}{2} \right)}$
Nødvendig strekkarmering	$A_s := \frac{M_{Ed}}{\left(d - \frac{t}{2} \right) \cdot f_{yd}}$
Areal hovedarmering	$A_{\phi,h} := \pi \cdot \left(\frac{\phi_h}{2} \right)^2$
Nødvendig antall armeringsjern	$n := \frac{A_s}{A_{\phi,h}}$

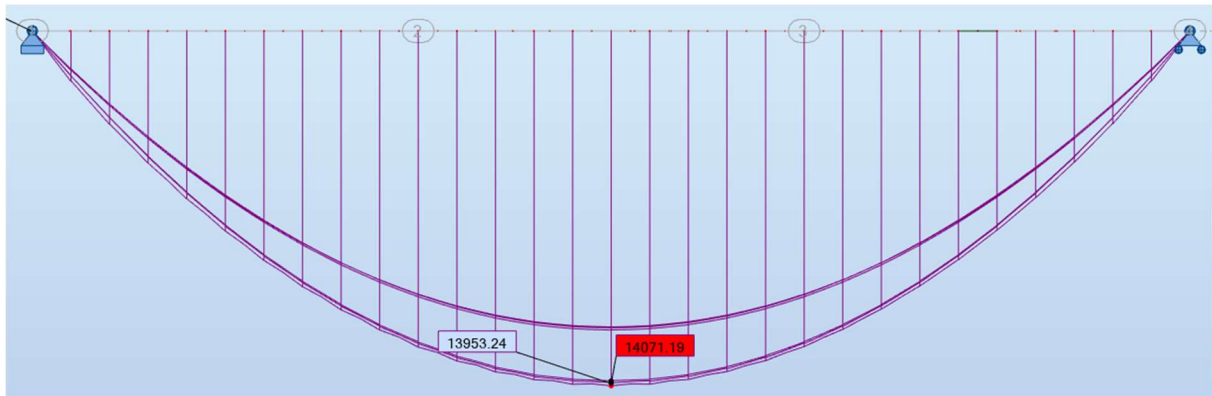
Figur 80 Beregningsformler

4.4 Drøfting av resultat

	Lasttilfelle	
	LM1	LM3
Dimensjonerende feltmoment	14750.4 kNm	18091.06 kNm
Momentkapasitet	19352.75 kNm	18167.51 kNm
Nødvendig armering	28154.3 mm ²	34530.65 mm ²
Valgt armering	33778.4 mm ²	43429.38 mm ²
Antall lag	7	9
Antall jern	42	54
Stangdiamenter	Ø32	Ø32
Utnyttelse	0,96	0,98
Differanse utnyttelse	0,98 – 0,96 = 0,02 = 2%	

Tabell 14 Resultat beregning i MathCAD

Som man kan se i [tabell 14] er det belastningen fra lasttilfelle med «LM3, ett felt, kombinert med LM1-last i begge felt», er det som gir den største belastningen på midtbjelken. Her valgte vi imidlertid å legge inn ekstra armering for å ta opp de økte kreftene og ser at tverrsnittet da holder i begge tilfeller. Denne forskjellen kommer naturligvis av at den økte lasten fra LM3 øker feltmomentet og resultatet er som forventet. Beregninger fra MathCAD er vist i vedlegg x.



Figur 81 Resultat for LM1 begge felt fra Robot

Vi har også gjennomført en tilsvarende beregning i Robot for LM1 laster, og ser at resultatet er relativt like, se figur 81. Det dimensjonerende momentet blir noe mindre enn ved våre beregninger. Dette er nok grunnet at våre beregninger bygger på forenklede laster som dermed fører til en større belastning på midtbjelken. I Robot blir nok lastene fordelt noe mer over de tre ulike bjelkene som da fører til en noe mindre lokal belastning på midtbjelken.

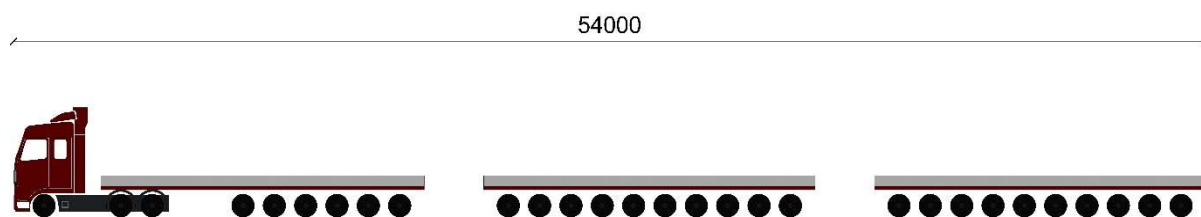
5 Kurvatur

I dette avsnittet skal vi se nærmere på hvilken veiutforming som er nødvendig for kjøretøy i klassen for spesialtransport, LM3.

Dette er ikke en problemstilling som nødvendigvis gjelder for nye større brokonstruksjoner, men kan bli gjeldende på mindre veier og på ramper i store kryss.

Vi har begrenset størrelsen på spesialkjøretøyet til total lengde på 54 m og total bredde på 2.7 m. Dette på grunnlag av lastdefinisjoner i «Forskrift for trafikklast på broer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner i det offentlige vegnettet (trafikklast for broer m.m.). (Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo, 2019)

Vi har utarbeidet en modell, som ikke fremstiller et reelt kjøretøy, men som gir et inntrykk av hvordan et spesialkjøretøy kan utformes, i hovedsak med tanke på lengde og bredde. Dette er vist i figur 82 og figur 83.



Figur 82 LM3 Eksempel lengde



Figur 83 LM3 Eksempel Bredde

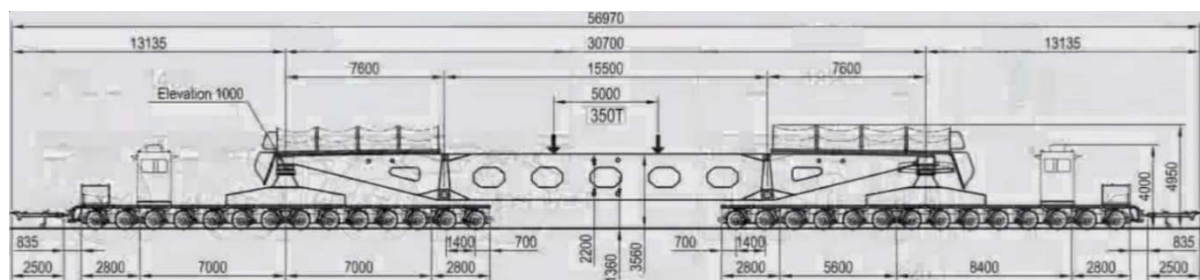
Årsaken til at vi har gjort dette er fordi spesialkjøretøy ikke er fast definert og dermed kan variere fra prosjekt til prosjekt.

Et eksempel på utforming av spesialkjøretøy er vist i figur 84 og figur 85.

Dette er et kjøretøy som eies av Statnett Transport og er spesialdesignet for å kunne transportere komponenter i områder der både veikurvatur og landskap ikke er tilpasset spesialtransport.



Figur 84 Spesialkjøretøy Statnett Transport

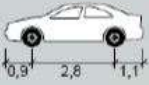
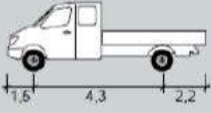

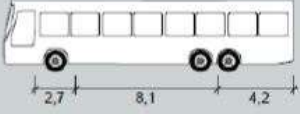
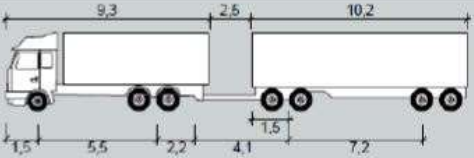
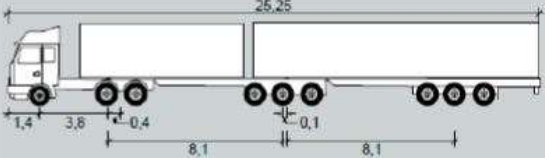


Figur 85 Målsatt tegning av spesialkjøretøy

(Statnett, 2019)

5.1 Dimensjoneringsgrunnlag

I utgangspunktet vil man dimensjonere en aktuell vei med kjøretøyene i tabell 15. Det er med data om disse kjøretøyene vi har laget en tilnærming til hva som kreves for et LM3 kjøretøy. (Statens Vegvesen, 2017)

	<p>Personbiler, varebiler og kombibiler (P) Lengde: 4,80 m Brekke: 1,80 m Svingradius: 6,00 m</p>
	<p>Liten lastebil (LL) Lengde: 8,00 m Brekke: 2,55 m Svingradius: 10,00 m</p>
	<p>Lastebiler (inkl. brannbiler med stige) (L) Lengde: 12,00 m Brekke: 2,55 m Svingradius: 12,00 m</p>
	<p>Boggebusser (B) Lengde: 15,00 m Brekke: 2,55 m Svingradius: 12,50 m</p>
	<p>Vogtøg (VT) Lengde: 22,00 m Brekke: 2,60 m Svingradius: 12,50 m</p>
	<p>Modulvogtøg (MVT) Lengde: 25,25 m Brekke: 2,60 m Svingradius: 13,50 m</p>

Tabell 15 Dimensjonerende kjøretøy

5.2 Begrensning for kurvatur

Vi har begrenset oppgaven til at vi går nærmere inn på krav til horisontalkurvatur. Mest vesentlig i denne sammenheng er breddeutvidelsen i kurver. Bakgrunnen for dette valget er at det er lastpåvirkningen fra trafikklastene som er vårt hovedfokus og dette er i hovedsak ment for å gi et inntrykk av hvilke krav det stilles til veiutforming for å ta høyde for større kjøretøy.

5.3 Oppbygning av horisontalkurvaturen

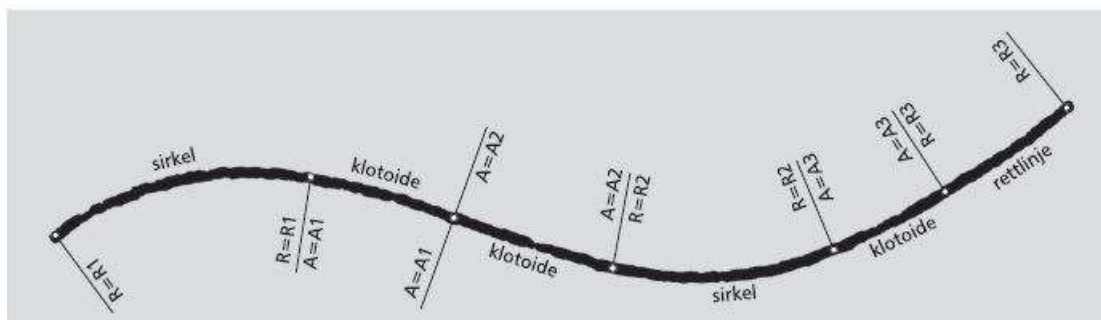
Horisontalkurvaturen bygges i utgangspunktet opp av tre hovedgrupper.

Man har rettlinje som er lange rette linjer. Dette er veistrekninger som gir gode muligheter for forbikjøring og god sikt, men er ikke anbefalt å bruke i stor utstrekning, og det er anbefalt å heller bruke svakt krummede kurver.

Videre har man sirkelkurver. Dette er en «geometrisk kurve med konstant krumning». I beregningshensyn er dette en veiutforming som «gir konstant sidekraft på kjøretøyet ved jevn fart». At den har jevn krumning lager også et grunnlag for sikker kjøring og en «estetisk veilinje».

Sist av hovedgruppene er klotoide. Klotoiden er en overgangskurve mellom sirkel og rettlinje eller mellom sirkelkurver med ulik og ensrettet krumning og mellom sirkelkurver med ulik krumning. Sistnevnte kalles en «vendeklotoide». I beregningshensyn har klotoiden «gode egenskaper som overgangskurve» fordi «dens geometri gir konstant vinkelhastighet ved kjøring med konstant fart». Et eksempel på «sammensetning av ulike elementer i horisontalkurvaturen» er vist i figur 86.

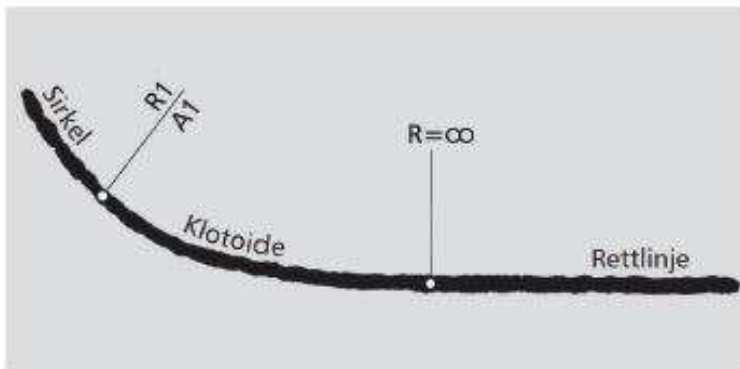
(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)



Figur 86 «Sammensetning av ulike elementer i horisontalkurvaturen»
(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)

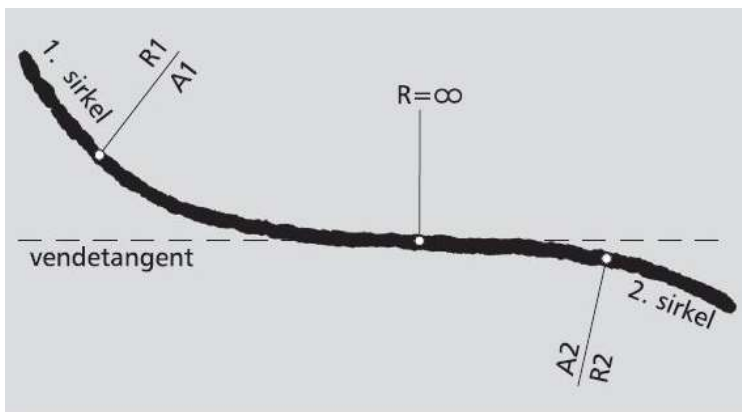
5.3.1 Eksempler på kurvekombinasjoner i en horisontalkurvatur

Figur 87 viser en kombinasjon av sirkel, klottoide og rettlinje. Dette er den vanligste kombinasjonen i horisontalkurvaturen.



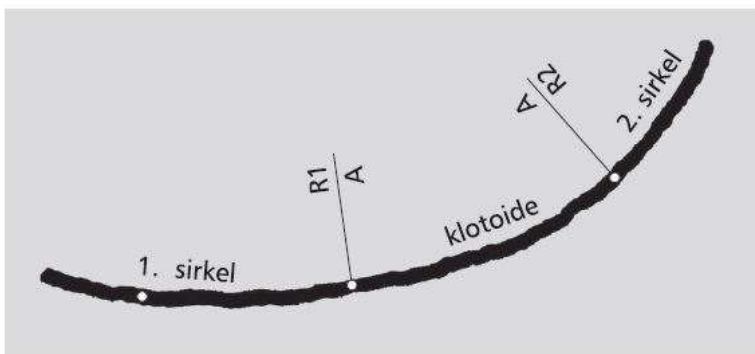
Figur 87 Sirkel, klottoide og rettlinje

Figur 88 viser en vendeklottoide. Dette er to klottoider som er direkte kobler sammen for å «danne en overgangskurve mellom to sirkelkurver med motsatt krummer». Dette kalles S-kurver.



Figur 88 Vendeklottoide

Figur 89 viser en eggkurve. Dette er en klottoide som kobler sammen to sirkler med ulik grad av krumning. For eksempel er krapp høyresving koblet sammen med en svak høyresving.



Figur 89 Eggkurve

(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)

5.4 Breddeutvidelse av horisontalkurvatur

For at et kjøretøy skal kunne komme seg gjennom kurver trengs det mer plass enn ved kjøring på rette strekninger. Årsaken til det økte plassbehovet er sporing, og at deler av kjøretøyet vil henge utover hjulene. På grunn av dette økes kjørefeltbredden og denne utvidelsen er ekstra viktig i skarpe kurver og i kryss.

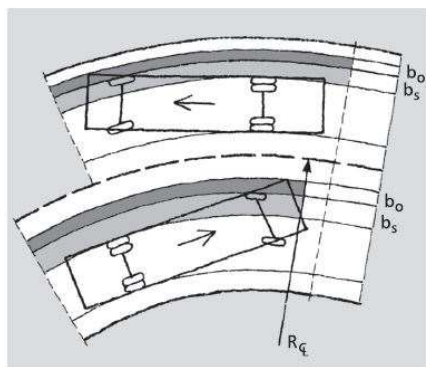
Den nødvendige breddeutvidelsen er avhengig av dimensjonerende kjøretøy og horisontalkurveradius. I tabell E.2 i Håndbok N100 (Statens Vegvesen, 2017) er det fastsatt breddeutvidelser for 2-felts veger basert på dimensjonerende kjøretøy og kurveradius. Dette vist i tabell 16.

Radius	20	30	40	50	70	100	125	150	200	250	300	400	500
Modulvogn	8,6	5,7	4,3	3,4	2,5	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,5	0,5
Vogn	6,0	4,0	3,0	2,5	1,8	1,3	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
Buss	5,4	3,6	2,7	2,1	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
Lastebil	3,6	2,4	1,8	1,5	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
Liten lastebil	1,8	1,2	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Personbil	1,1	0,7	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabell 16 E.2: Breddeutvidelse for 2-felts veger avhengig av kurveradius (mål i m)

Da vi ser på kjøretøy som ikke er entydig definert i standard dimensjoneringsgrunnlag har vi valgt å se på dimensjoneringsgrunnlaget i V120 og brukt de nødvendige parameterne for å lage en tilnærming til breddeutvidelse og sporingkurver for et spesialkjøretøy.

I figur 90 vises en prinsippskisse for utvidelse av kjørefeltene hver for seg. Utvidelsen grunnet sporing vil være forskjellig da kurvene i indre og ytre felt har ulik radius. Dette er mest vesentlig i skarpe kurver. På frie veistrekkninger vil man som regel angi en total breddeutvidelse for hele kjørebanelen. Det er sistnevnte vi har gjort ved utforming av sporingkurver. (Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)



Figur 90 Prinsippskisse for breddeutvidelse for en 2-felts vei

Breddeutvidelsen for en 2-felts vei er summen av:

- ♦ Sporingssøkning i ytre kjørefelt
- ♦ Sporingssøkning i indre kjørefelt
- ♦ Overhenget i indre kjørefelt
- ♦ Overhenget i ytre kjørefelt

Grunnlag for beregning av breddeutvidelse har vi satt til H2 hovedvei da det er tilsvarende kjørefeltbredde som er brukt i beregningene av selve brokonstruksjonen.

Parametere for H2 er vist i tabell 17:

H2

Veitype	H/Hø	Forbikjøringssikt	
ÅDT	6'-12'	Min. vertikalkurveradius, høy	5300
Fartsgrense [km/t]	90	Min. vertikalkurveradius, lav	2300
Tverrprofil	12,5	Maks. overhøyde	8
Skulder 1	1,5	Maks. stigning	6
Kjørefelt 1	3,5	Maks. resulterende fall	10
Indre skulder 1	0,5	Min. resulterende fall	2
Skille kjøreretning	1,5 MR	Kryssløsning	P evt. T
Indre skulder 2	0,5	Avstand mellom kryss	1000
Kjørefelt 2	3,5	Min. Horisontalkurveradius	700
Skulder 2	1,5	Min. vertikalkurveradius	12400
		Avkjørsler	AF
Alternativ utforming		Avstand mellom stopplommer	5
Min. Horisontalkurveradius	400		
Min. klotoide	170	Forbikjøring	
Stoppsikt	160	Eget- eller motg. felt	E
Δ st1	-14	Belysning	B
Δ st2	20	Dimensjonerende kjøretøy	MVT
Møtesikt		Dimensjonerende kjøremåte	A

Tabell 17 Parametere for H2 vei
(Statens Vegvesen, 2017)

5.4.1 Sporingsøkning

Sporingsøkningen er definert som breddeøkning mellom ytre forhjul på fremre aksling, og indre bakhjul på bakaksel ved kjøring i kurve.

Denne parameteren skal ta vare på den delen av breddeøkningen som skyldes økt avstand mellom hjulsporene.

Tabell 18 viser sporingsøkning for dimensjonerende kjøretøy.

Sporingsøkning [m]											
Lengde [m]	Dim. kjøretøy	40	70	100	125	150	200	250	300	400	500
54	LM3	2,64 5	1,51 9	1,08 1	0,86 7	0,72 2	0,53 6	0,41 4	0,35 1	0,26 4	0,19 7
22	Vogntog (VT)	1,19 0	0,68 0	0,47 0	0,37 0	0,31 0	0,23 0	0,18 0	0,15 0	0,11 0	0,09 0
15	Buss (B)	0,68 0	0,39 0	0,28 0	0,22 0	0,19 0	0,14 0	0,11 0	0,09 0	0,07 0	0,04 0
12	Lastebil (L)	0,57 0	0,33 0	0,24 0	0,20 0	0,16 0	0,12 0	0,09 0	0,08 0	0,06 0	0,05 0
Sporingsøkning per meter kjøretøy											
	Vogntog (VT)	0,05 4	0,03 1	0,02 1	0,01 7	0,01 4	0,01 0	0,00 8	0,00 7	0,00 5	0,00 4
	Buss (B)	0,04 5	0,02 6	0,01 9	0,01 5	0,01 3	0,00 9	0,00 7	0,00 6	0,00 5	0,00 3
	Lastebil (L)	0,04 8	0,02 8	0,02 0	0,01 7	0,01 3	0,01 0	0,00 8	0,00 7	0,00 5	0,00 4
	Snitt	0,04 9	0,02 8	0,02 0	0,01 6	0,01 3	0,01 0	0,00 8	0,00 6	0,00 5	0,00 4

Tabell 18 Sporingsøkning

Økningen for LM3 kjøretøy er et estimat basert på tall fra de andre dimensjonerende kjøretøyene.

(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)

5.4.2 Overheng

Denne parameteren går også inn i beregningen av nødvendig breddeutvidelse i kurver. Denne tar hensyn til breddeøkning som skyldes at deler av kjøretøyet vil kreve plass utenfor linjen som beskrives av ytre forhjul. Tabell 19 viser overheng for dimensjonerende kjøretøy.

Overheng [m]

Lengde [m]	Dim. kjøretøy	40	70	100	125	150	200	250	300	400	500
54	LM3	1,28	0,69	0,51	0,40	0,30	0,26	0,21	0,18	0,12	0,09
22	Vogntog (VT)	0,22	0,13	0,10	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
15	Buss (B)	0,58	0,29	0,23	0,18	0,15	0,12	0,09	0,08	0,05	0,04
12	Lastebil (L)	0,27	0,16	0,10	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02
		Overheng per meter kjøretøy									
	Vogntog (VT)	0,010	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
	Buss (B)	0,039	0,019	0,015	0,012	0,010	0,008	0,006	0,005	0,003	0,003
	Lastebil (L)	0,023	0,013	0,008	0,007	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002
	Snitt	0,024	0,013	0,009	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002

Tabell 19 Overheng

(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)

5.4.3 Breddeutvidelse

Ved å benytte snittverdier fra de andre kjøretøyene har vi beregnet nødvendig breddeutvidelse for kjørebanelen og per kjørefelt. Til dette har vi benyttet sporingsøkningen og overheng pluss et fast styringstillegg som vist i figur 91.

$$\Delta B = 2 * b_s + 2 * b_0 + 0,15$$

Der

$b_s = \text{sporingsøkning}$

$b_0 = \text{overheng}$

0,15 = fast styringstillegg

Figur 91 Formel for bestemmelse av breddeutvidelse

«I formelen er kjøremåte A (kjøretøyet holder seg innenfor eget kjørefelt) lagt til grunn, samt de teoretiske mål for dimensjonerende kjøretøy.»

(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)

Det har gitt følgende resultat, vist i tabell 20.

Beregning av breddeutvidelse i kurve for LM3 kjøretøy

Horisontalkurveradius	40	70	100	125	150	200	250	300	400	500
Total veibredde i kurve	17,99	15,42	14,51	14,04	13,66	13,34	13,08	12,95	12,72	12,58
Per kjørefelt	2,74	1,46	1,01	0,77	0,58	0,42	0,29	0,23	0,11	0,04

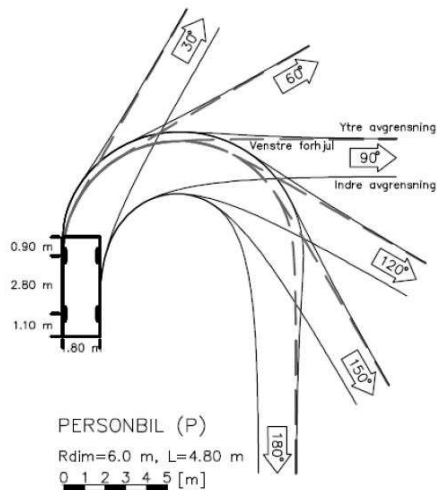
Tabell 20 Breddeutvidelse i kurve for LM3

Dette har vi brukt som grunnlag for å lage en modell av sporingskurver for et spesialkjøretøy, som vi til slutt bruker for å definere en grense for tilkomst med et kjøretøy i denne størrelsesorden.

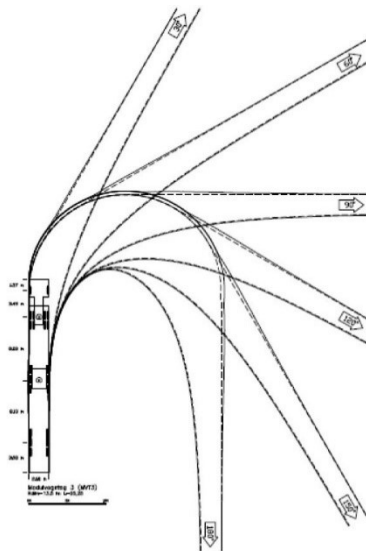
(Vegdirektoratet og Statens Vegvesen, 2014)

5.4.4 Spøringskurver

På figur 92 og 93 ser man eksempel på spøringskurver for ulike svingradier. Disse modellene er basert på henholdsvis modulvogntog og personbil. Her ser man forskjellen på nødvendig breddeutvidelse av veien basert på kjøretøyet og radius på svingen. Det kommer tydelig frem at et lite kjøretøy som en personbil krever vesentlig mindre breddeutvidelse enn et modulvogntog og videre vil et kjøretøy for spesialtransport kreve enda mer plass for kunne komme gjennom kurven.

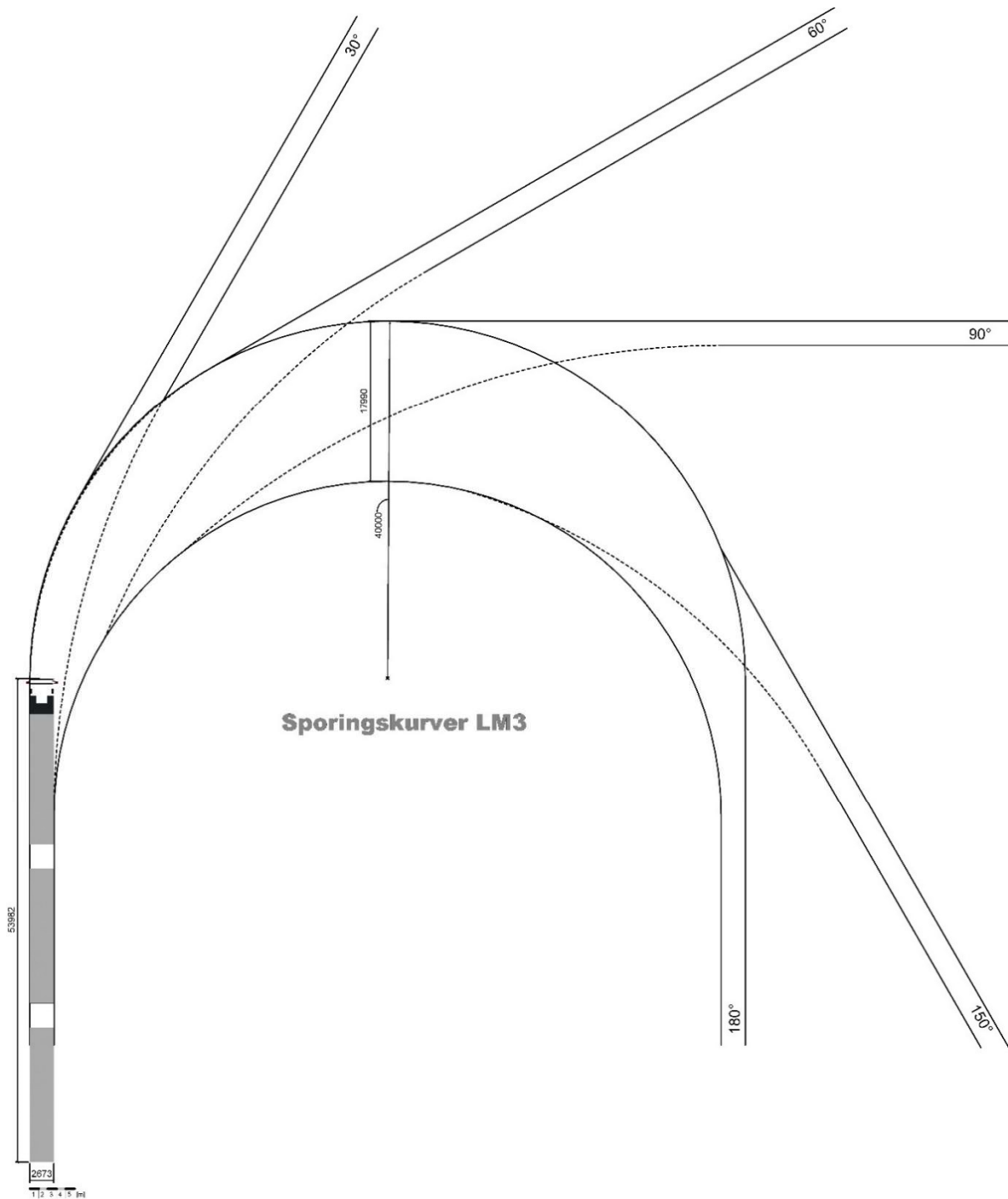


Figur 92 Spøringskurver for personbil (P)



Figur 93 Spøringskurver for modulvogntog (MVT)

Her har vi lagt inn verdiene for vogntog og modulvogn og derfra laget en tilnærming til kurvatur som er nødvendig for at et spesialkjøretøy skal kunne komme gjennom kurven, vist i figur 94. (Statens Vegvesen, 2017)



Figur 94 Sporingskurver for LM3

5.5 Konklusjon for kurvatur

Beregningene og modellen av sporingskurver for spesialkjøretøy etter definisjon gitt over viser at det kreves store arealer for at et slikt kjøretøy skal kunne forsere en kurve, spesielt med liten kurveradius. Dette vil ikke være et problem på nye større brokonstruksjoner og veier som leder til disse, men kan være et problem på mindre eksisterende veier.

6 Konklusjon

Våre resultater viser at det kan være stort variasjon i hvilke lasttilfelle som blir dimensjonerende avhengig av antall spenn og lengder på spenn.

For case 1 ser vi at resultatene for feltmoment for både bjelkebro og platebro viser at det er lasttilfelle med LM1 i begge felt som blir dimensjonerende ved korte spennlengder, mens ved større spennlengder er det laster fra LM3 som blir dimensjonerende. Dette gjelder for LM3 laster med 1 eller 2 vogner.

For case 2 og 3 blir konklusjonen at hvilke laster som blir dimensjonerende varierer i svært stor grad for både bjelkebro og platebro, avhengig stort sett av spennlengder.

Ved korte spenn ser vi at lastverdiene blir relativt like og at det dimensjonerende momentet kan da bytte mellom å komme fra støttemoment eller feltmoment.

Ved større spennlengder forøvrig vil stort sett feltmomentet bli dimensjonerende, og her vil det være forskjell på bjelkebro og platebro.

For bjelkebro vil det dimensjonerende feltmoment komme fra LM3, stengt for annen trafikk, mens for platebro vil det dimensjonerende feltmomentet komme fra LM3, åpent for annen trafikk.

Videre viser resultatene fra platebroberegningen vesentlig lavere momenter enn ved bjelkebroberegning. Dette er fordi resultatene for platebro viser moment per meter bredde. Ved lengre spenn vil det derfor være bedre å benytte platebro enn bjelkebro, fordi man må opp i veldig store bjelketverrsnitt for å ta unna momentet som måtte oppstå. Utover dette kan det da være aktuelt å benytte flere bjelker i en bjelkebro for å minske momentet på hver enkelt bjelke.

Basert på problemstilling ser vi at det å finne et nøyaktig punkt som skiller LM1 og LM3 er som nevnt i stor grad avhengig av spennlengde. For å kunne gjøre dette, må man da i utgangspunktet bestemme nøyaktig spennlengde for å kunne bestemme en eventuell skillelinje.

7 Referanseliste

- Fallsen, H. B. (u.d.). *www.ansatt.hig.no*. Hentet 02 24, 2019 fra https://www.ansatt.hig.no/leifs/Statikk/3-moment-likningen/3-moment-likningen_-_Harald_Fallsen.pdf?fbclid=IwAR1MA1ONV8W7v7psHg_pi4uHBTaymEDMzuQDpQA8nleqmNjwGkgT4oW6Q
- Høgskolen i Bergen. (2012, 09 06). *Betongkonstruksjoner Formler og diagrammer NS-EN 1992-1-1. Betongkonstruksjoner Formler og diagrammer NS-EN 1992-1-1*. Bergen: Institutt for bygg- og jordskiftefag.
- Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo. (2007, 03 30). Forskrift om anlegg av offentlig veg. Oslo, Norge. Hentet 05 17, 2019 fra <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2007-03-29-363?q=anlegg%20om%20offentlig%20veg>
- Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo. (2019, April 03). *Lovdata*. Hentet fra Forskrift om trafikklast på bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner i det offentlige vegnettet (trafikklastforskrift for bruer m.m.): <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-11-17-1900?q=LM3>
- Justisdepartementet, Det juridiske fakultet i Oslo. (2019). *Lovdata*. Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/SFO/forskrift/1987-03-24-225>
- Norsk Stålforbund. (2010). *Stålhåndbok Del 3: 2010 Konstruksjoner av stål*. Norsk Stålforbund.
- Opeide, K. (2013). *Rv. 13 Hardangerbrua*. Statens Vegvesen.
- Standard Norge. (2010). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del2: Trafikklast på bruer*. Standard Norge.
- Standard Norge. (2016). *Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Oslo: Standard Norge .
- Standard Norge. (2018). *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Oslo: Standard Norge.
- Statens Vegvesen. (2015). *Håndbok N400 - Bruprosjektering*. Vegdirektoratet.
- Statens Vegvesen, V. (2017). *Veg- og gateutforming*. Statens Vegvesen, Vegdirektoratet.
- Statnett, T. (2019, April 16). *Statnett Transport*. Hentet April 16, 2019 fra Statnett Transport: <http://www.statnett-transport.no/transporttjenester/transport/>
- Store Norske Leksikon. (2009, 02 15). *Store Norske Leksikon*. Hentet 05 14, 2019 fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/slakkarmering>

Sørensen, S. I. (2013). *Betongkonstruksjoner - Beregning og dimensjonering etter Eurokode*
2. Trondheim: Fagbokforlaget.

Thue, J. V. (2019, 04 30). *Betong*. Hentet 05 08, 2019 fra Store Norske Leksikon:
<https://snl.no/betong#-Sammensetning>

Vegdirektoratet. (2014). *Bruprosjektering Eurokodeutgave*. Vegdirektoratet.

Vegdirektoratet. (2014). *Håndbok R412 Bruklassifisering*. Vegdirektoratet.

Vegdirektoratet. (2014). *Håndbok V440 Bruregistrering*. Vegdirektoratet.

Vegdirektoratet og Statens Vegvesen. (2014). *Premisser for geometrisk utforming av veger*.
Vegdirektoratet.

Øderud, H., & Nordahl, R. S. (2019, 4 30). *Store Norske Leksikon*. Hentet fra Store Norske
Leksikon: <https://snl.no/bro>

8 Vedlegg

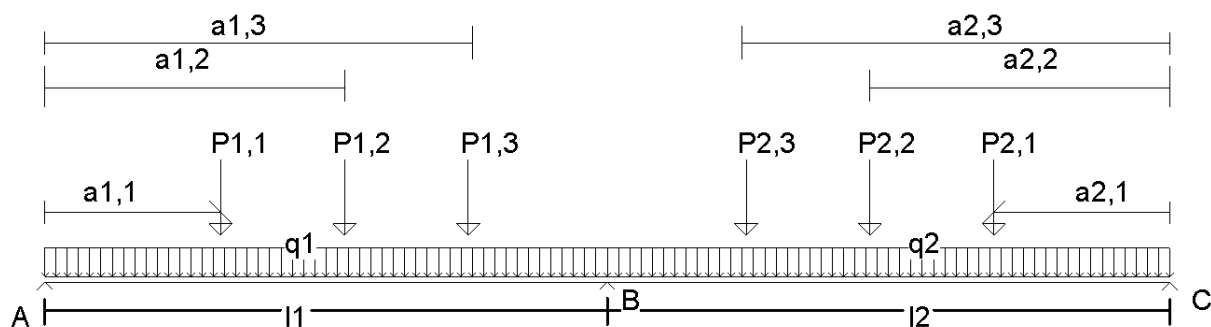
8.1 Vedlegg A

8.1.1 Beregningsgrunnlag for bjelkebro

3 momentligningen

Finner støttemomenter ved 3 opplegg av gangen.

$$M_A l_1 + 2M_B(l_1 + l_2) + M_C l_2 = -\frac{q_1}{4} \times l_1^3 - \frac{q_2}{4} \times l_2^3 - l_1^3 \sum p_{1,i} \left(\frac{a_{1,i}}{l_1} - \left(\frac{a_{1,i}}{l_1} \right)^3 \right) - l_2^3 \sum p_{2,i} \left(\frac{a_{2,i}}{l_2} - \left(\frac{a_{2,i}}{l_2} \right)^3 \right)$$



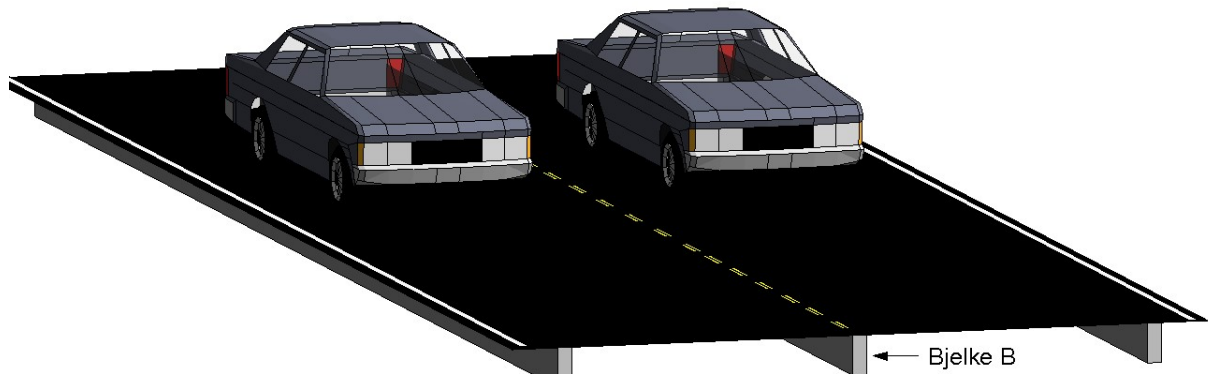
I denne oppgaven løser vi statikk på denne måten, opptil 3 spenn.

For å løse statikk for 3 spenn, må man lage en ligning for spenn AB + BC og en ligning for BC + CD. Etter dette løses ligningsettet for å finne alle støttemomenter.

Beregningsgrunnlag for bjelkebro.

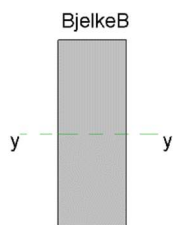
LM1.

Kjøretøyene i modell er kun til visuell hjelp for å skille mellom de forskjellige lastmodulene.



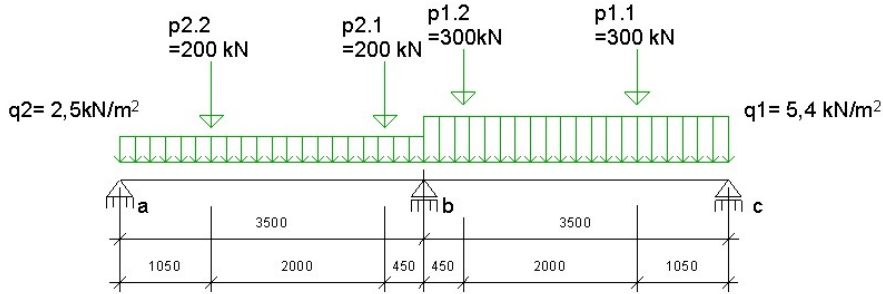
Forenkler tverrsnittet for bjelkebroen i beregningen, og plasserer sidebjelker (a og c) ut til ende av plate og bjelke b plasseres i midten.

Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på bjelke B. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y-aksen på bjelke som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene,

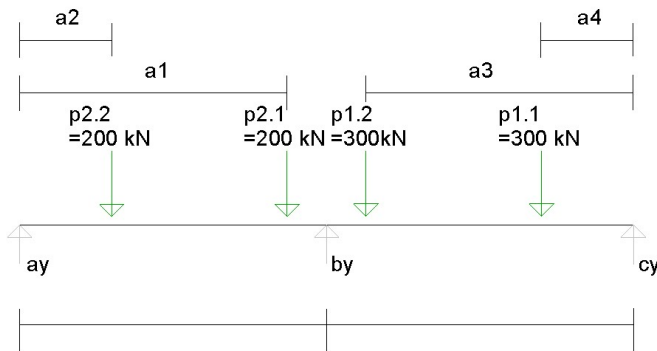


Lastfordeling i bredderetning

Beregner lastpåvirkning på bjelke B.



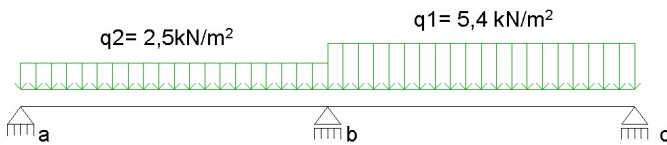
Finne punktlasten P_{lm1} sin virkning i lengderetning på bjelke B:



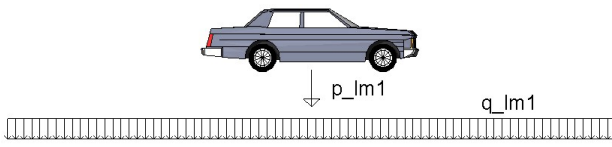
Finne

den jevnt fordelte lasten q_{lm1} sin

virkning i lengderetning på bjelke B:



Lastpåvirking i lengderetning LM1 på bjelke B



Finne P_{lm1}

3. momentligningen.

$$2 M_b \times (L1 + L2) = l1 \times p * \left(\left(\left(\frac{a1}{l1} \right) - \left(\frac{a1}{l1} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{a2}{l1} \right) - \left(\frac{a2}{l1} \right)^3 \right) \right) + l2 \times p \times \left(\left(\left(\frac{a2}{l1} \right) - \left(\frac{a1}{l1} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{a2}{l1} \right) - \left(\frac{a2}{l1} \right)^3 \right) \right)$$

$$L1 = L2 = L, a1 = a3, a2 = a4$$

$$M_b = \frac{1}{4} \times l \times p1.1 \times \left(\left(\frac{a4}{l} \right) - \left(\frac{a4}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} \times l \times p1.2 \times \left(\left(\frac{a3}{l} \right) - \left(\frac{a3}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} \times l \times p2.2 \times \left(\left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} \times l \times p2.1 \times \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 \right) = 211.17 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{(M_{støtteB} + P_{200} \times (a1 + a2))}{l} = 294,62 \text{ kN} \quad V_a = A_y = P_{200} \times 2 - V_b = 105,38 \text{ kN}$$

$$\sum M_c = 0 = -A_y \times 2l - B_y \times l + P_{300} \times (1,05\text{m} + 3,05\text{m}) + P_{200} \times (3,95\text{m} + 5,95\text{m})$$

$$B_y = 706,38 \text{ kN} = P_{lm1}$$

Finne q_{lm1}

3. momentligningen.

$$4M_b \times l = \frac{q_1}{4} \times l^3 + \frac{q_2}{4} \times l^3$$

$$M_b = \frac{q_1 + q_2}{16} \times l^2 = 6,048 \text{ kNm}$$

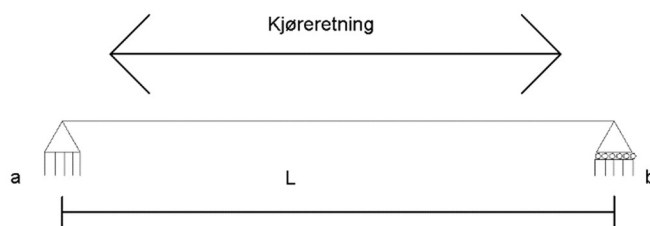
$$V_b = \frac{(M_{støtteb} + \frac{q_2 \times l^2}{2})}{l} = 6,103 \text{ kN} \quad A_y = V_a = q_2 \times l - V_b = 2,647 \text{ kN}$$

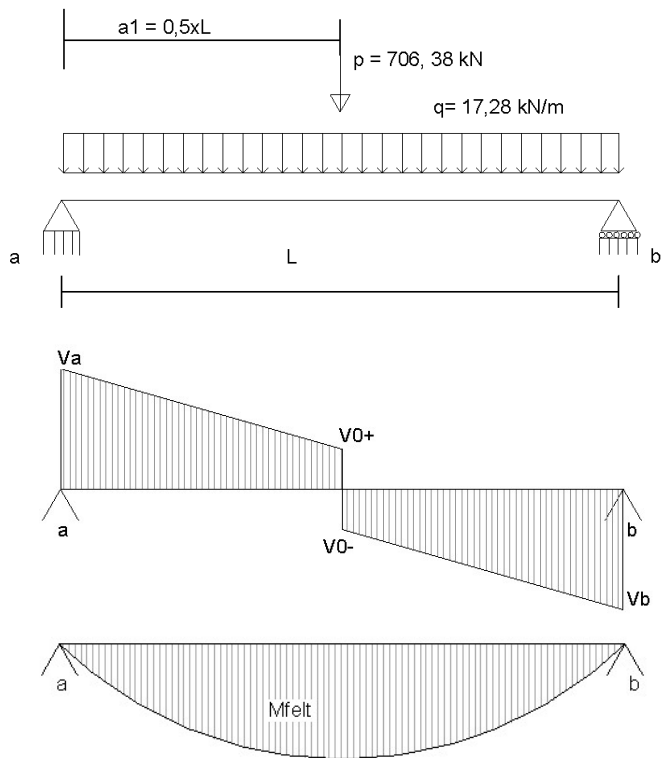
$$\sum M_c = 0 = -A_y \times 2l - B_y \times l + q_1 \times l \times \left(l + \frac{l}{2} \right) + \frac{q_2 \times l^2}{2}$$

$$B_y = 17,281 \text{ kN} = q_{lm1} = 17,281 \text{ kN/m (i lengderetning)}$$

Case 1 LM1 1 spenn – Kun feltmoment

Beregner største felt moment:





$$M_a = M_b = 0$$

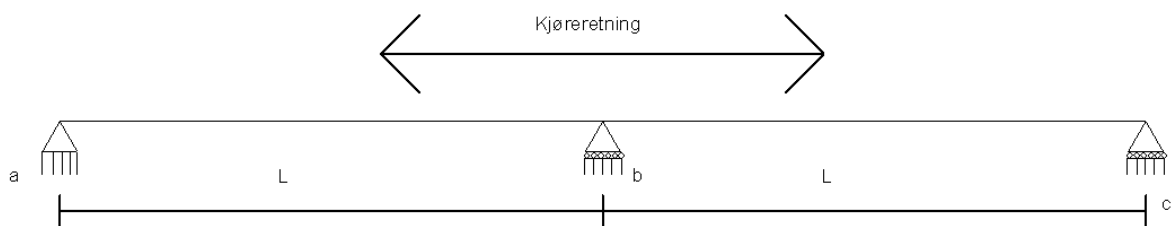
$$V_a = V_b = \frac{p+q \times l}{2}$$

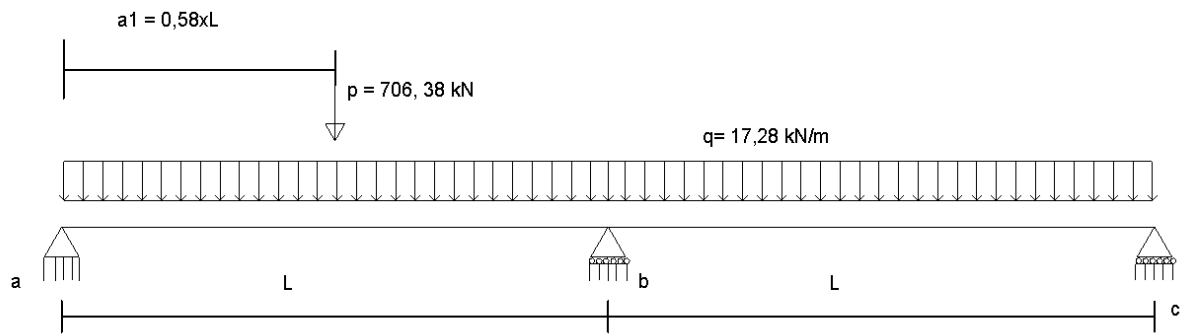
$$V_0^+ = V_a - q \times \frac{l}{2}$$

$$M_{felt} = \frac{V_a + V_0^+}{2} \times \frac{l}{2}$$

Case 2 - 2 spenn – Feltmoment og støttemoment

Beregning av støttemoment(M_b) ved opplegg B





Løser 3.momentligningen for å finne støttemoment:

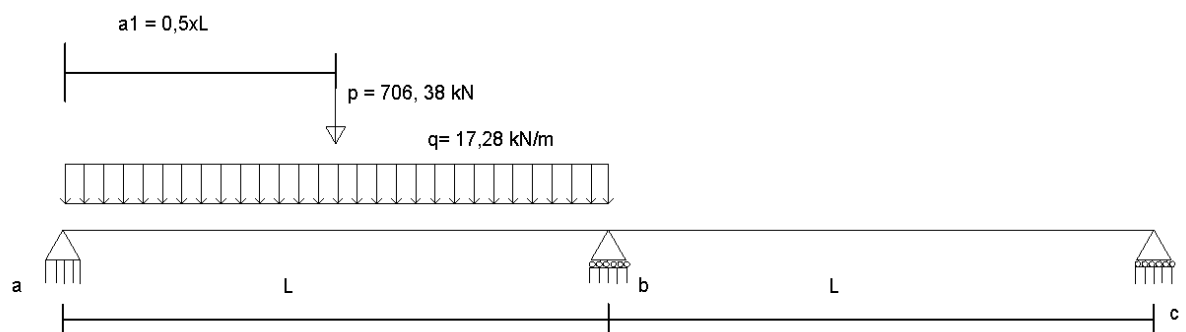
$$M_a = M_c = 0$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times \frac{q}{4} \times l^2 + p \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_b = \frac{q}{8} \times l^2 + \frac{p}{4} \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

Beregning av feltmoment

Lastplassering

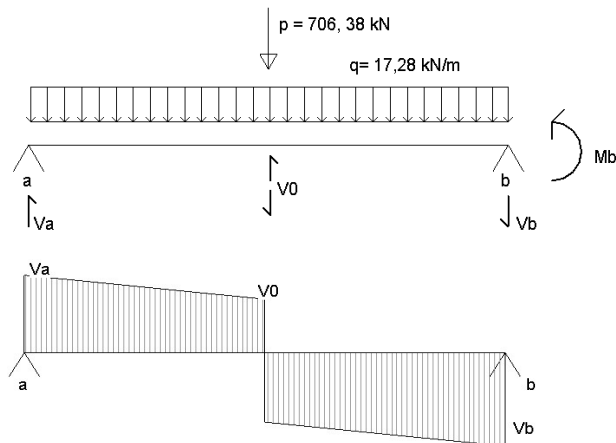


Løser 3.momentligningen for å finne støttemoment:

$$M_a = M_c = 0$$

$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + p \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_{støtdeb} = \frac{q}{16} \times l^2 + \frac{p}{4} \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

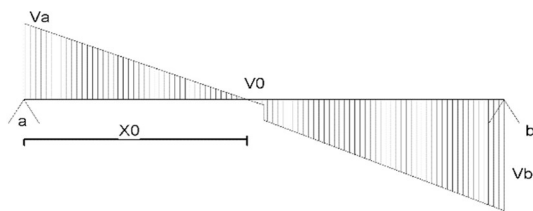


$$V_b = \frac{M_b + \frac{q \times l^2}{2} + p \times \frac{l}{2}}{l} \quad V_a = q \times l + p - V_b$$

$$V_0 = V_a - q \times \frac{l}{2}$$

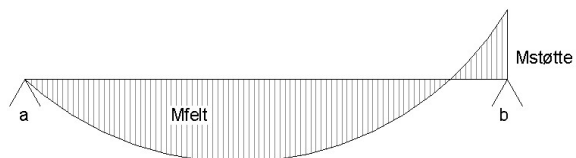
Evt. Ved lange spenn, når $V=0$ før punktlast inntreffer.

$$V_0 = 0 \quad X_0 = \frac{V_a}{q}$$

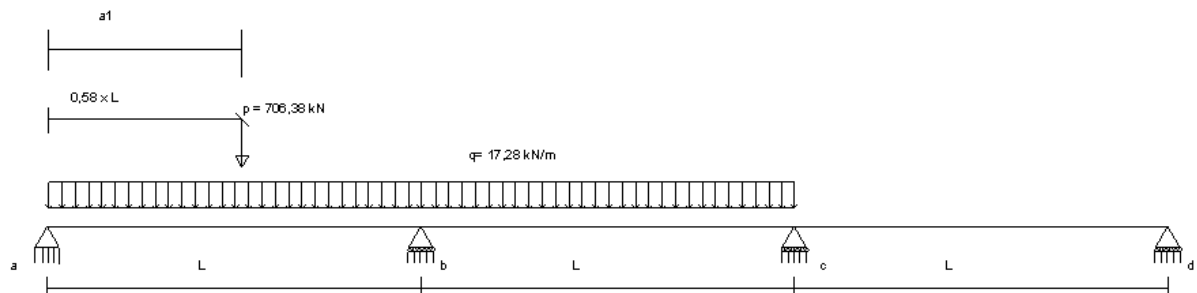


$$M_{felt} = \frac{V_a + V_0}{2} \times \frac{l}{2} \quad (V=0 \text{ inntreffer når } x_0 = a_1 = \frac{l}{2})$$

$$M_{felt} = \frac{V_a \times X_0}{2} \quad (V=0 \text{ inntreffer når } X_0 < a_1 = \frac{l}{2})$$



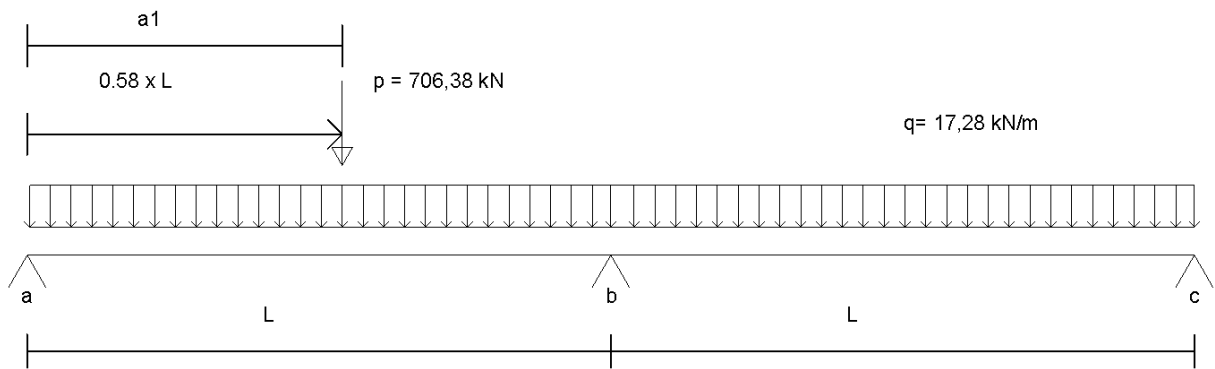
Case 3 - 3 spenn – Feltmoment og støttemoment



Beregning av støttemoment(M_b) ved opplegg B

3.momentligningen for å finne støttemoment

Ligning for felt AB og BC:



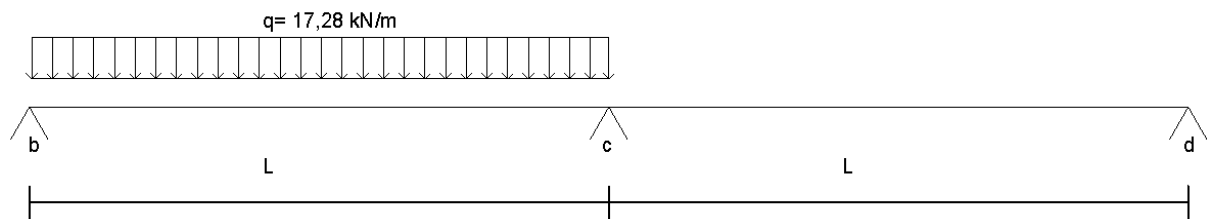
$$2 M_b \times (L_1 + L_2) + M_c \times (L_2) = 2 \times \frac{q}{4} \times l^3 + l^2 \times p \times \left(\frac{a_1}{L_1} - \left(\frac{a_1}{L_1} \right)^3 \right)$$

$$L_1 = L_2 = L$$

$$4 M_b + M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 4 M_b$$

Ligning for felt BC og CD:



$$4 M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

$$4 M_c = 2 \times q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 16 M_b$$

$$M_b = \frac{q}{4} \times l^2 - 4 M_c = \frac{q}{4} \times l^2 - 2 \times q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) + 16 M_b$$

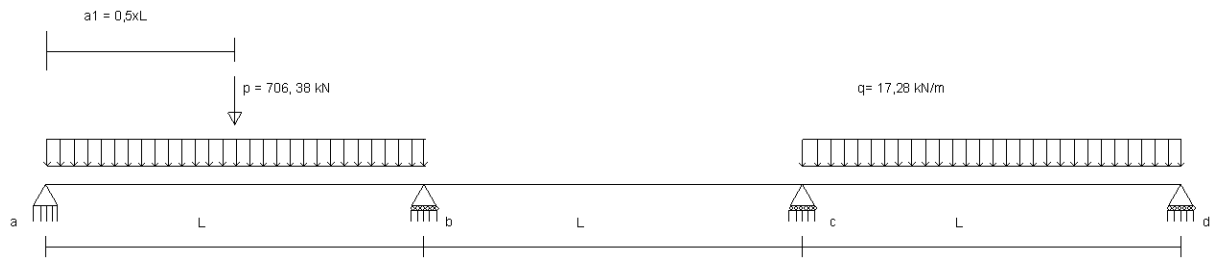
$$M_b = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right)$$

$$\text{Max} \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) = 0,385 \text{ når } a_1 = 0,58 \times l$$

$$M_{\text{støtteB}} = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{77}{750} l \times p$$



Beregner feltmoment

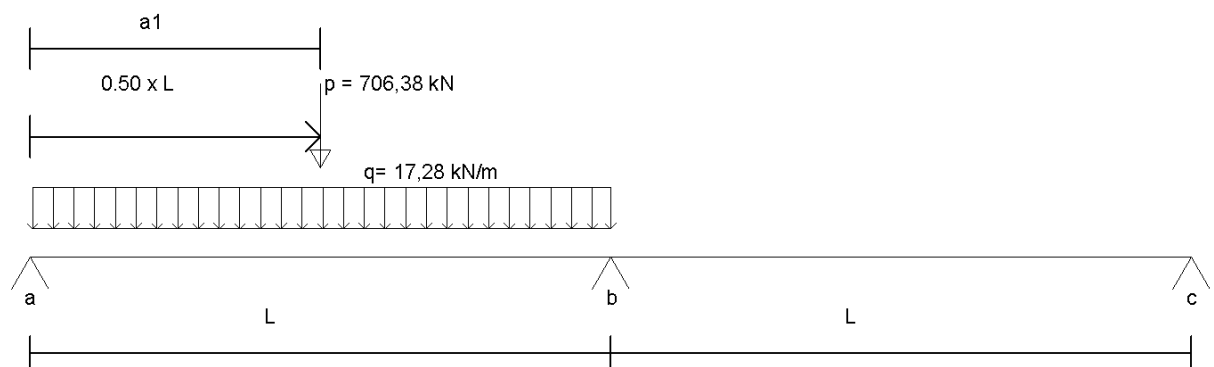


$$L_1=L_2=L$$

Først finner vi støttemoment:

3.Momentligningen

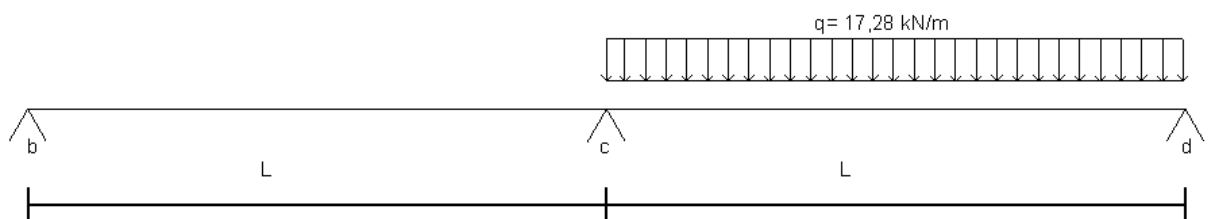
Felt AC og BC:



$$4 M_b + M_c = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 4 M_b$$

Felt BC og CD:



$$4 M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

$$4 M_c = q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 16 M_b$$

$$M_b = \frac{q}{4} \times l^2 - q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) + 16 M_b$$

$$\left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) = 0,375 \text{ når } a_1 = 0,5 \times L$$

$$M_{støtteb} = \frac{q}{20} \times l^2 + \frac{1}{10} \times l \times p$$

Bruker skjærkreftene til å finne moment



$$V_b = \frac{\left(M_{støtteb} + \frac{q \times l^2}{2} + p \times \frac{l}{2}\right)}{l}$$

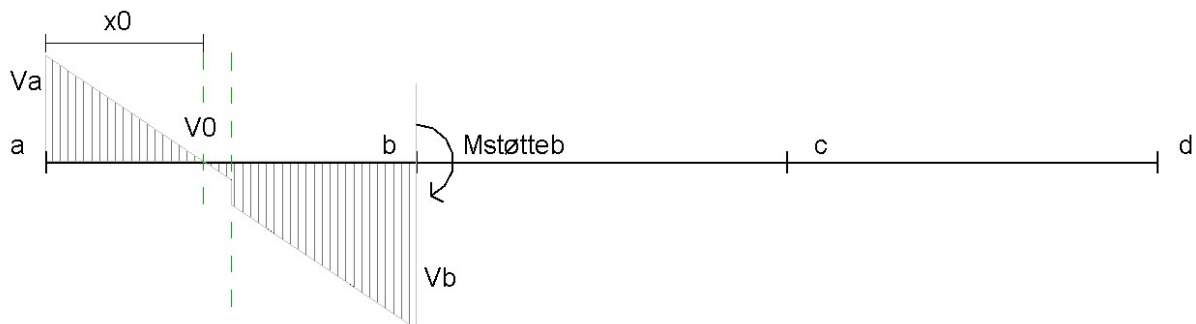
$$V_a = q \times l + p - V_b$$

$$V_1^+ = V_a - q \times \frac{l}{2}$$

$$V_1^- = V_1^+ - p$$

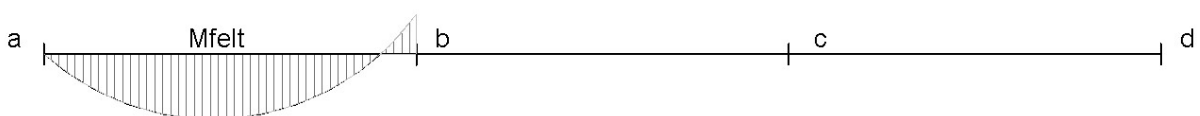
$$M_{felt} = \frac{(V_a + V_1^+)}{2} \times \frac{l}{2}$$

Når(hvis) $V=0$ før $L/2$ (ved punktlast)



$$X_0 = \frac{V_a}{q}$$

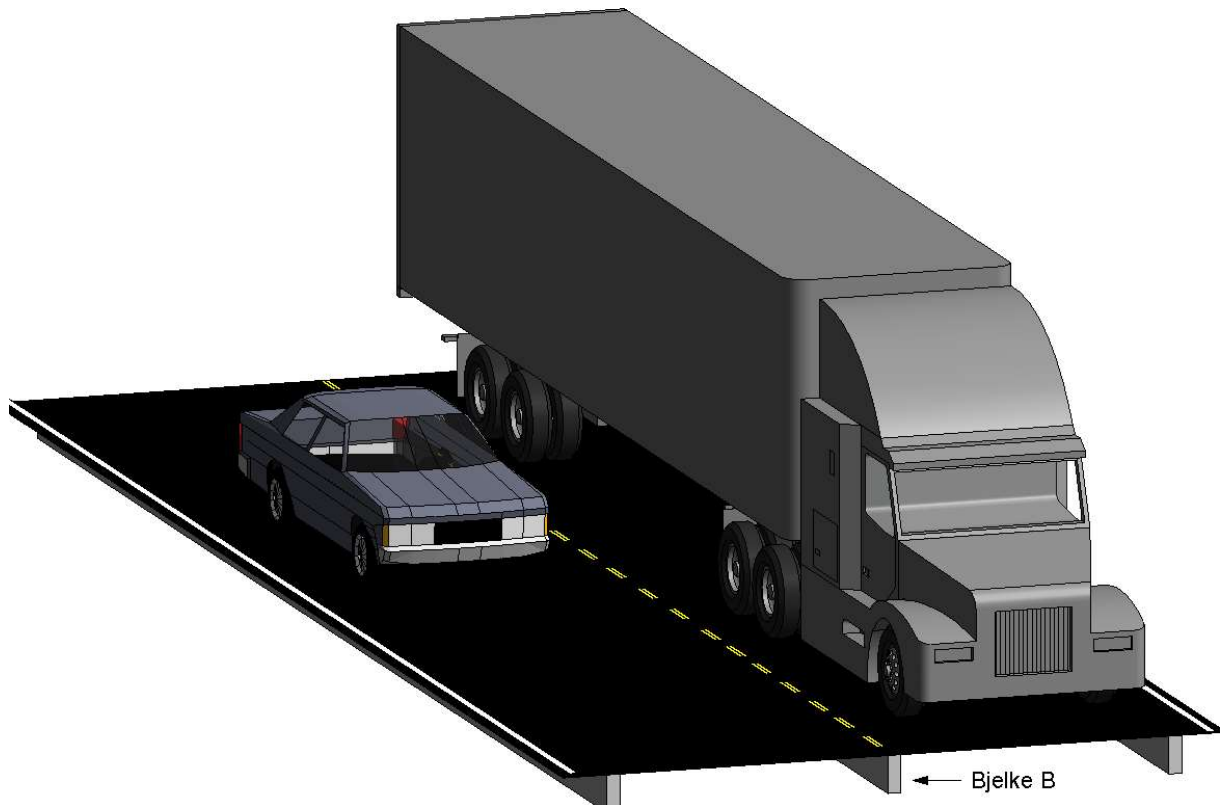
$$M_{felt} = \frac{V_a \times X_0}{2}$$



LM3, åpent for annen trafikk.

Kjøretøyene i modell er kun til visuell hjelp for å skille mellom de forskjellige lastmodulene.

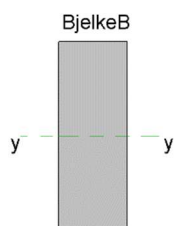
LM3 last er i dette tilfellet plassert i felt 1 og LM1 plassert i felt 2. LM1 lasten som er brukt er den samme lasten som brukes i felt nummer 2 ved tilfellet der hele tverrsnittet er en LM1 beregning.



Forenkler tverrsnittet for bjelkebroen i beregningen, og plasserer sidebjelker (a og c) ut til ende av plate og bjelke b plasseres i midten.

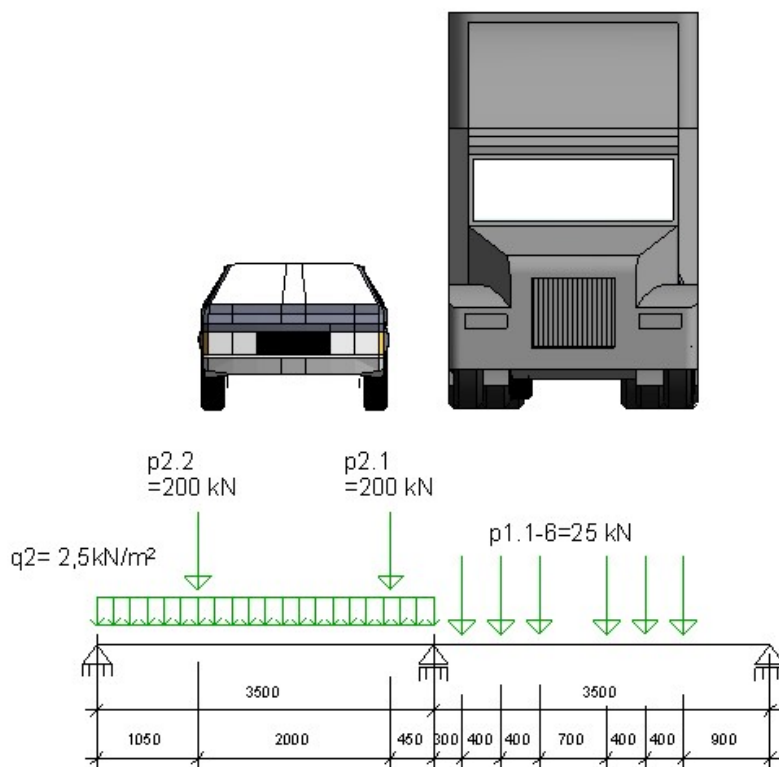
Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på bjelke B. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y-aksen på bjelke som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene.

Forenklet tverrsnitt for håndberegning.

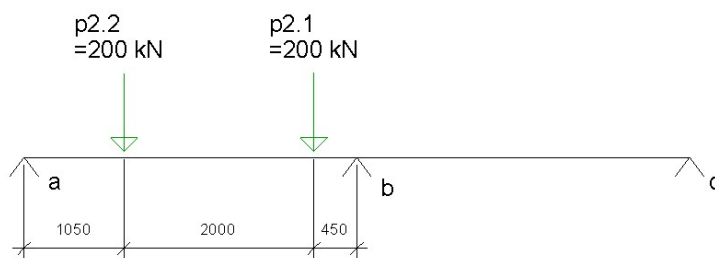


Lastfordeling i bredderetning

Beregner lastpåvirkning på bjelke B.



Finne punktlasten $P_{\text{felt}2}$ i felt 2 (venstre felt sett ovenfor) som virker i et punkt langs bjelke b.



Finne $P_{\text{felt}2}$

$$4M_b = l \times p \times \text{sum}\left(\left(\frac{a_x}{l}\right) - \left(\frac{a_x}{l}\right)^3 \dots \text{antall ledd}\right)$$

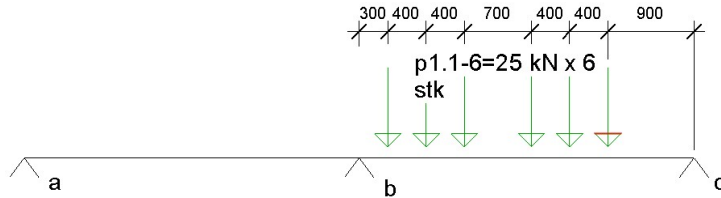
$$M_b = \frac{1}{4} \times l \times p \times \left(\left(\left(\frac{1,05}{3,5} \right) - \left(\frac{1,05}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{3,05}{3,5} \right) - \left(\frac{3,05}{3,5} \right)^3 \right) \right) = 84,47 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{M_b + p_{200} \times (1,05 + 3,05)}{l} = 258,42 \text{ kN} \quad A_y = V_a = P_{200} \times 2 \text{ stk} - V_b = 141,58 \text{ kN}$$

$$\sum M_c = 0 = -A_y \times 2l - B_y \times l + p_{200} \times (0,45 + l + 2,45 + l).$$

$$B_y = 282,55 \text{ kN} = P_{felt2}$$

Finner boggilasten P_{boggi} i felt 1 (Høyre felt sett ovenfor) som virker langs bjelke b.



Finne P_{boggi}

$$4M_b = l \times p_{boggi} \times \text{sum}\left(\left(\frac{ax}{l} - \left(\frac{ax}{l}\right)^3 \dots \text{antall ledd}\right)\right)$$

$$M_b = \frac{1}{4} \times l \times p_{boggi} \times \left(\left(\left(\frac{0,9}{3,5} - \left(\frac{0,9}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{1,3}{3,5} - \left(\frac{1,3}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{1,7}{3,5} - \left(\frac{1,7}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{2,4}{3,5} - \left(\frac{2,4}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{2,8}{3,5} - \left(\frac{2,8}{3,5} \right)^3 \right) + \left(\left(\frac{3,2}{3,5} - \left(\frac{3,2}{3,5} \right)^3 \right) \right) \right) \right) \right) = 10,81 \text{ kNm}$$

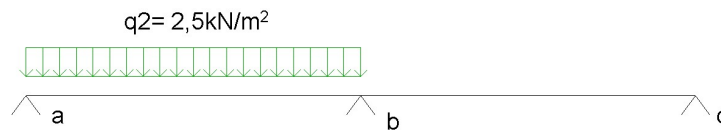
$$V_b = \frac{Mb + P}{l} = \frac{(0,9 + 1,3 + 1,7 + 2,4 + 2,8 + 3,2)}{3,5} = 90,946 \text{ kN} \quad C_y = V_c = P_b \times 6 \text{ stk} - V_b =$$

$$59,05 \text{ kN}$$

$$\sum M_a = 0 = -C_y \times 2l - B_y \times l + p_b \times (l + 0,3 + l + 0,7 + l + 1,1 + l + 1,8 + l + 2,2 + l + 2,6).$$

$$B_y = 94,04 \text{ kN} = P_{boggi}$$

Finner q_{felt2} som virker langs bjelke b.



Finne q_{felt2}

$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

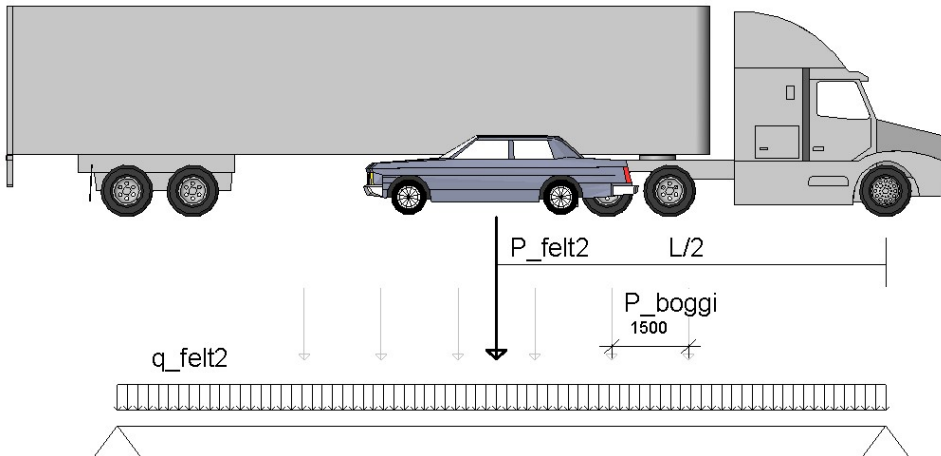
$$M_b = \frac{q}{16} \times l^2 = 1,914 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{M_b + \frac{q \times l^2}{2}}{l} = 4,92 \text{ kN} \quad A_y = V_a = q \times l - V_b = 3,83 \text{ kN}$$

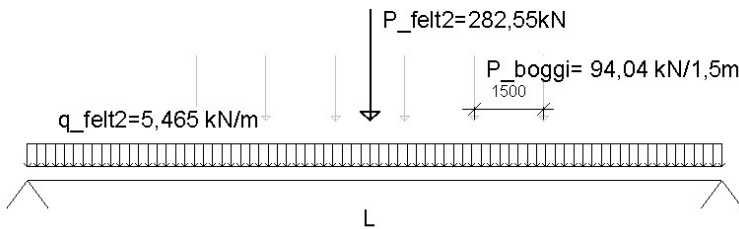
$$\sum M_c = 0 = -A_y \times 2 \times l - B_y \times l + q \times l \times \left(l + \frac{l}{2} \right).$$

$$B_y = 5,465 \text{ kN} = q_{felt2} = 5,465 \text{ kN/m}$$

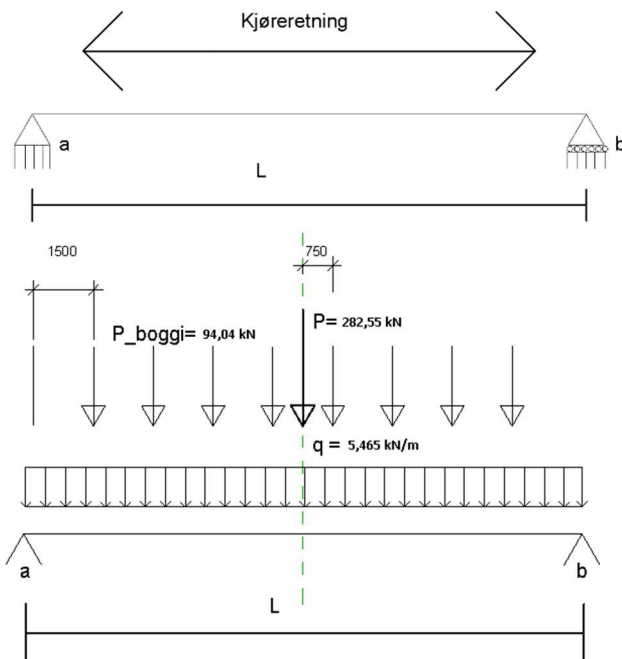
Lastpåvirkning i lengderetning på bjelke B



Laster i lengderetning bro på midtbjelke, ved LM3 i felt 1, og åpent for LM1 i felt 2.



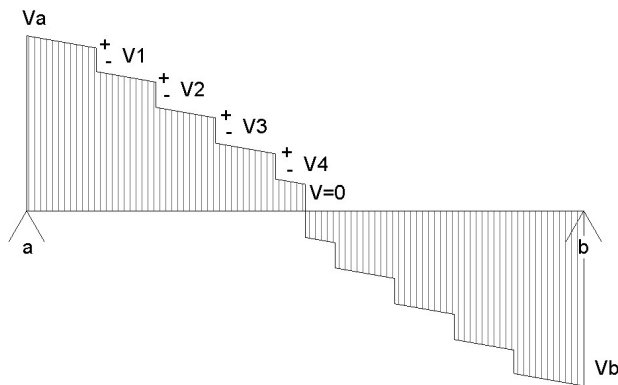
Case1: 1 spenn- Kun feltmoment



Sentrisk plassert => $a_y = b_y = V_a = V_b$

$n = \text{antall boggilaster}$

$$\sum Fy = a_y + b_y - p - p_b \times n_b - q \times l \Rightarrow V_a = \frac{p + p_b \times n_b + q \times l}{2}$$



$$V_{1+} = V_a - q \times l_{v_a-v_1}$$

$$V_{1-} = V_{1+} - p_b$$

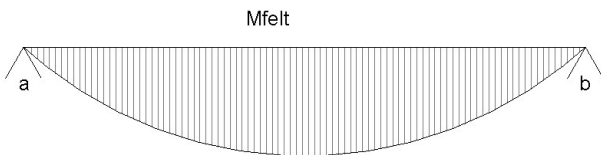
$$V_{2+} = V_{1-} - q \times l_{v_1-v_2}$$

$$V_{2-} = V_{2+} - p_b$$

$$V_{x(+)} = V_{x-1(-)} - q \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

$$V_{x(-)} = V_{x+} - p_b$$

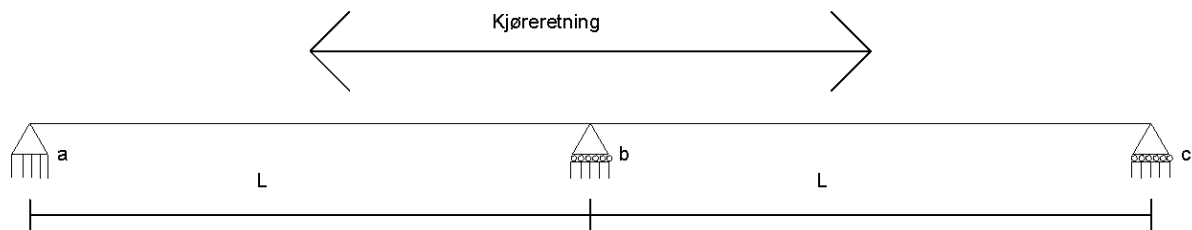
Regner V_x til $V=0$



$$M_{felt} = \frac{V_a + V_{1+}}{2} \times l_{v_a-v_1} +$$

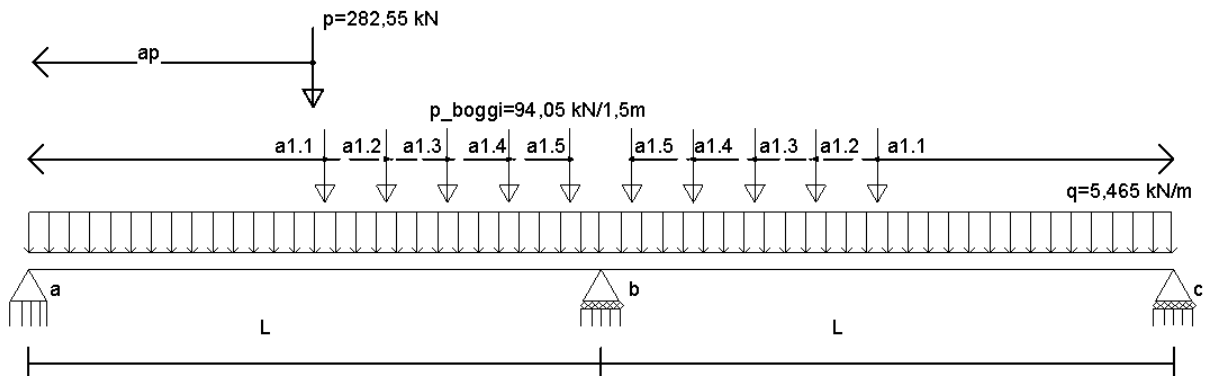
$$\sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

Case 2: 2 like spenn - Feltmoment og støttemoment.



Finne største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.

Støttemoment, boggi last plassert over opplegg B:



3.momentligningen, finne støttemoment B

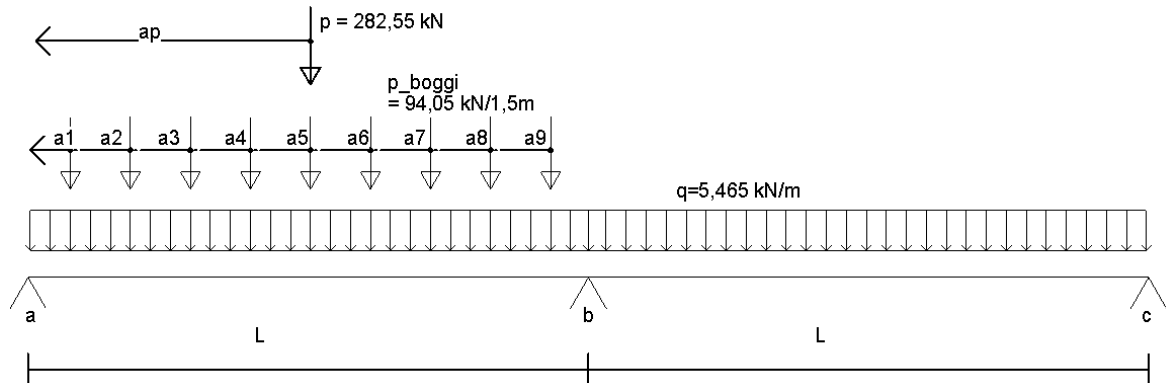
$$M_a = M_c = 0$$

$$a_p = 0,58 \times l$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times \frac{q}{4} \times l^2 + 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{8} \times l^2 + \frac{1}{2} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

Støttemoment, boggi last plassert midt i felt AB:



3.momentligningen, finne støttemoment B

$$M_a = M_c = 0$$

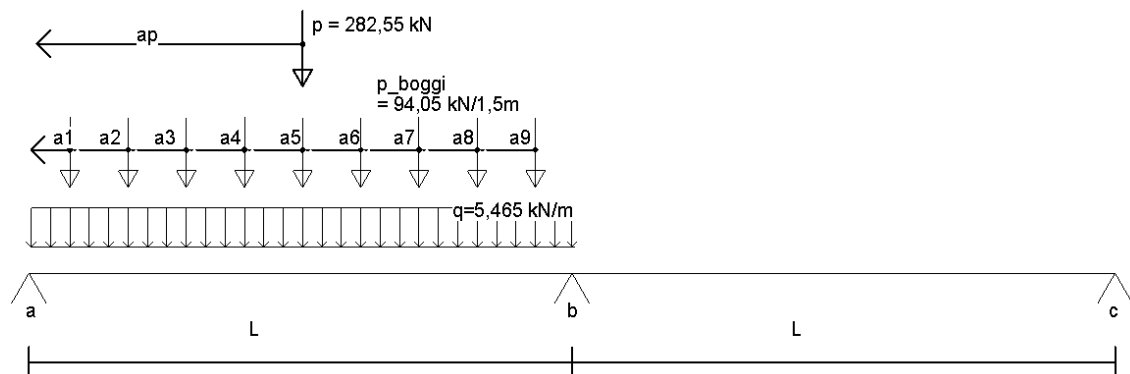
$$a_p = 0,58 \times l$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{8} \times l^2 + \frac{1}{4} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

Finne det største feltmoment

Feltmoment, boggi og jevnt fordelt last midtplassert i felt AB:



$$M_a = M_c = 0$$

$$a_p = 0,5 \times l$$

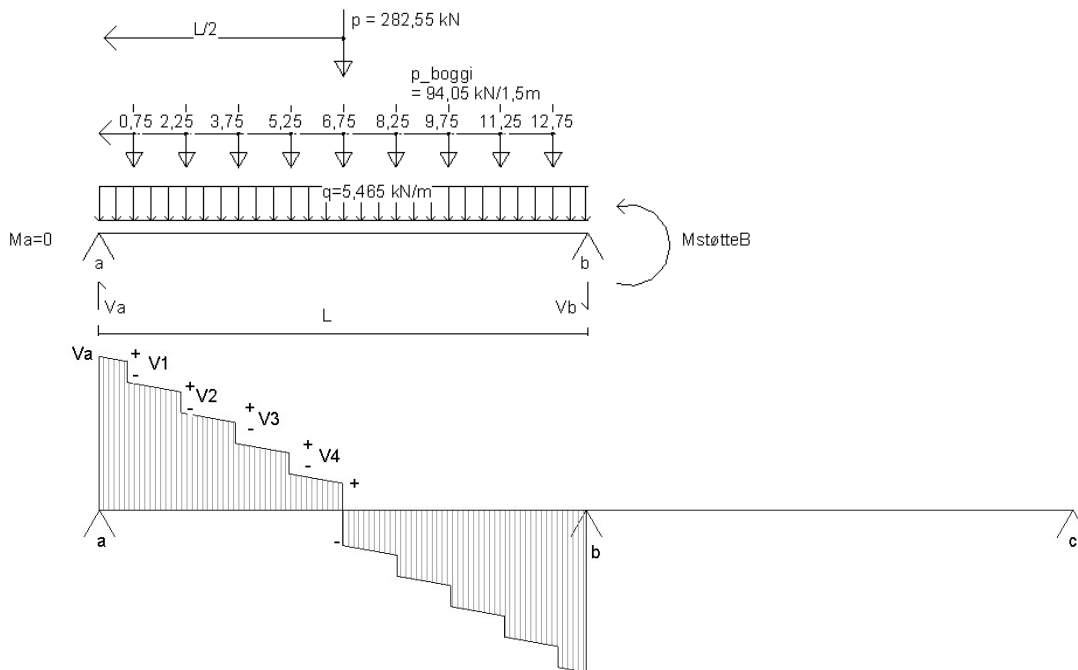
$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{16} \times l^2 + \frac{1}{4} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

Finner V_b ved å bruke M_b

$$V_b = \frac{M_b + p \times \frac{l}{2} + p_b \times \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n) + \frac{q \times l^2}{2}}{l}$$

$$V_a = q \times l + p + p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b$$



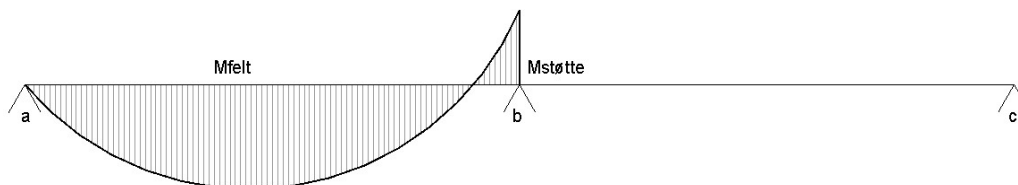
$$V_{1+} =$$

$$V_a - q \times l_{Va-v1} \quad V_{1-} = V_{1+} - p_b$$

$$V_{2+} = V_{1-} - q \times l_{V1-v2} \quad V_{2-} = V_{2+} - p_b$$

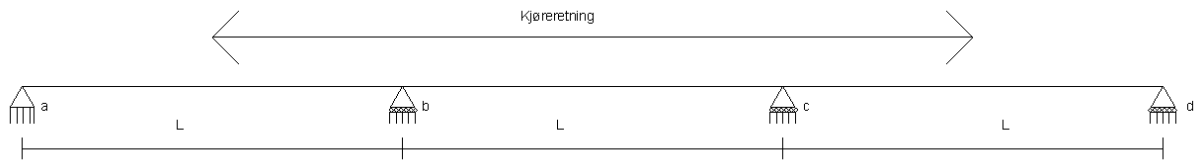
$$V_{x(+)} = V_{x-1(-)} - q \times l_{v(x)-v(x-1)} \quad V_{x(-)} = V_{x+} - p_b$$

Regner V_x til $V=0$



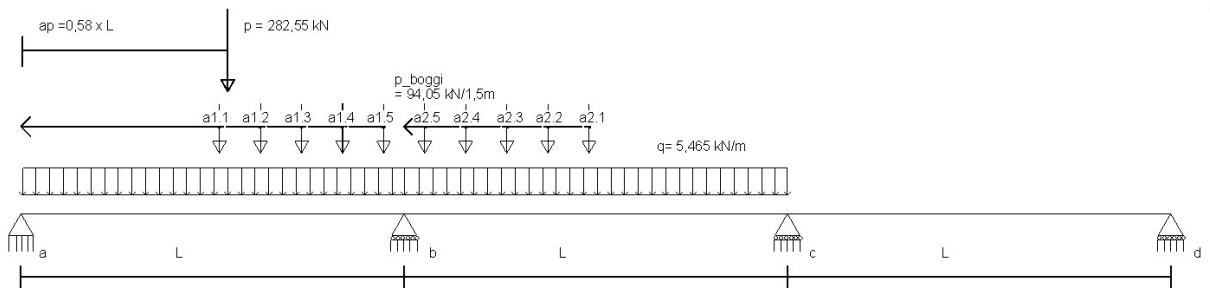
$$M_{felt} = \frac{V_a + V_{1+}}{2} \times l_{Va-v1} + \sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

Case 3: 3 like spenn -Feltmoment og støttemoment.



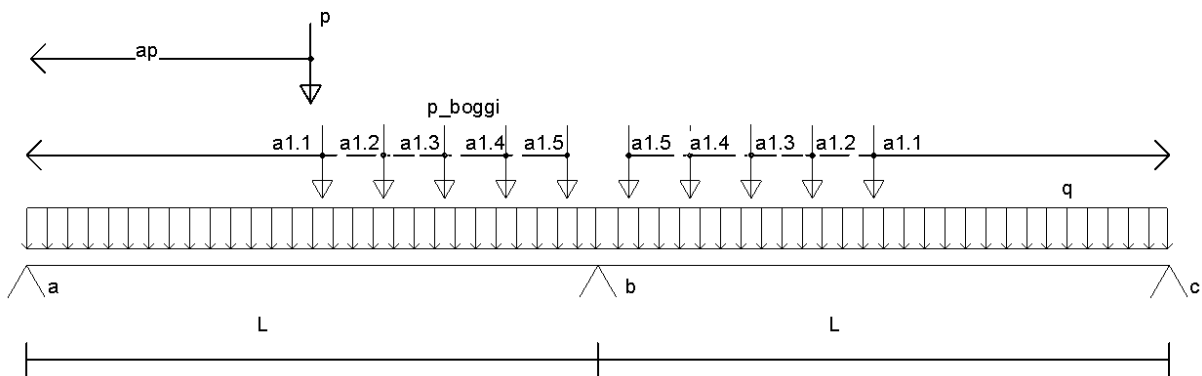
Beregn støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.

Støttemoment, boggi last plassert over opplegg B:



3.momentligningen, finne støttemoment B

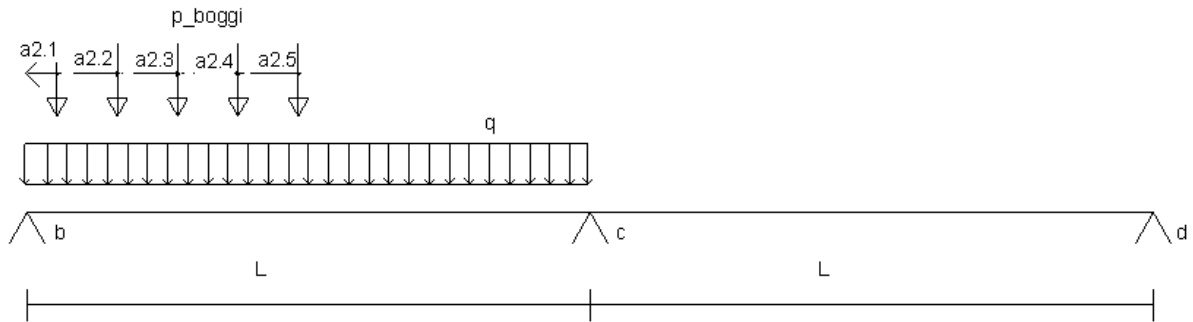
Ligning felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = 2stk \times \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 2 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 4M_b$$

Ligning felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

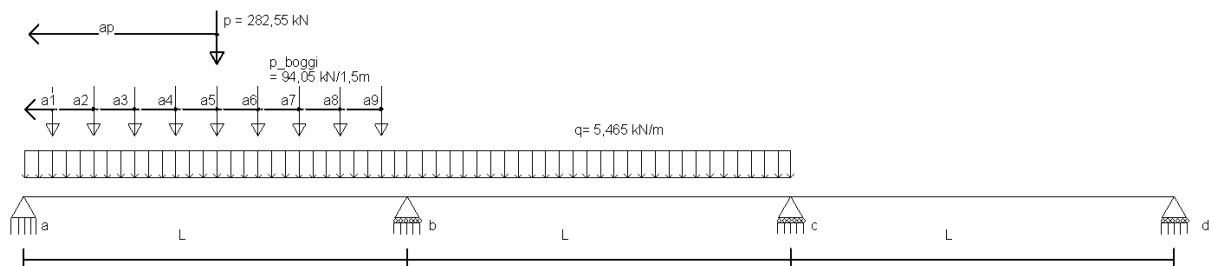
Løser ligningssett for å finne M_b (støttemoment ved opplegg B)

$$4M_c = 2 \times q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 16M_b$$

$$M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right) - 2q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) - 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + 16M_b$$

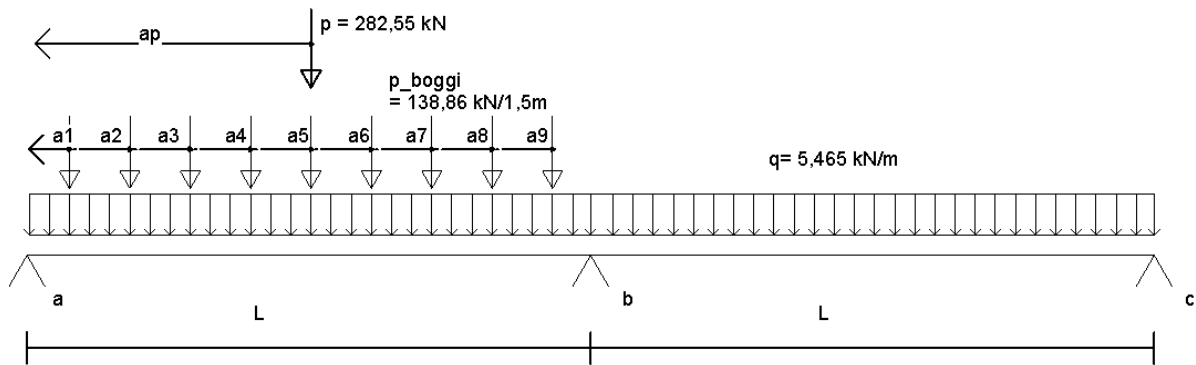
$$M_b = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + \frac{8}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - \frac{1}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

Støttemoment, boggilast midtplassert i felt AB:



3.momentligningen, finne støttemoment M_B

Felt AB og BC:



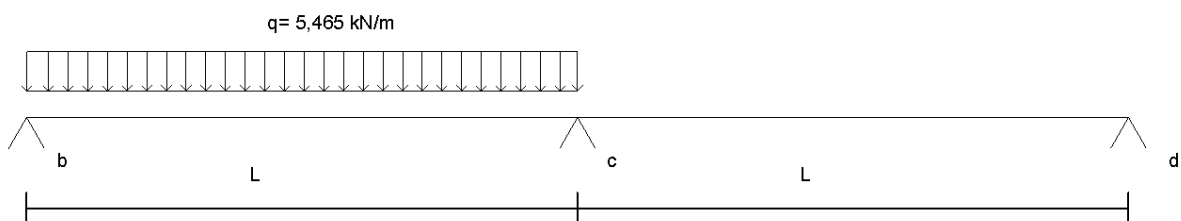
$$4M_b + M_c = 2 \text{ stk} \times \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_3}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 4M_b$$

Felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

Løser ligningssett for å finne M_b (støttemoment opplegg B):

$$4M_c = 2 \times q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 4 \times l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 16 \times M_b$$

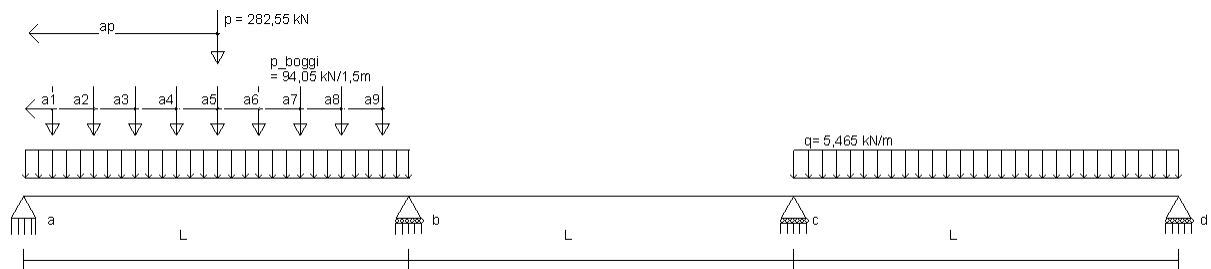
$$M_b = -4M_c + \frac{q}{4} \times l^2 = -1,75 \times q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) - 4 \times l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) + 16 \times M_b$$

$$M_{\text{støtteb}} = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + \frac{4}{15} \times l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

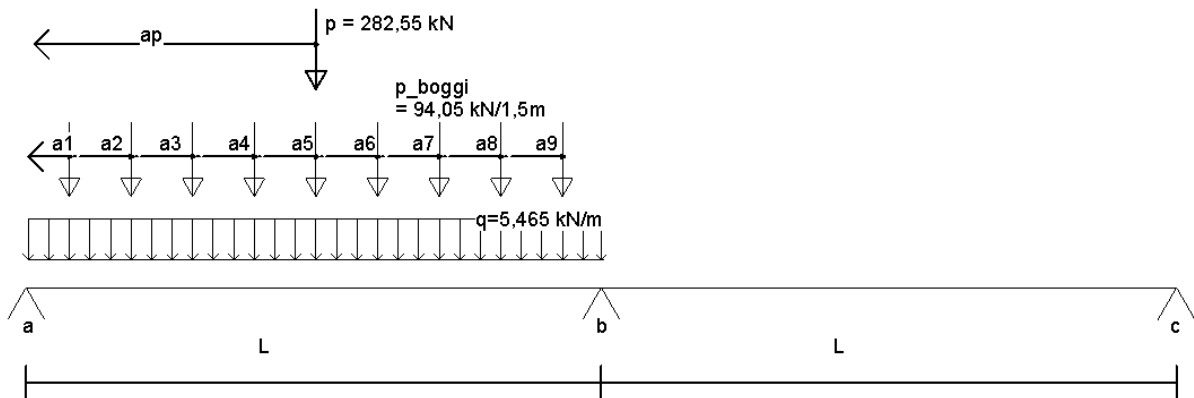
Beregner største feltmoment.



Først finne Støttemoment Mb om opplegg B:

3.momentligningen

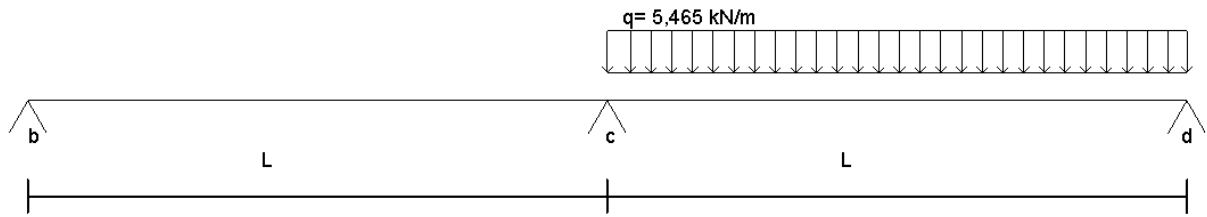
Felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

Felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

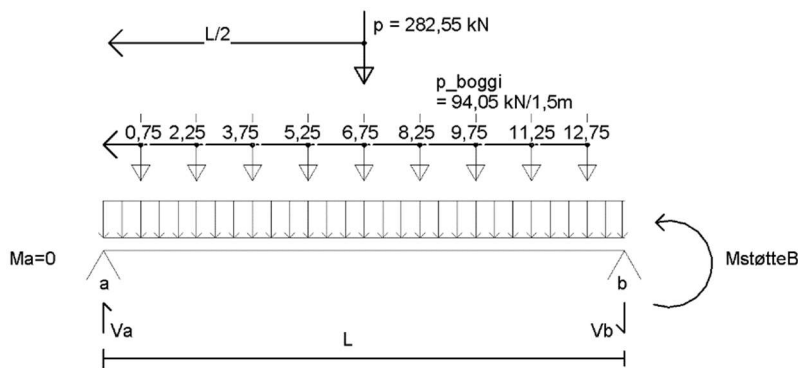
Løser så ligningssett:

$$M_{bstøtte} = \frac{q}{4} \times l^2 - 4M_c = \frac{q}{4} \times l^2 - q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) -$$

$$4 \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 16Mb.$$

$$M_{bstøtte} = \frac{1}{20} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + \frac{4}{15} \times l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right).$$



$$V_b = \frac{Mb + p \times \frac{l}{2} + p_b \times \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n) + \frac{q \times l^2}{2}}{l}$$

$$V_a = q \times l + p + p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b.$$



$$V_{1+} = V_a - q \times l_{va-v1} \quad V_{1-} = V_{1+} - p_b$$

$$V_{2+} = V_{1-} - q \times l_{v1-v2} \quad V_{2-} = V_{2+} - p_b$$

$$V_{x(+)} = V_{x-1(-)} - q \times l_{v(x)-v(x-1)} \quad V_{x(-)} = V_{x+} - p_b$$

Regner V_x til $V=0$

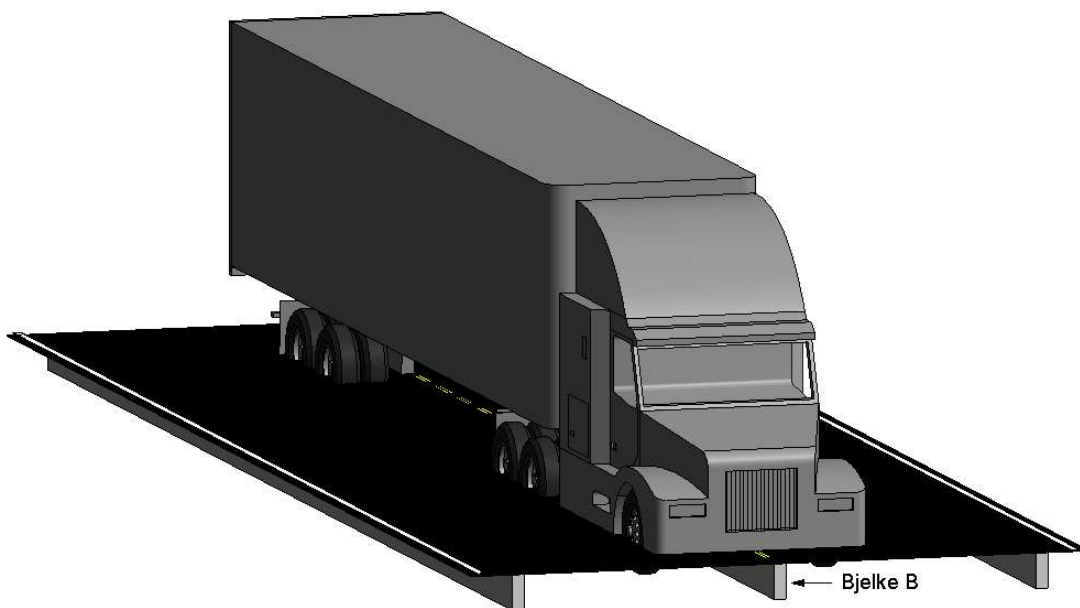


$$M_{felt} = \frac{V_a + V_{1+}}{2} \times l_{v_a-v_1} + \sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

LM3, stengt for annen trafikk.

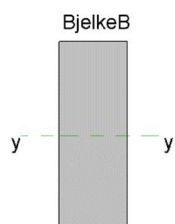
Kjøretøyene i modell er kun til visuell hjelp for å skille mellom de forskjellige lastmodulene.

LM3 last er i dette tilfellet midtplassert på bro i bredderetning.



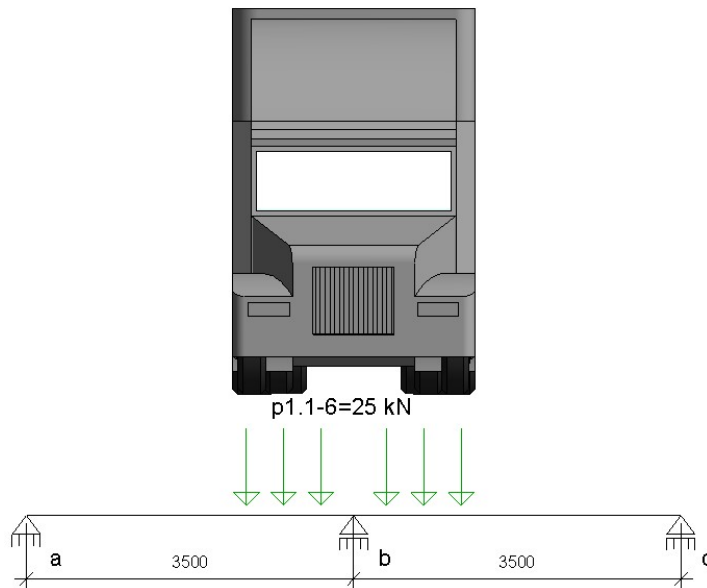
Forenkler tverrsnittet for bjelkebroen i beregningen, og plasserer sidebjelker (a og c) ut til ende av plate og bjelke b plasseres i midten.

Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på bjelke B. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y-aksen på bjelke som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene.

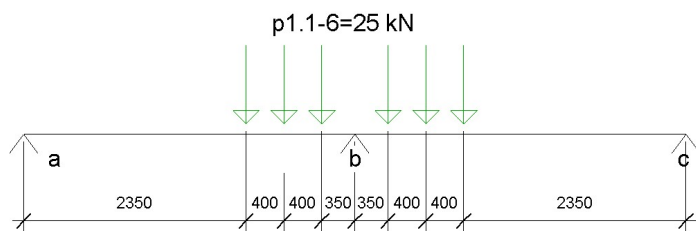


LM3 2 felt, midtplassert på bro i bredderetning (LM1 felt 2)

Finne laster i lengderetning på bjelke B



Finne p_{boggi} i lengderetning langs bjelke b.



$$4M_b = l \times p_b \times \left(\text{sum} \left(\frac{a_x}{l} - \left(\frac{a_x}{l} \right)^3 \right) \dots \text{antall ledd} \right)$$

$$M_b = \frac{1}{4} \times 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \left(\left(\frac{2,35}{3,5} \right) - \left(\frac{2,35}{3,5} \right)^3 + \left(\frac{2,75}{3,5} \right) - \left(\frac{2,75}{3,5} \right)^3 + \left(\frac{3,15}{3,5} \right) - \left(\frac{3,15}{3,5} \right)^3 \right) =$$

$$36,77 \text{ kNm}$$

$$V_b = \frac{M_{\text{støtteB}} + p_b \times (2,35 + 2,75 + 3,15)}{l} = 69,43 \text{ kN}$$

$$A_y = V_a = p_b \times 3 \text{ stk} - V_b = 5,57 \text{ kN} =$$

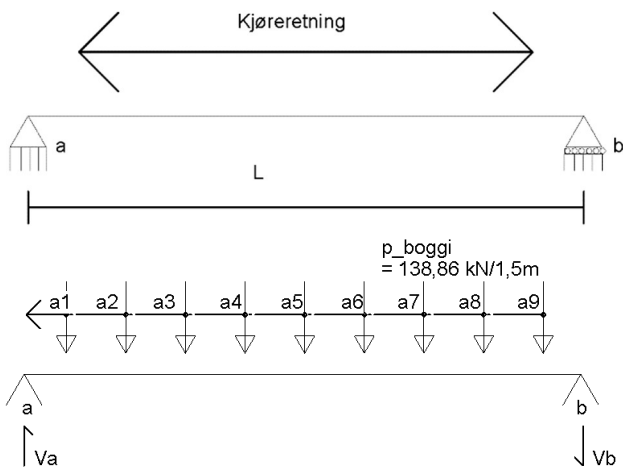
C_y

$$\sum F_y = 0 = A_y + C_y + B_y - 6 \text{ stk} \times p_b$$

$$B_y = 138,86 \text{ kN} = p_{\text{boggi}} = 138,86 \text{ kN/1,5m}$$

Case 1- 1 spenn – kun feltmoment

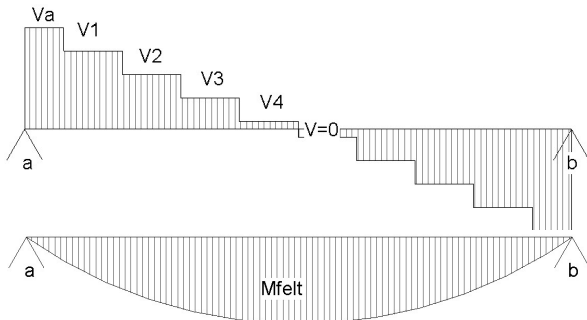
Beregner største feltmoment ved å midtplassere boggilast i felt.



Sentrisk plassert $\Rightarrow a_y = b_y = V_a = V_b$

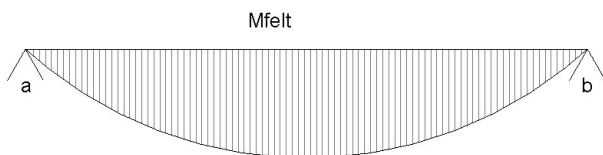
$n = \text{antall boggilaster}$

$$\sum Fy = a_y + b_y - p_b \times n_b \Rightarrow V_a = \frac{p_b \times n_b}{2}$$



$$V_1 = V_a - p_b \quad V_2 = V_1 - p_b \Rightarrow V_x = V_{x-1} - p_b$$

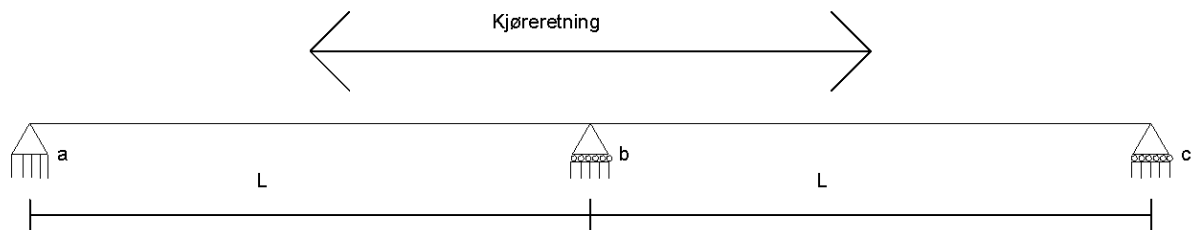
Regner V_x til $V=0$



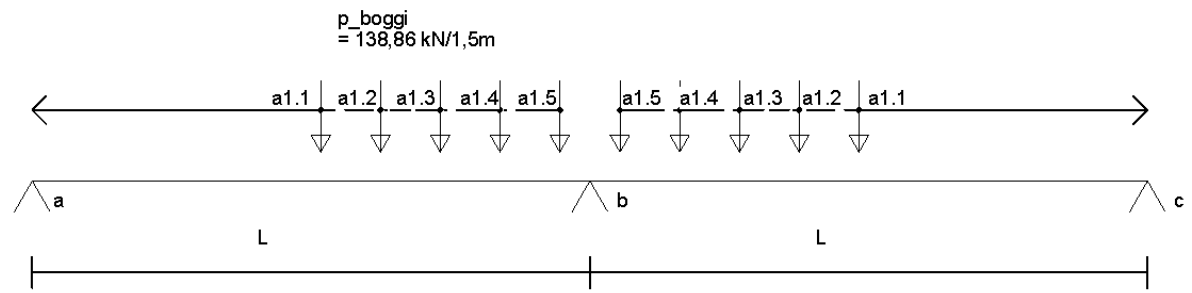
$$M_{\text{felt}} = V_a \times l_{va} + \sum V_x \times l_{vx} \quad (\text{når } V_x > 0)$$

Case 2- 2 spenn – feltmoment og støttemoment

Beregner største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.



Støttemoment, boggi last midtplassert over opplegg B:



3.momentligningen

Finner støttemoment M_B ved opplegg B.

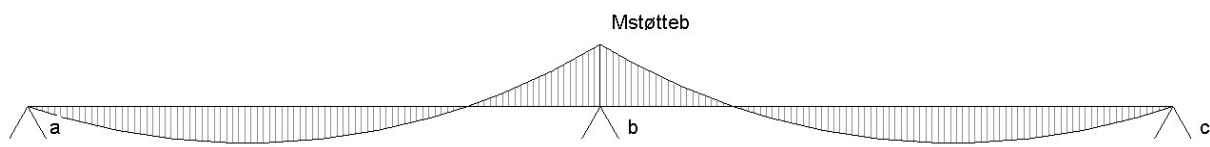
$$M_a = M_c = 0$$

$$a_{1.2} = a_{1.1} + 1,5 \text{ m (avstand boggi)}$$

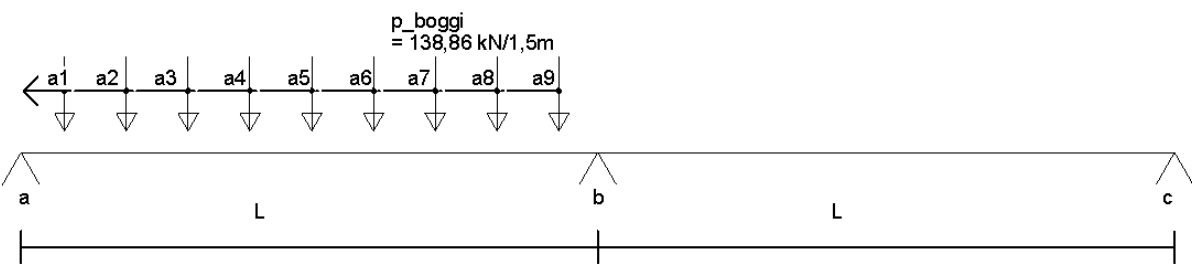
$$a_{1.x} = a_{1.x-1} + 1,5 \text{ m når } x > 1$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times p_b \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1.x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1.x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_b = \frac{p_b}{2} \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1.x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1.x}}{l} \right)^3 \right)$$



Støttemoment, boggi last midtplassert i felt AB:



3.momentligningen

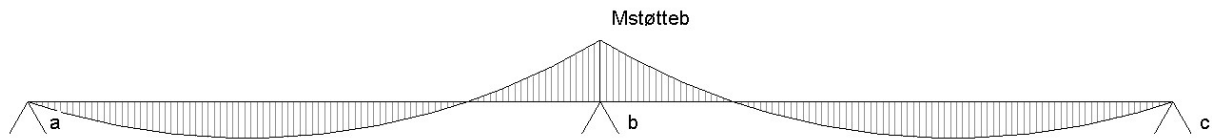
Finner støttemoment M_B ved opplegg B.

$$4M_b = p \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

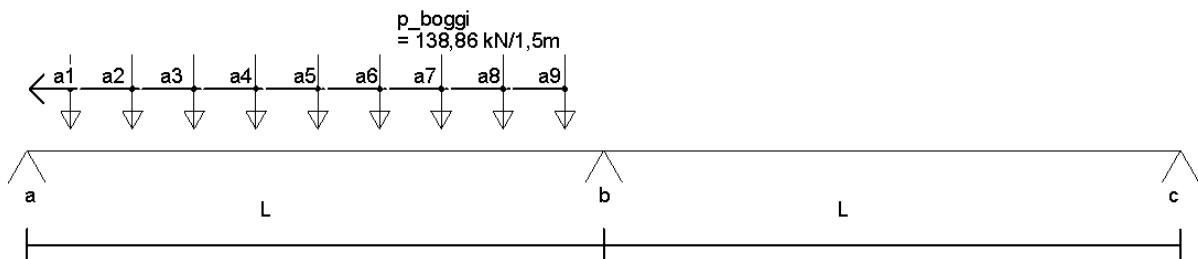
$$M_b = \frac{p}{4} \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$a_{1,2} = a_{1,1} + 1,5 \text{ m (avstand boggi)}$$

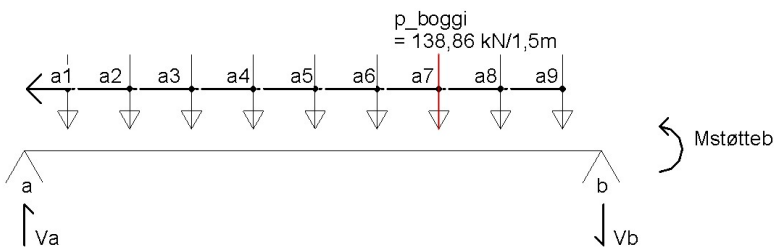
$$a_{1,x} = a_{1,x-1} + 1,5 \text{ m når } x > 1$$



Beregner feltmoment M_b ved felt AB.



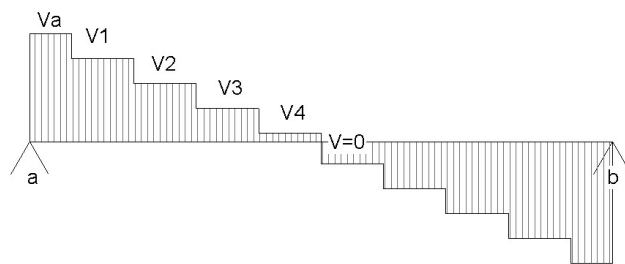
Samme lastplassering som da vi fant støttemoment B ved å midtplassere last i felt. Bruker MstøtteB til å finne feltmoment.



$$V_b = \frac{M_b + p_b \times \sum a_x}{l}$$

$$V_a = p_b \times n_b - V_b$$

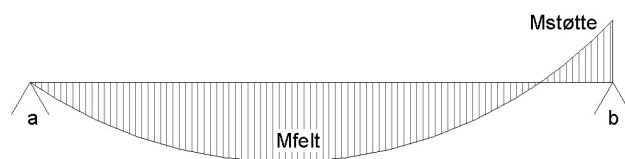
$$n_b = \text{antall boggilaster}$$



$$V_1 = V_a - p_b$$

$$V_2 = V_1 - p_b \Rightarrow$$

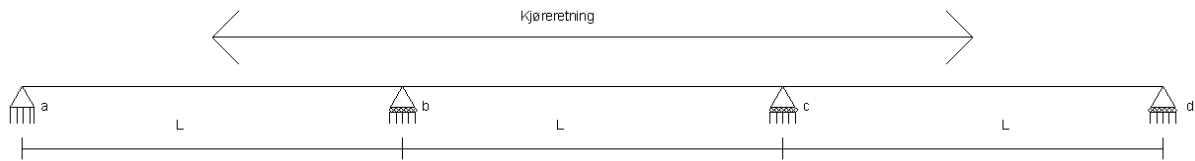
$$V_x = V_{x-1} - p_b$$



$$M_{felt} = V_a \times l_{va} + \sum V_x \times l_{vx} \text{ (når } V_x > 0)$$

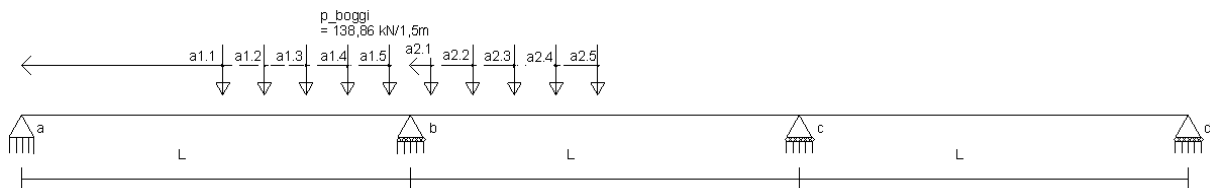
>0)

Case 3: 3 spenn – feltmoment og støttemoment



Beregner største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.

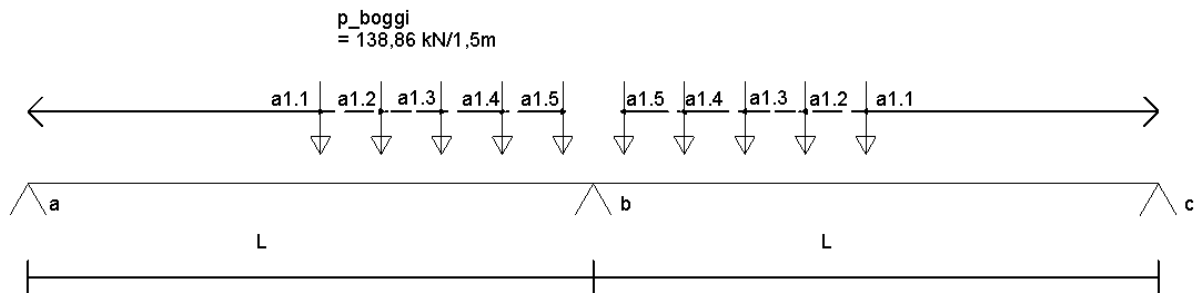
Støttemoment, boggi last plassert over opplegg B:



3.momentligningen

Finner støttemoment M_B ved opplegg B.

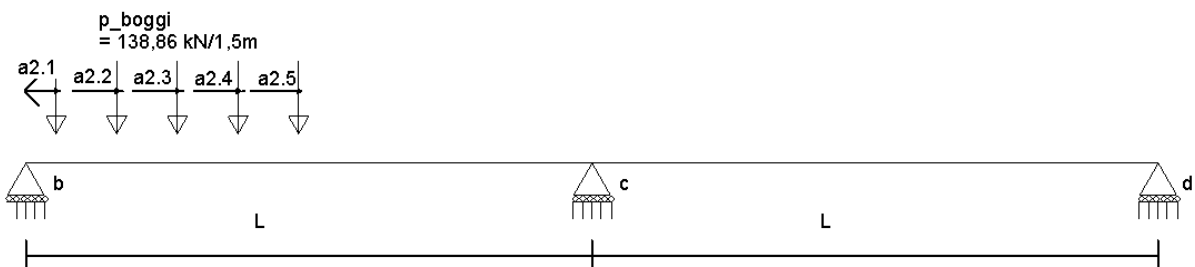
Ligning for felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_c = 2 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 4M_b$$

Ligning for felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

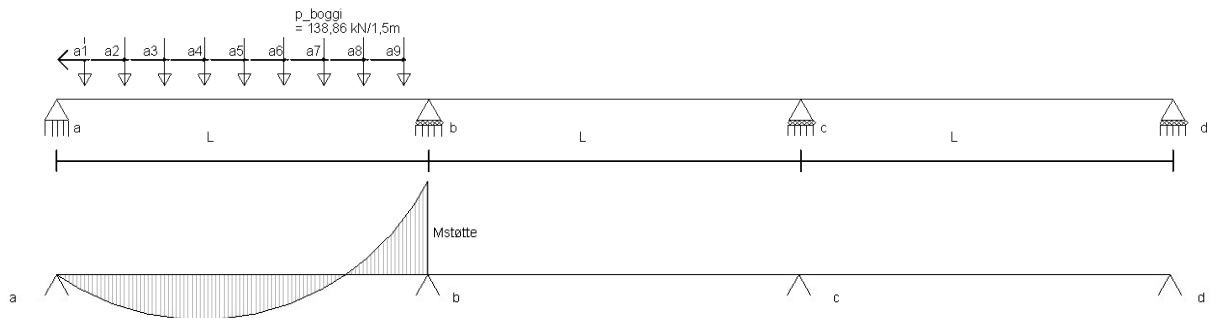
Løser ligningssett for å finne M_b (støttemoment ved opplegg B)

$$4M_c = 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 16M_b$$

$$M_b = l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right) - 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + 16M_b$$

$$M_b = \frac{8}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - \frac{1}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

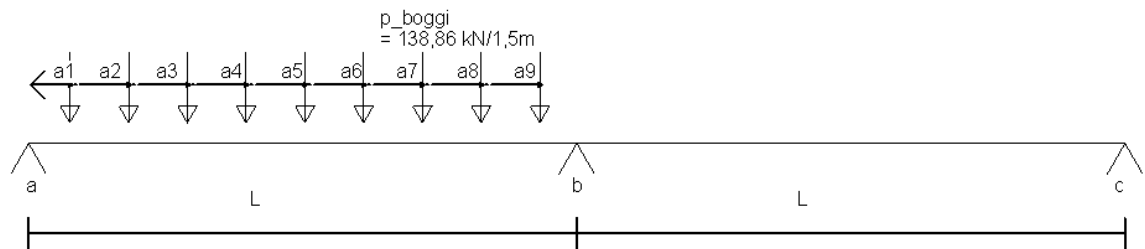
Støttemoment, boggilast plassert midt i felt AB:



3.momentligningen

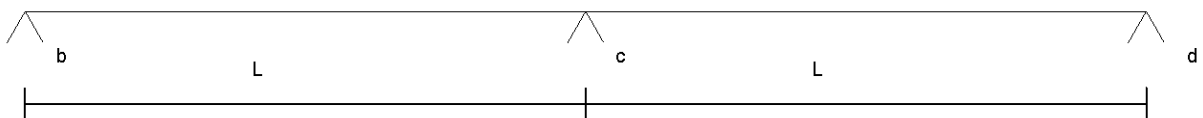
Finner støttemoment ved opplegg B.

Felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

Felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = 0$$

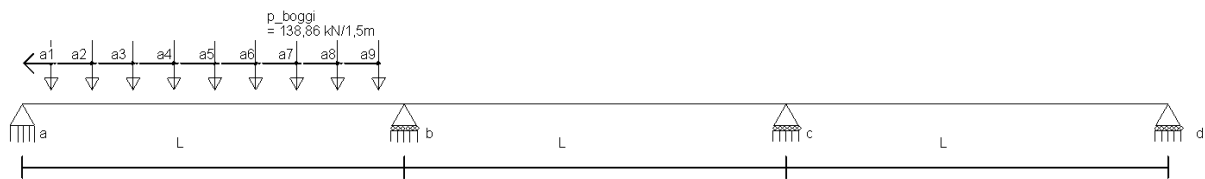
Løser ligningssett:

$$4Mc = 4 \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 16 \times Mb$$

$$Mb = -4 \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) + 16 \times Mb$$

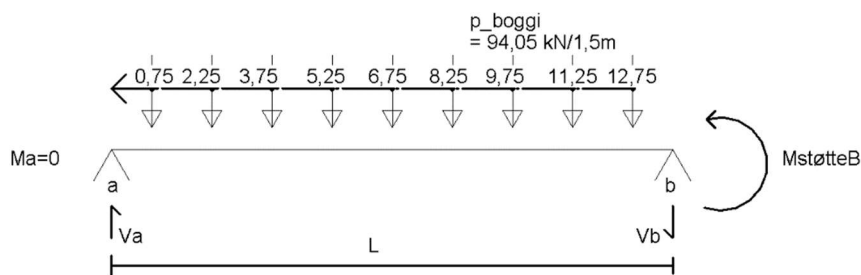
$$M_{\text{støtteb}} = \frac{4}{15} \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

Feltmoment



Ser at vi allerede har løst støttemomentet ved denne lastplasseringen.

$$M_{\text{støtteb}} = \frac{4}{15} \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$



$$V_b = \frac{Mb + \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n)}{l}$$

$$V_a = +p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b.$$



$$V_1 = V_a - p_b$$

$$V_2 = V_1 - p_b$$

$$V_x = V_{x-1} - p_b \quad V_{x(-)} = V_{x+} - p_b$$

Regner V_x til $V=0$

$a_b = 1,5m = \text{Avstand mellom boggilaster}$

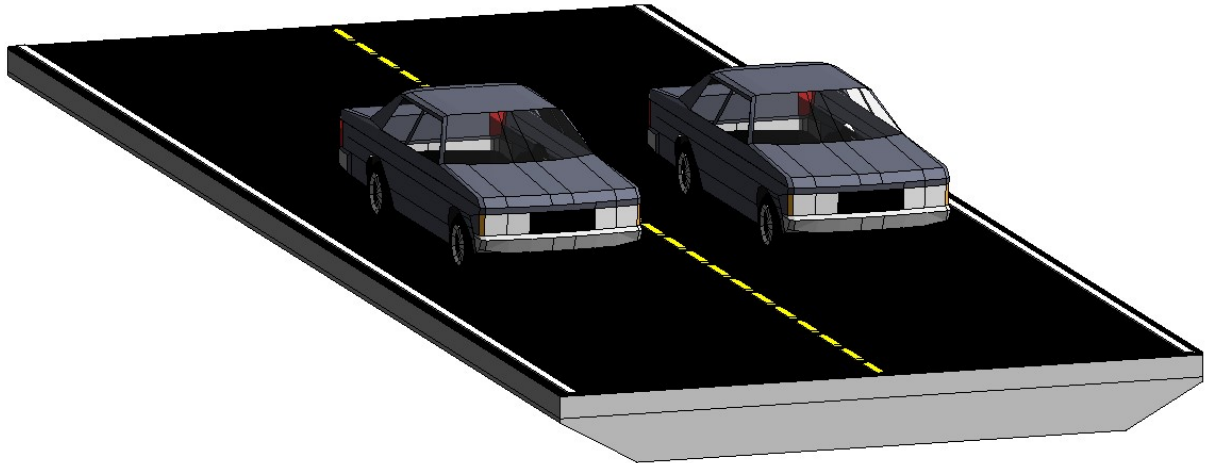


$$M_{felt} = V_a \times a_1 + \sum V_x \times a_b$$

8.2 Vedlegg B

8.2.1 Beregningsgrunnlag for platebro

LM1

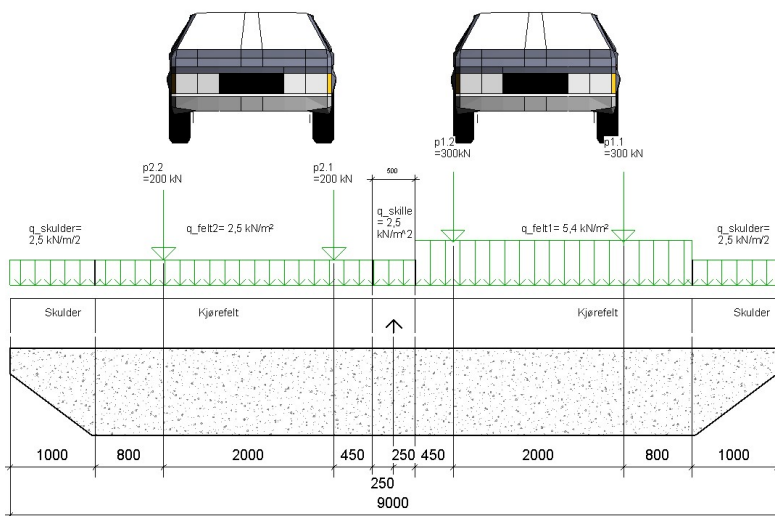


Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på platebro. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y-aksen på plate per meter bredde, som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene.



Forenklet fordeles alt av krefter i bredderetning likt i tverrsnittet.

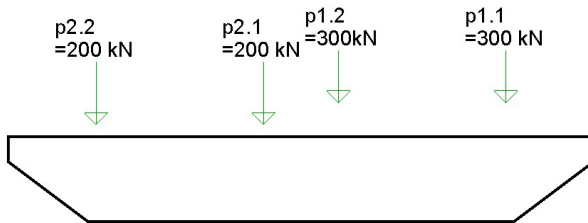
Momentet vi så regner på blir moment om y-aksen per meter bredde.



Finner punktlastens påvirkning i bredden for å lage en punktlast p som virker i et punkt i lengderetning på platebro.

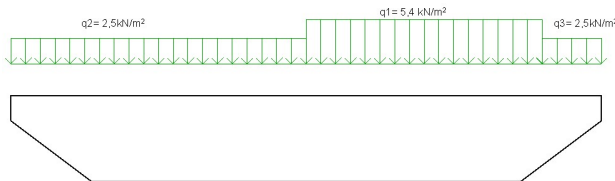
Lastfordeling i bredderetning

Beregner lastfordeling per m bredde.



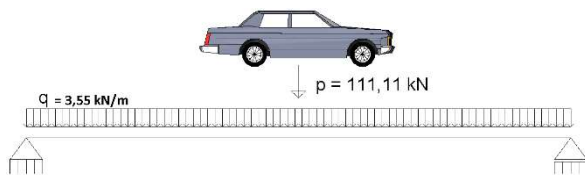
$$p = \frac{200 \text{ kN} \times 2 \text{ stk} + 300 \text{ kN} \times 2 \text{ stk}}{9 \text{ m}} = 111,11 \text{ kN}$$

Finner den jevnt fordelte lasten sin påvirkning i bredden for å lage en q last som virker jevnt fordelt i lengderetning på platebro.



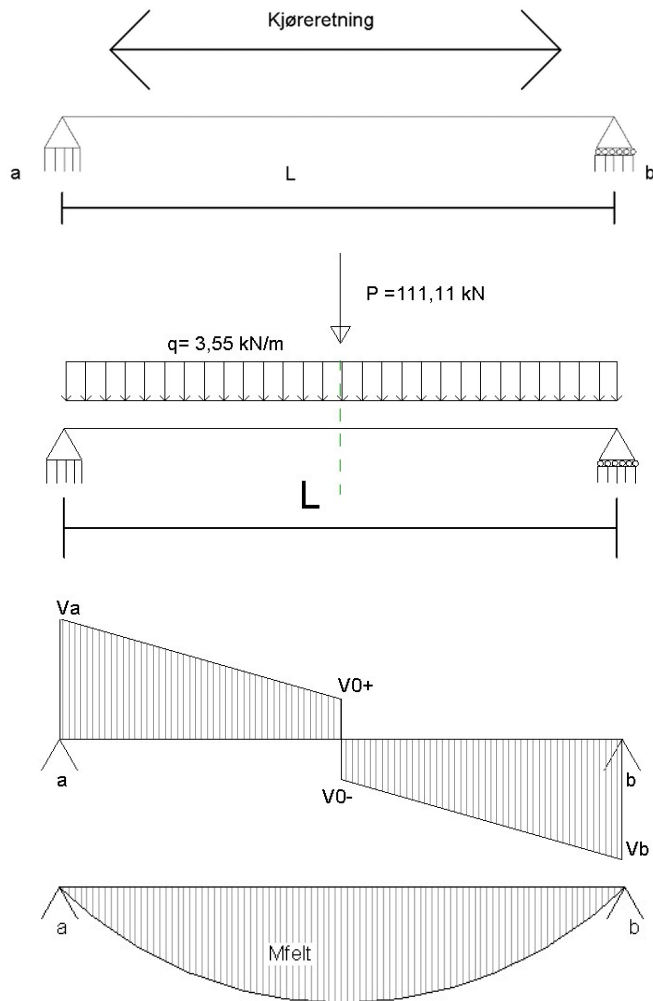
$$q = \frac{2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 4,75 \text{ m} + 5,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 3,25 \text{ m} + 2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 1 \text{ m}}{9 \text{ m}} = 3,55 \text{ kN/m}$$

Lastpåvirkning i lengderetning LM1 på platebro



Case 1-1 spenn - Feltmoment

Beregner største felt moment:



$$M_a = M_b = 0$$

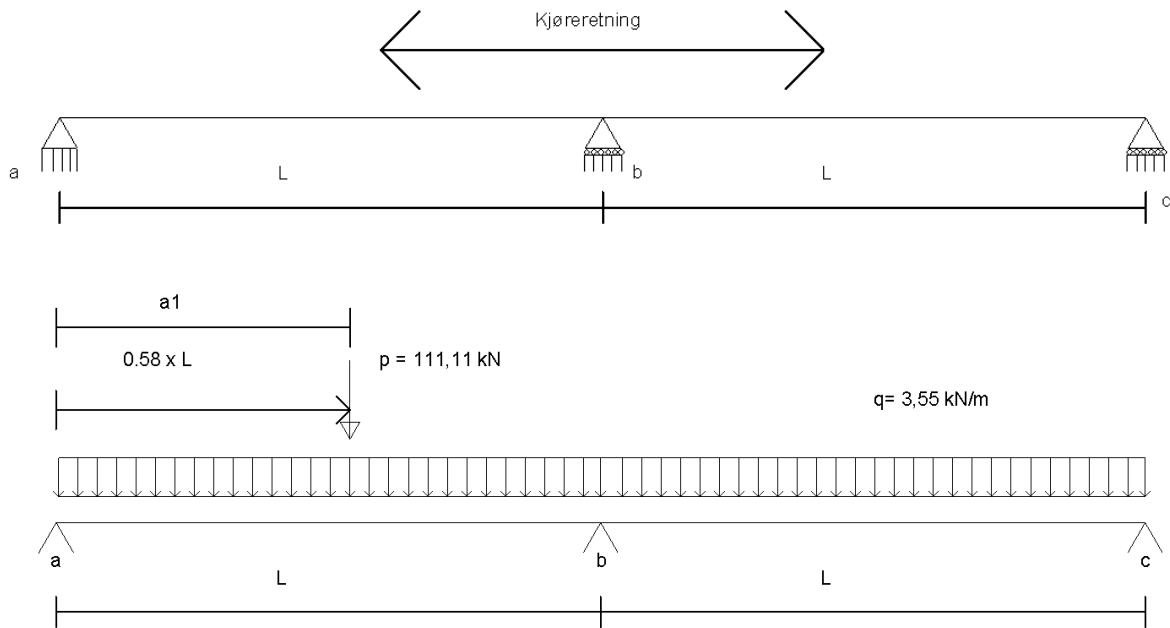
$$V_a = V_b = \frac{p+q \times l}{2}$$

$$V_0^+ = V_a - q \times \frac{l}{2}$$

$$M_{felt} = \frac{V_a + V_0^+}{2} \times \frac{l}{2}$$

Case 2 - 2 spenn – feltmoment og støttemoment

Beregning av støttemoment(M_b) ved opplegg B



Løser 3.momentligningen for å finne støttemoment:

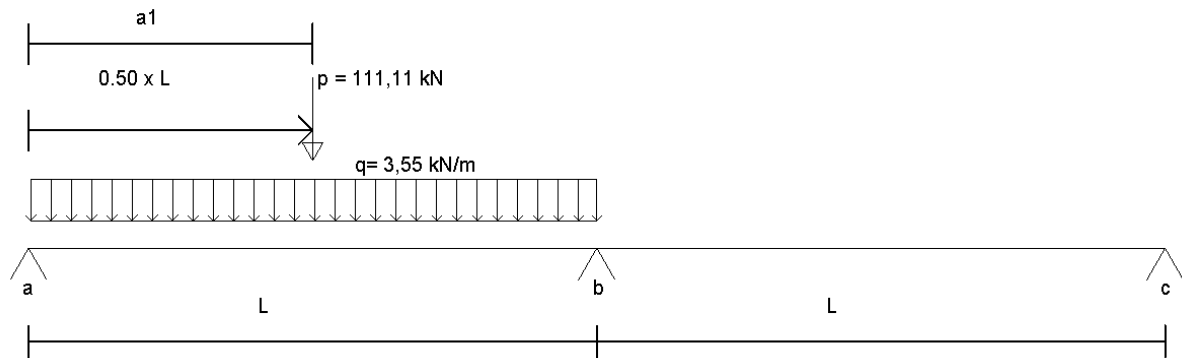
$$M_a = M_c = 0$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times \frac{q}{4} \times l^2 + p \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_b = \frac{q}{8} \times l^2 + \frac{p}{4} \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

Beregning av feltmoment

Lastplassering

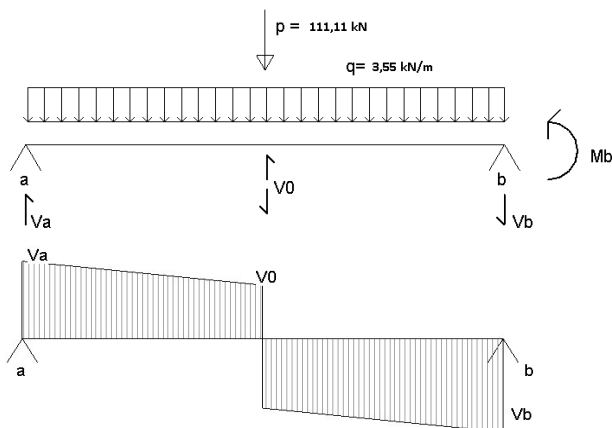


Løser 3.momentligningen for å finne støttemoment:

$$M_a = M_c = 0$$

$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + p \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_{støtdeb} = \frac{q}{16} \times l^2 + \frac{p}{4} \times l \times \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 \right)$$

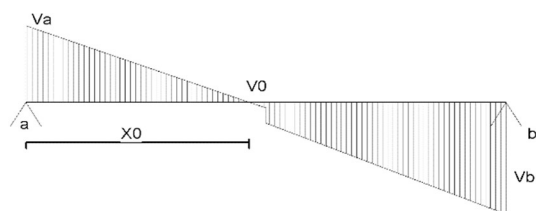


$$V_b = \frac{M_b + \frac{q \times l^2}{2} + p \times \frac{l}{2}}{l} \quad V_a = q \times l + p - V_b$$

$$V_0 = V_a - q \times \frac{l}{2}$$

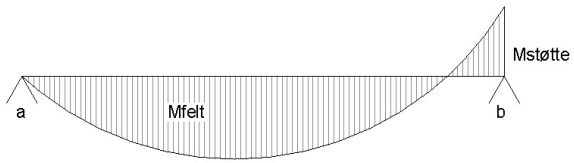
Evt. Ved lange spenn, når V=0 før punktlast inntreffer.

$$V_0 = 0 \quad X_0 = \frac{V_a}{q}$$

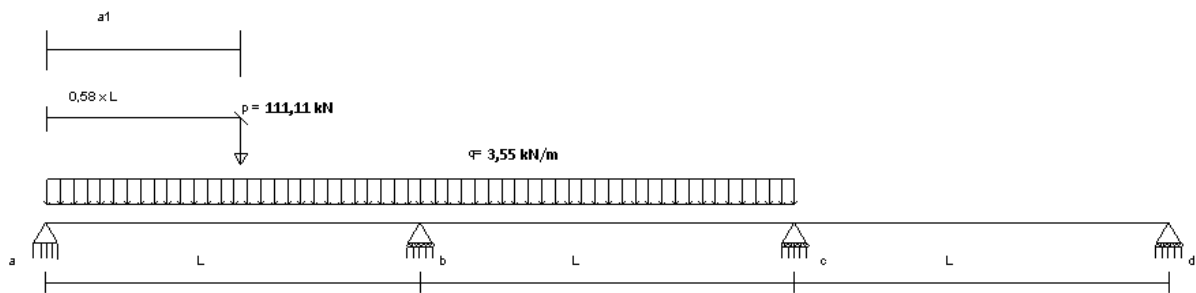


$$M_{felt} = \frac{V_a + V_0}{2} \times \frac{l}{2} \quad (V=0 \text{ inntreffer når } x_0 = a_1 = \frac{l}{2})$$

$$M_{felt} = \frac{V_a \times X_0}{2} \quad (V=0 \text{ inntreffer når } X_0 < a_1 = \frac{l}{2})$$



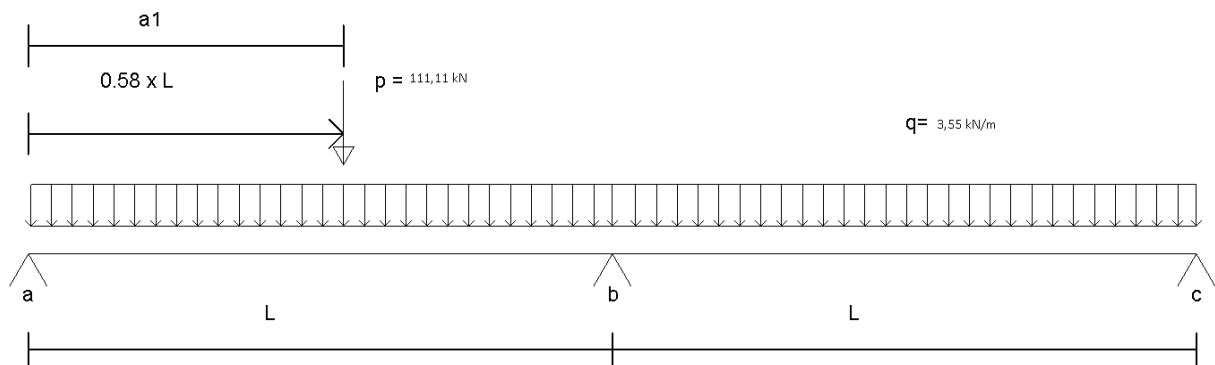
Case 3- 3 spenn – feltmoment og støttemoment.



Beregning av støttemoment(M_b) ved opplegg B

3.momentligningen for å finne støttemoment

Ligning for felt AB og BC:



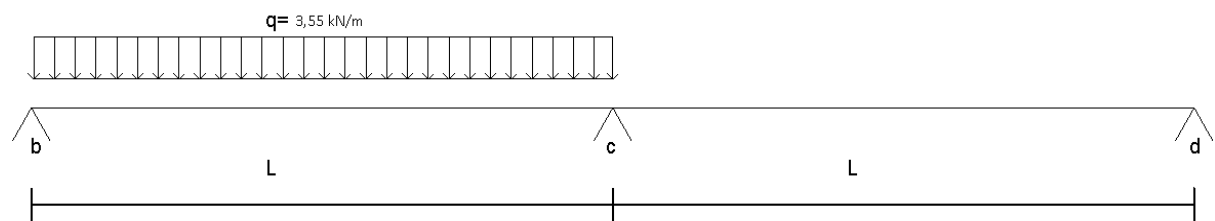
$$2 M_b \times (L_1 + L_2) + M_c \times (L_2) = 2 \times \frac{q}{4} \times l^3 + l^2 \times p \times \left(\frac{a_1}{L_1} - \left(\frac{a_1}{L_1} \right)^3 \right)$$

$$L_1 = L_2 = L$$

$$4 M_b + M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 4 M_b$$

Ligning for felt BC og CD:



$$4 M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

$$4 M_c = 2 \times q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 16 M_b$$

$$M_b = \frac{q}{4} \times l^2 - 4 M_c = \frac{q}{4} \times l^2 - 2 \times q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) + 16 M_b$$

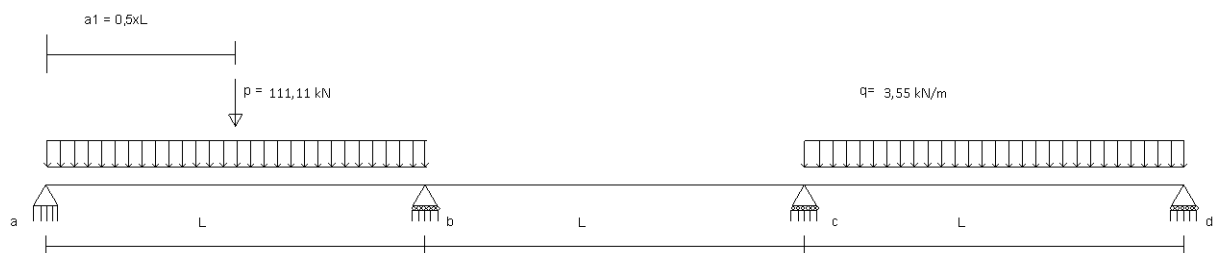
$$M_b = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right)$$

$$\text{Max} \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) = 0,385 \text{ når } a_1 = 0,58 \times l$$

$$M_{\text{støtte B}} = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{77}{750} l \times p$$



Beregner feltmoment

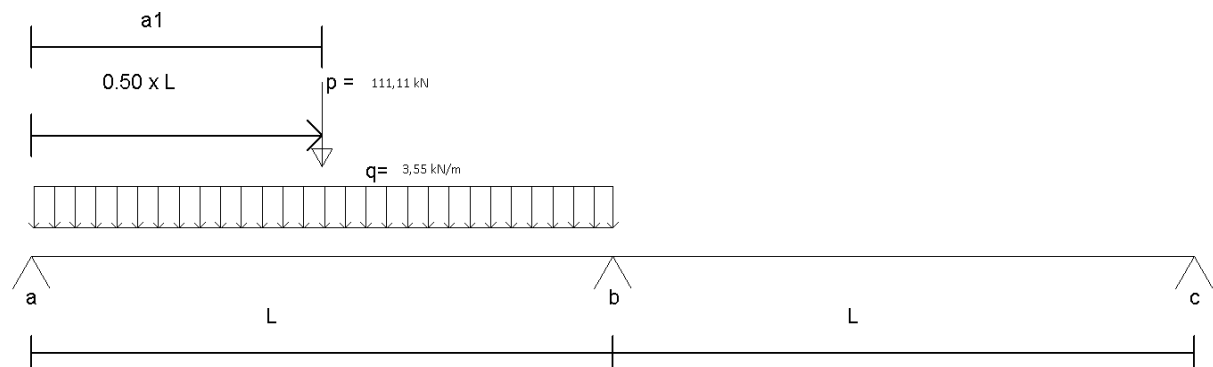


$$L_1 = L_2 = L$$

Beregner først støttemoment, for å finne skjærkrefter:

3. Momentligningen

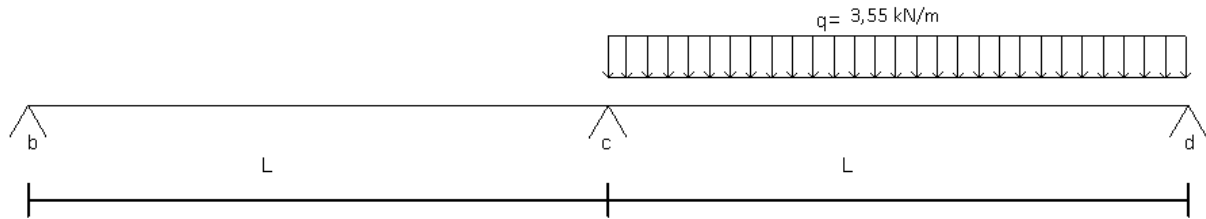
Felt AC og BC:



$$4 M_b + M_c = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 4 M_b$$

Felt BC og CD:



$$4 M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

$$4 M_c = q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) - 16 M_b$$

$$M_b = \frac{q}{4} \times l^2 - q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) + 16 M_b$$

$$\left(\frac{a_1}{L} - \left(\frac{a_1}{L} \right)^3 \right) = 0,375 \text{ når } a_1 = 0,5 \times L$$

$$M_{støtteb} = \frac{q}{20} \times l^2 + \frac{1}{10} \times l \times p$$

Bruker skjærkreftene til å finne moment



$$V_b = \frac{\left(M_{støtteb} - \frac{q \times l^2}{2} + p \times \frac{l}{2} \right)}{l}$$

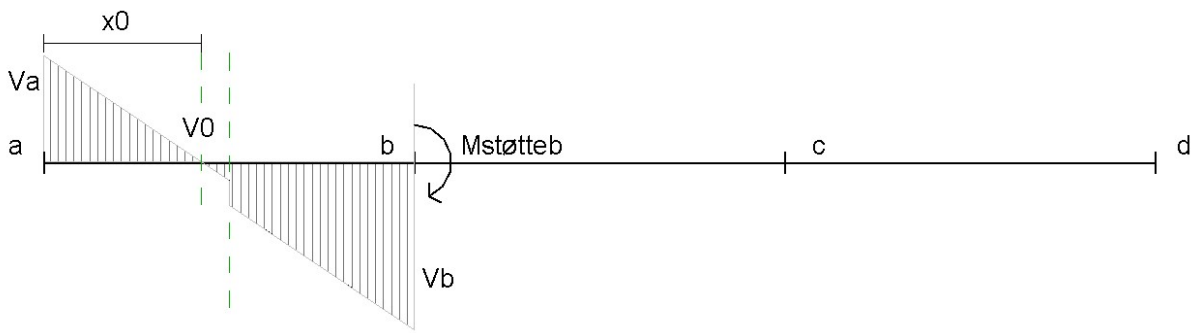
$$V_a = q \times l + p - V_b$$

$$V_1^+ = V_a - q \times \frac{l}{2}$$

$$V_1^- = V_1^+ - p$$

$$M_{felt} = \frac{(V_a + V_1^+)}{2} \times \frac{l}{2}$$

Når(hvis) $V=0$ før $L/2$ (ved punktlast)

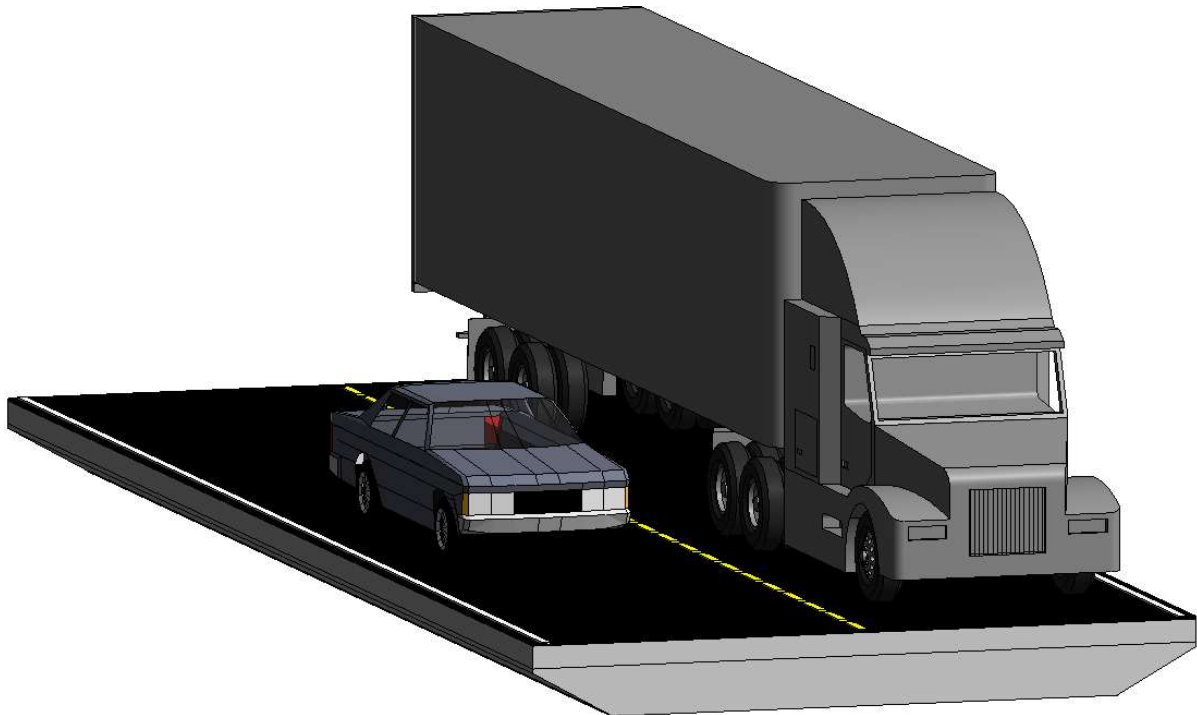


$$X_0 = \frac{V_a}{q}$$

$$M_{felt} = \frac{V_a \times X_0}{2}$$



LM3, åpent for annen trafikk

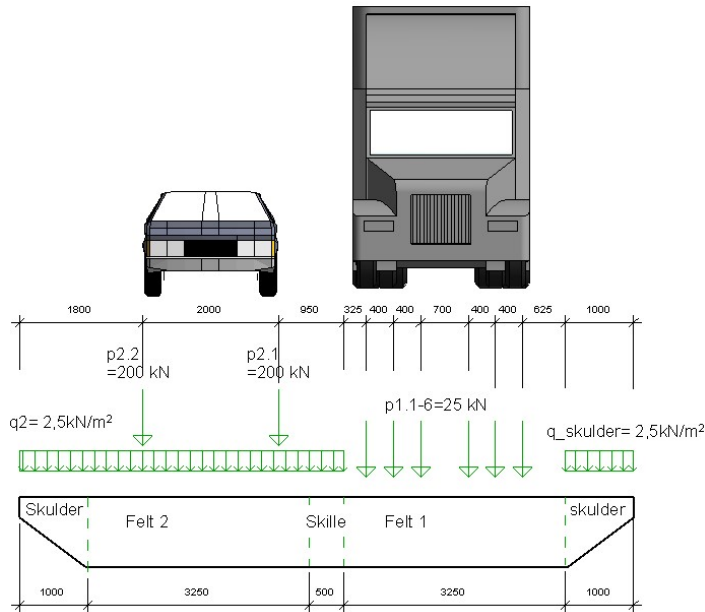


Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på platebro. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y-aksen på plate per m bredde, som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene.

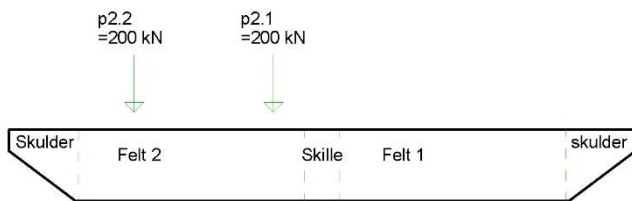


Forenklet fordeles alt av krefter i bredderetning likt i tverrsnittet.

Momentet vi så regner på blir moment om y-aksen per meter bredde.

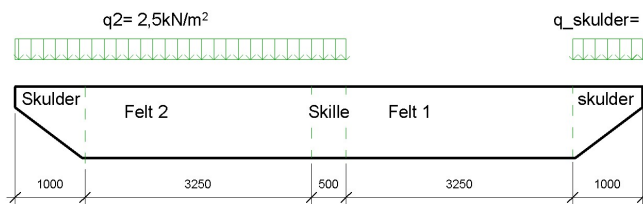


Finner punktlasten P_{felt2} i felt 2 (venstre felt sett ovenfor) som virker i et punkt i lengderetning på platebro.



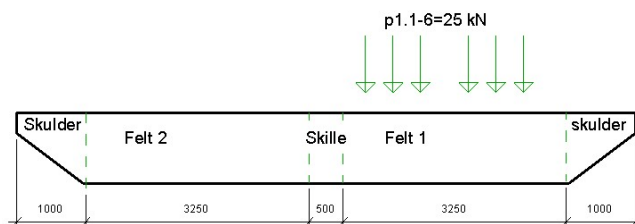
$$p_{felt2} = \frac{200 \text{ kN} + 200 \text{ kN}}{9 \text{ m}} = 44,44 \text{ kN/m}$$

Finner q_{felt2} som virker jevnt fordelt i lengderetning på platebro..



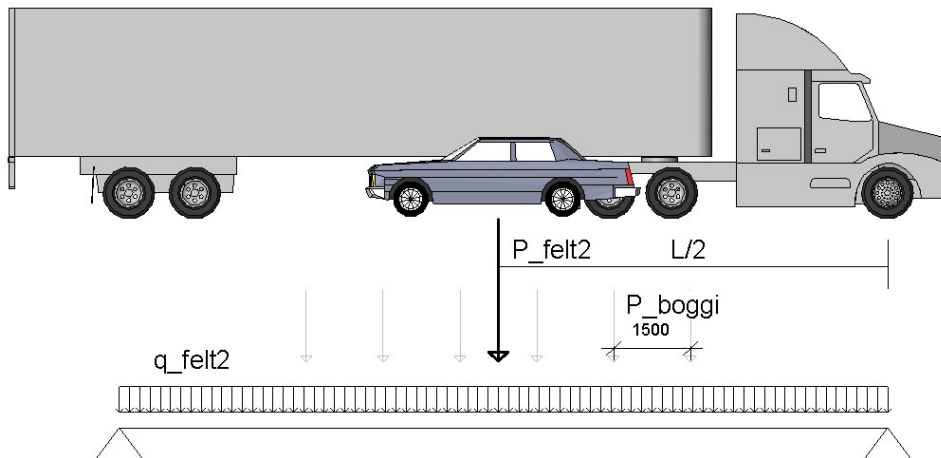
$$q_{felt} = \frac{2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 5,75 \text{ m}}{9 \text{ m}} = 1,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Finner P_{boggi} som virker som boggilast med opptil 18 ledd (1 vogn) eller 30 ledd (2 vogner)



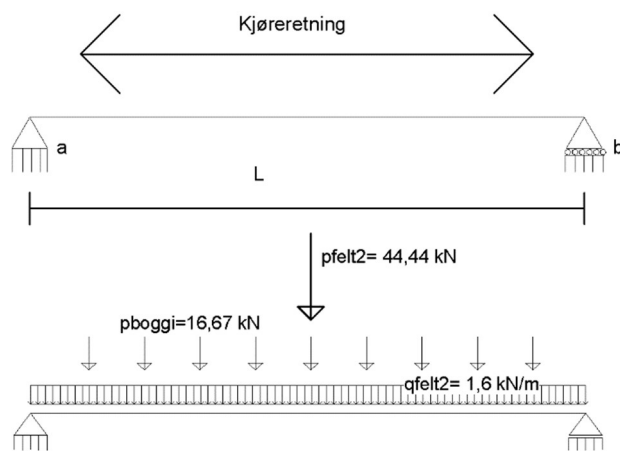
$$p_{boggi} = \frac{25 \text{ kN} \times 6 \text{ stk}}{9 \text{ m}} = 16,67 \text{ kN}$$

Lastpåvirkning i lengderetning på bjelke B



Laster i lengderetning bro på midtbjelke, ved LM3 i felt 1, og åpent for LM1 i felt 2.

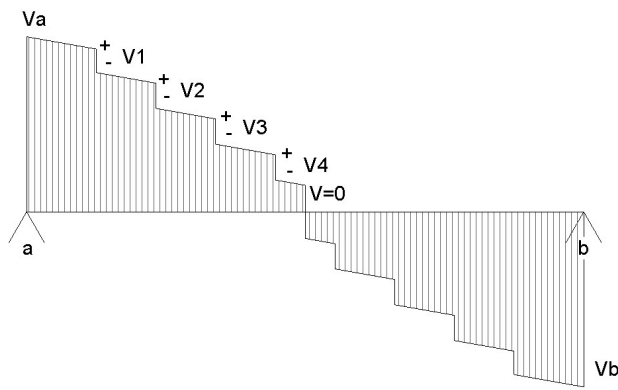
Case 1 - 1 spenn – kun feltmoment



Sentrisk plassert $\Rightarrow a_y = b_y = V_a = V_b$

$n = \text{antall boggilaster}$

$$\sum F_y = a_y + b_y - p - p_b \times n_b - q \times l \quad \Rightarrow V_a = \frac{p + p_b \times n_b + q \times l}{2}$$



$$V1_+ = Va - q \times l_{Va-v1}$$

$$V1_- = V1_+ - pb$$

$$V2_+ = V1 - q \times l_{v1-v2}$$

$$V2_- = V2_+ - pb$$

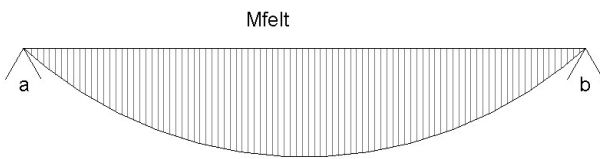
$$V_{x(+)} = V_{x-1(-)} - q \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

$$V_{x(-)} = V_{x+} - pb$$

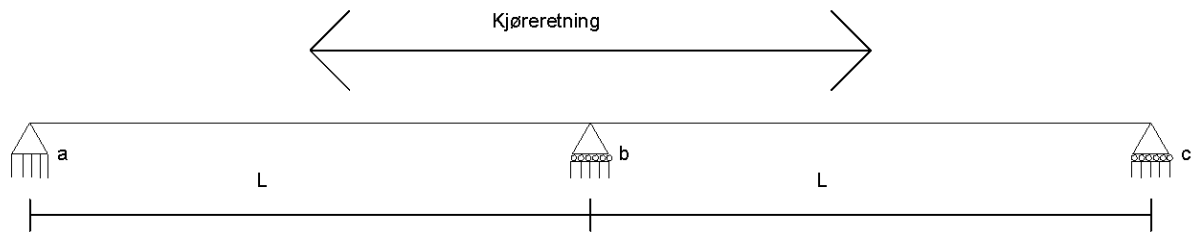
Regner Vx til V=0

$$M_{felt} = \frac{Va + V1_+}{2} \times l_{Va-v1} +$$

$$\sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

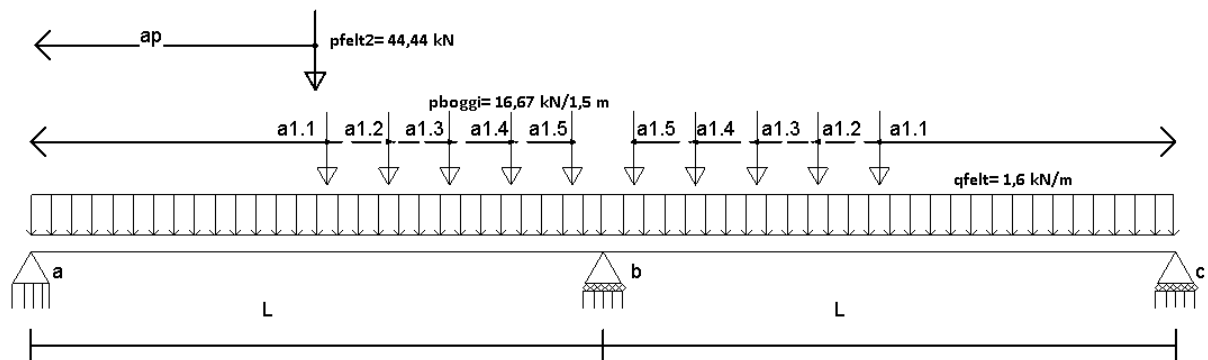


Case 2- 2 spenn – feltmoment og støttemoment



Beregner største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.

Støttemoment, boggi last plassert over opplegg B:



3.momentligningen, finne støttemoment B

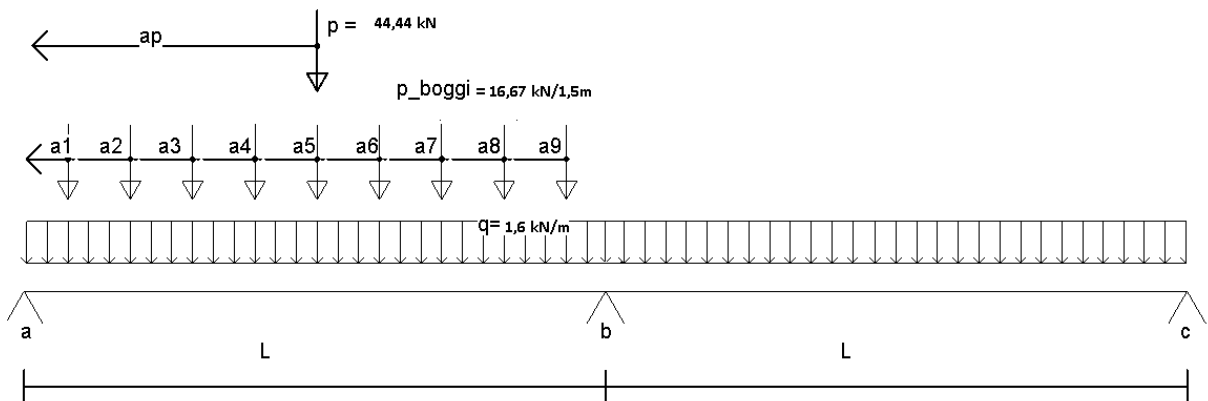
$$M_a = M_c = 0$$

$$a_p = 0,58 \times l$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times \frac{q}{4} \times l^2 + 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{8} \times l^2 + \frac{1}{2} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

Støttemoment, boggi last plassert midt i felt AB:



3.momentligningen, finne støttemoment B

$$M_a = M_c = 0$$

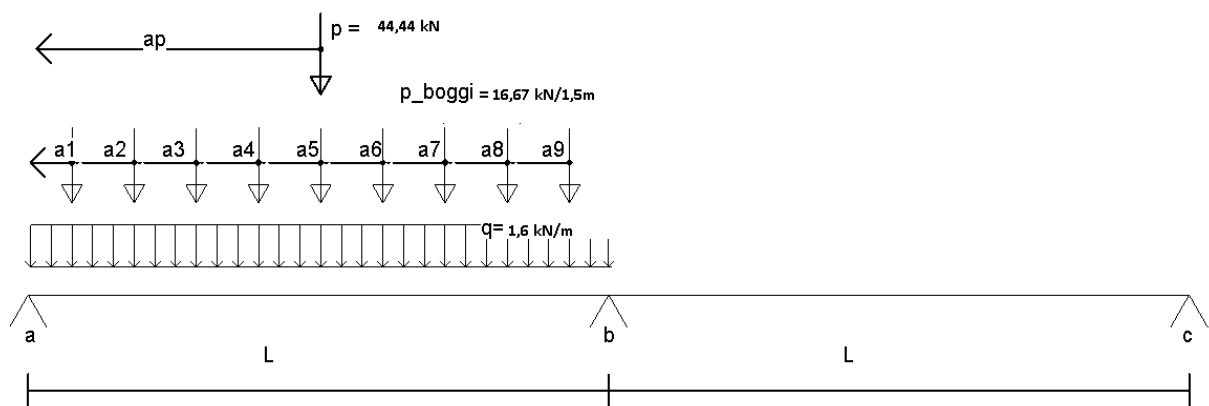
$$a_p = 0,58 \times l$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{8} \times l^2 + \frac{1}{4} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

Beregner største feltmoment

Feltmoment, boggi og jevnt fordelt last midtplassert i felt AB:



$$M_a = M_c = 0$$

$$a_p = 0,5 \times l$$

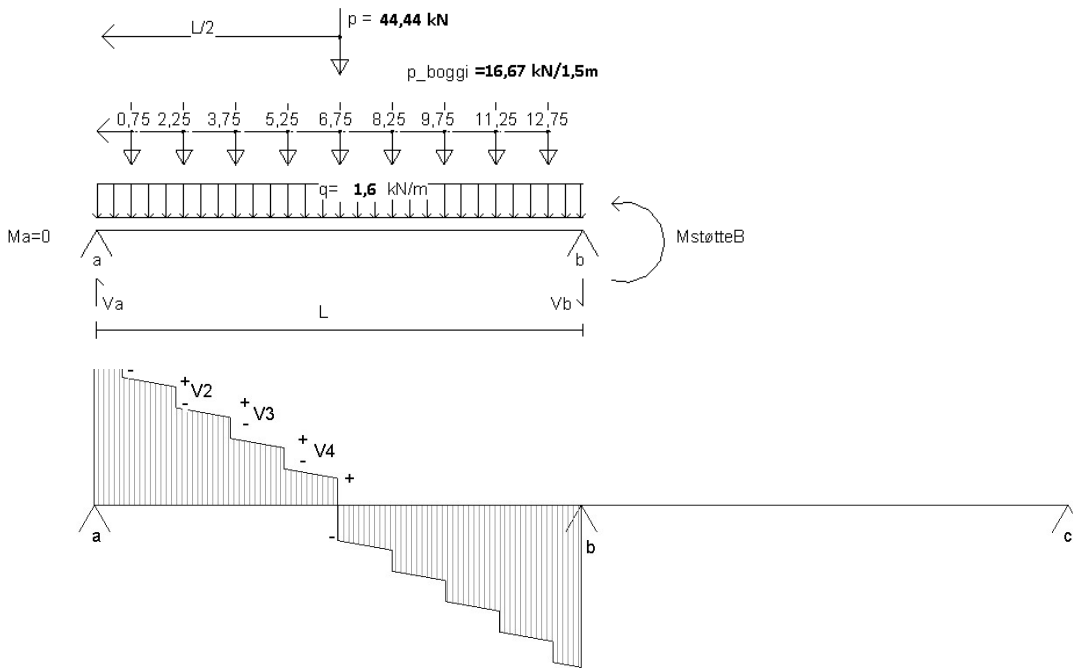
$$4M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

$$M_b = \frac{q}{16} \times l^2 + \frac{1}{4} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + \frac{1}{4} l \times p \times \left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3$$

Finner V_b ved å bruke M_b

$$V_b = \frac{M_b + p \times \frac{l}{2} + p_b \times \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n) + \frac{q \times l^2}{2}}{l}$$

$$V_a = q \times l + p + p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b$$



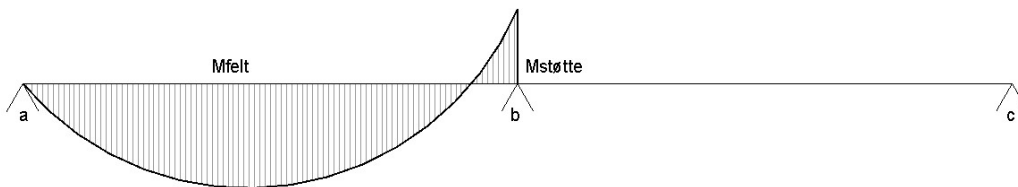
$V_{1+} =$

$$V_a - q \times l_{V_a-v_1} \quad V_{1-} = V_{1+} - p_b$$

$$V_{2+} = V_1 - q \times l_{V_1-v_2} \quad V_{2-} = V_{2+} - p_b$$

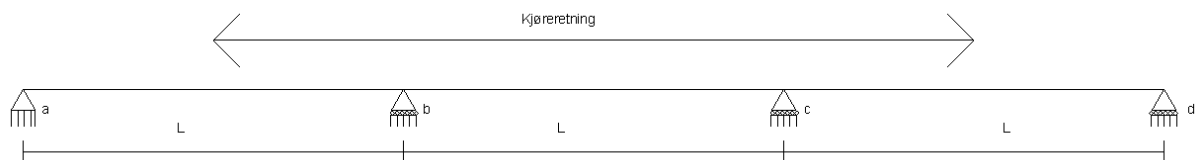
$$V_{x(+)} = V_{x-1(-)} - q \times l_{v(x)-v(x-1)} \quad V_{x(-)} = V_{x+} - p_b$$

Regner V_x til $V=0$



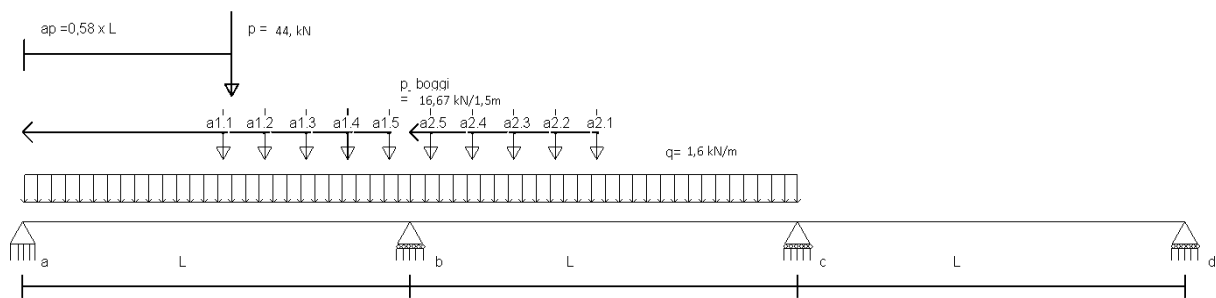
$$M_{\text{felt}} = \frac{V_a + V_{1+}}{2} \times l_{V_a-v_1} + \sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

Case 3- 3 spenn – feltmoment og støttemoment



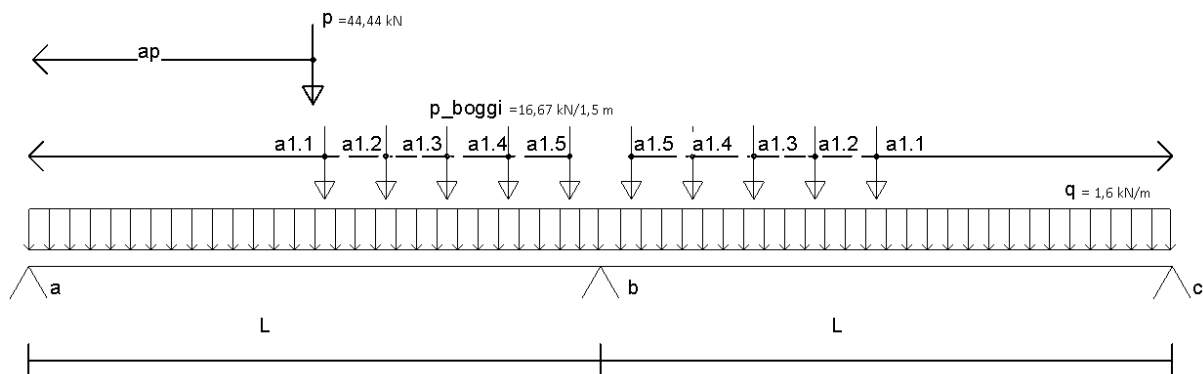
Beregner største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.

Støttemoment, boggi last plassert over opplegg B:



3.momentligningen, finne støttemoment B

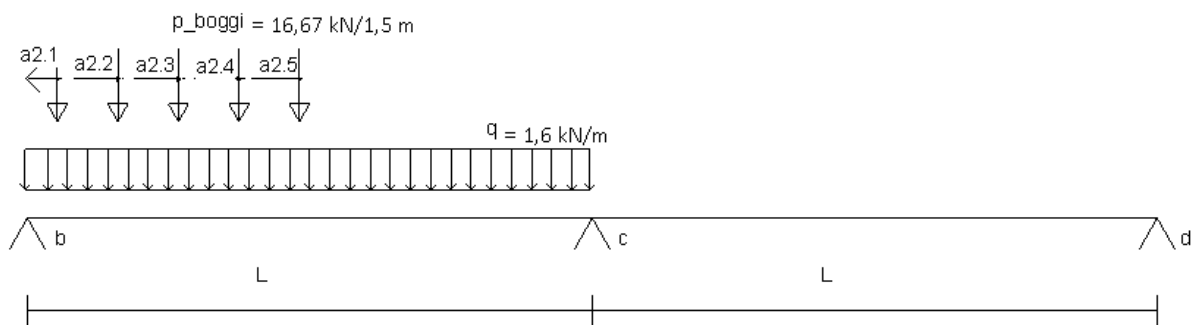
Ligning felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = 2stk \times \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 2 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 4M_b$$

Ligning felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

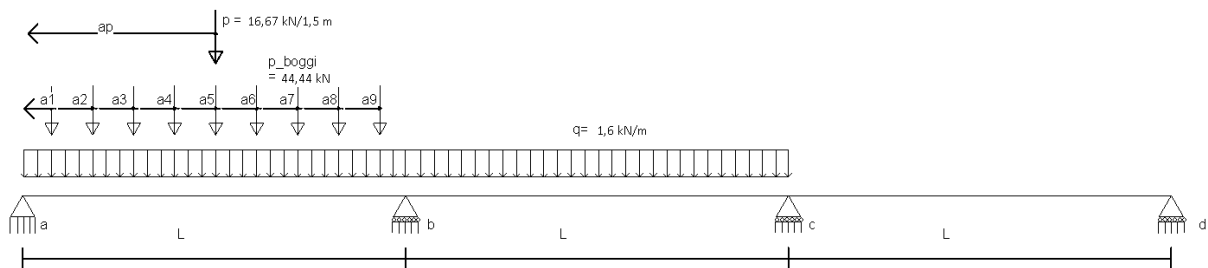
Løser ligningssett for å finne M_b (støttemoment ved opplegg B)

$$4M_c = 2 \times q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 16M_b$$

$$M_b = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right) - 2q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) - 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + 16M_b$$

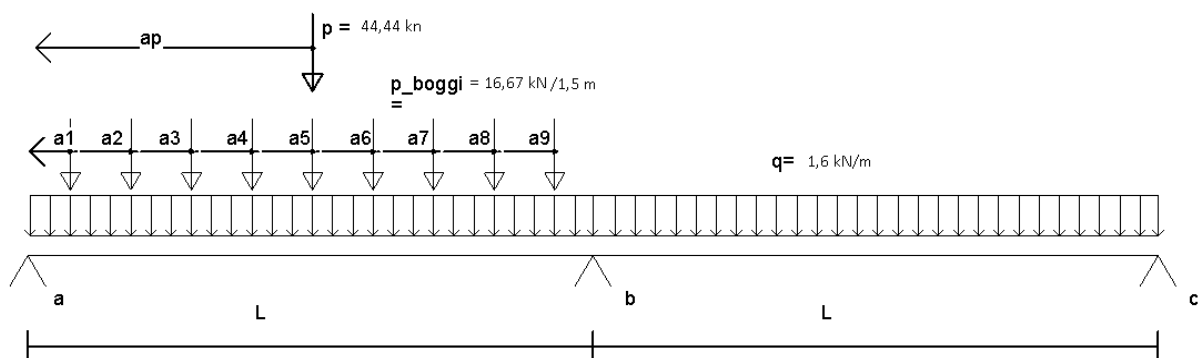
$$M_b = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + \frac{8}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - \frac{1}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

Støttemoment, boggilast midtplassert i felt AB:



3.momentligningen, finne støttemoment M_B

Felt AB og BC:



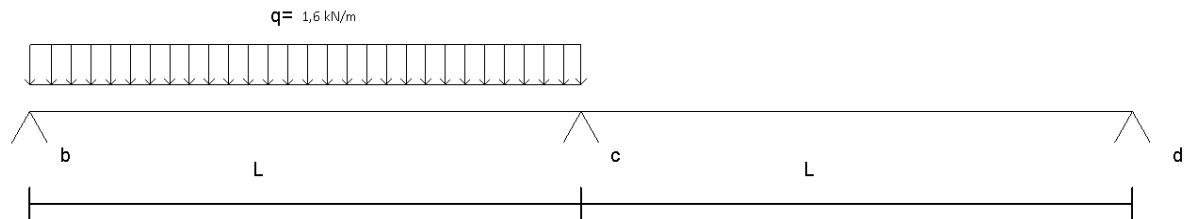
$$4M_b + M_c = 2 \text{ stk} \times \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_c = \frac{q}{2} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 4M_b$$

Felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

Løser ligningssett for å finne Mb(støttemoment opplegg B):

$$4M_c = 2 \times q \times l^2 + 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + 4 \times l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 16 \times M_b$$

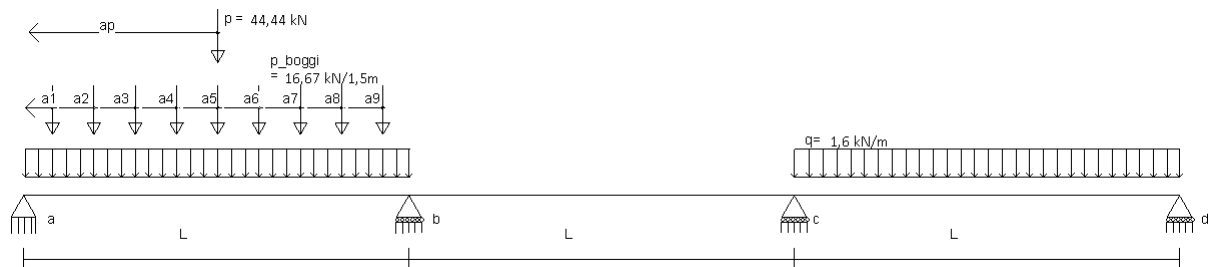
$$M_b = -4M_c + \frac{q}{4} \times l^2 = -1,75 \times q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) - 4 \times l \times p_b \times$$

$$\text{sum} \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) + 16 \times M_b$$

$$M_{\text{støtteb}} = \frac{7}{60} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + \frac{4}{15} \times l \times p_b \times$$

$$\Sigma \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

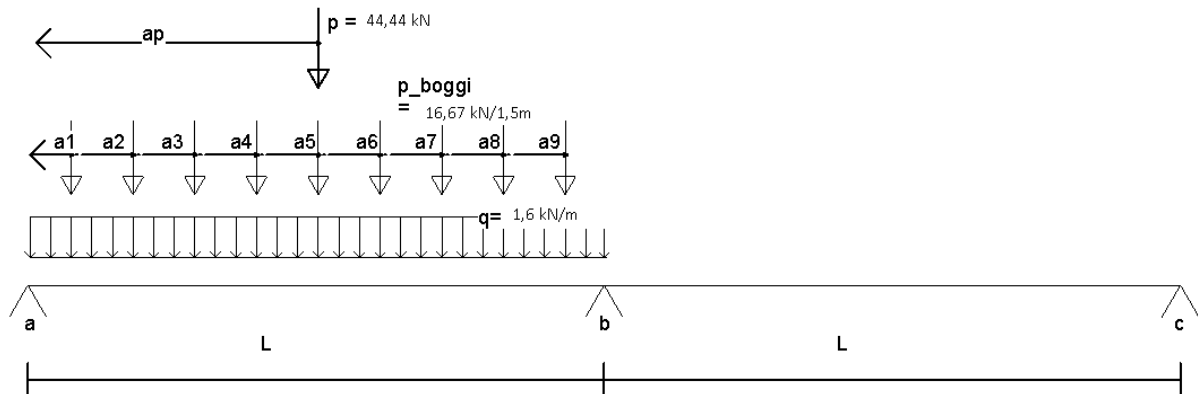
Beregner største feltmoment.



Først finne Støttemoment Mb om opplegg B:

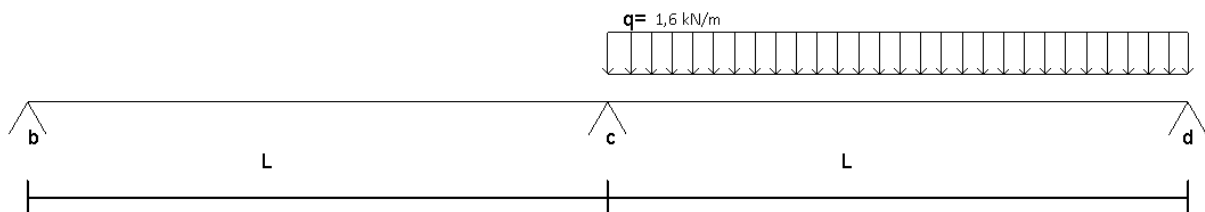
3.momentligningen

Felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = \frac{q}{4} \times l^2 + l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

Felt BC og CD:

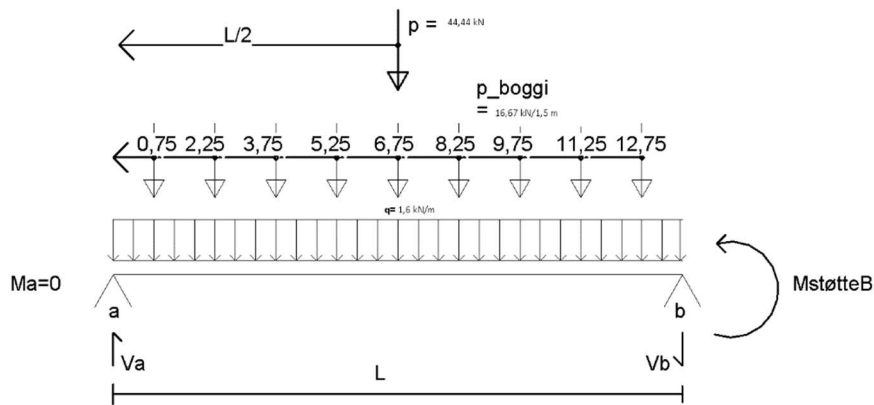


$$4M_c + M_b = \frac{q}{4} \times l^2$$

Løser så ligningssett:

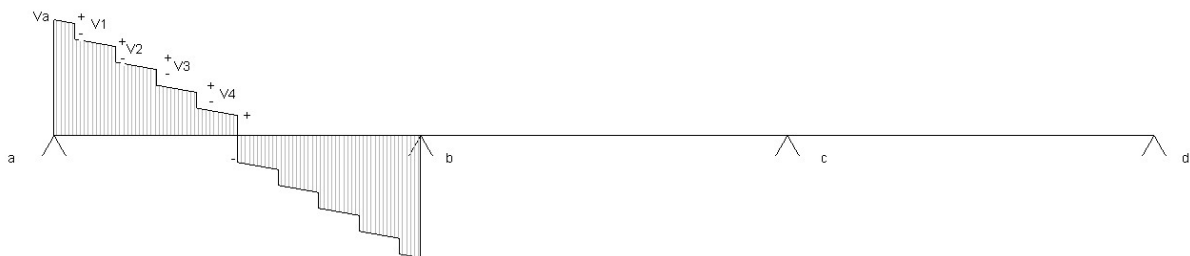
$$M_{støtdeb} = \frac{q}{4} \times l^2 - 4M_c = \frac{q}{4} \times l^2 - q \times l^2 - 4 \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) - 4 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 16M_b.$$

$$M_{støtdeb} = \frac{1}{20} \times q \times l^2 + \frac{4}{15} \times l \times p \times \left(\left(\frac{a_p}{l} \right) - \left(\frac{a_p}{l} \right)^3 \right) + \frac{4}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_1}{l} \right) - \left(\frac{a_1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{l} \right) - \left(\frac{a_2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right).$$



$$V_b = \frac{Mb + p \times \frac{l}{2} + p_b \times \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n) + \frac{q \times l^2}{2}}{l}$$

$$V_a = q \times l + p + p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b.$$



$$V_{1+} = V_a - q \times l_{Va-v1} \quad V_{1-} = V_{1+} - p_b$$

$$V_{2+} = V_{1-} - q \times l_{V1-v2} \quad V_{2-} = V_{2+} - p_b$$

$$V_{x(+)} = V_{x-1(-)} - q \times l_{v(x)-v(x-1)} \quad V_{x(-)} = V_{x+} - p_b$$

Regner V_x til $V=0$

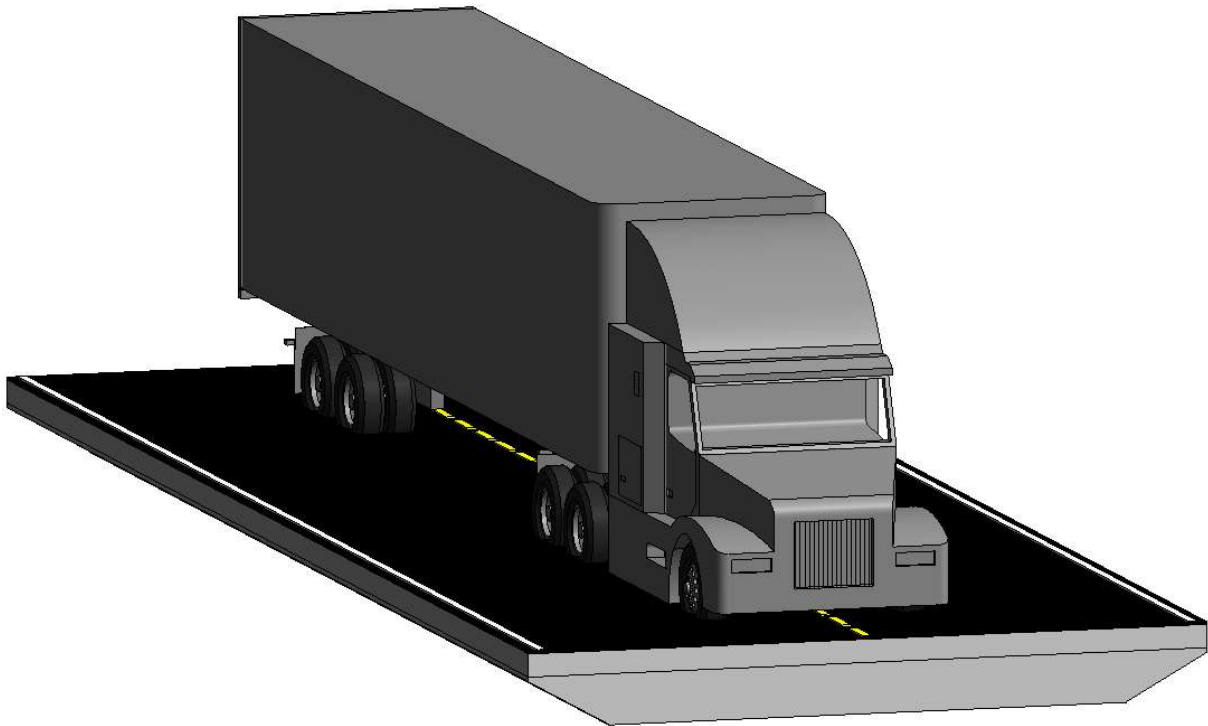


$$M_{felt} = \frac{V_a + V_{1+}}{2} \times l_{Va-v1} + \sum \frac{V_{x(-)} + V_{x+1(+)}}{2} \times l_{v(x)-v(x-1)}$$

LM3, stengt for annen trafikk

Kjøretøyene i modell er kun til visuell hjelp for å skille mellom de forskjellige lastmodulene.

LM3 last er i dette tilfellet midtplassert på bro i bredderetning.



Målet er å finne lastfordeling i tverrsnitt, for så å regne vertikale krefter i lengderetning på platebro. I denne oppgaven har vi fokusert på moment om y -aksen på plate per m bredde, som sammenligningsgrunnlag mellom lastmodulene.

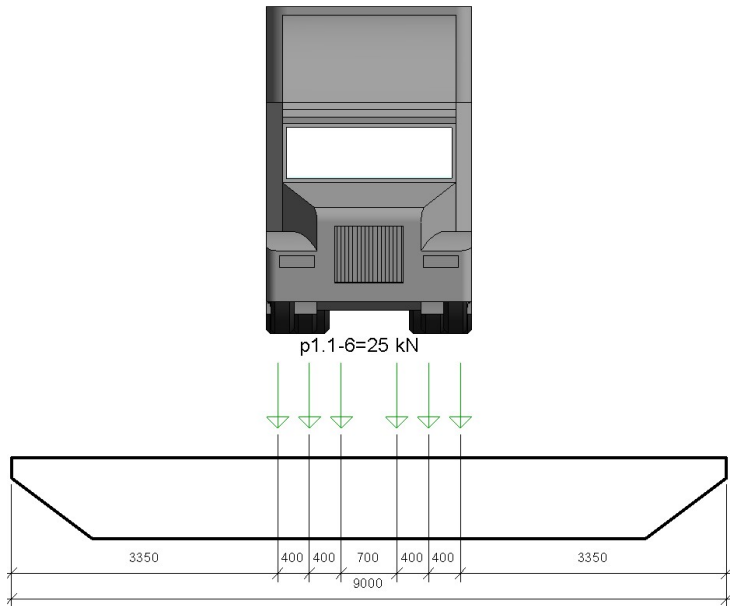


Forenklet fordeles alt av krefter i bredderetning likt i tverrsnittet.

Momentet vi så regner på blir moment om y -aksen per meter bredde.

Lastfordeling i bredderetning

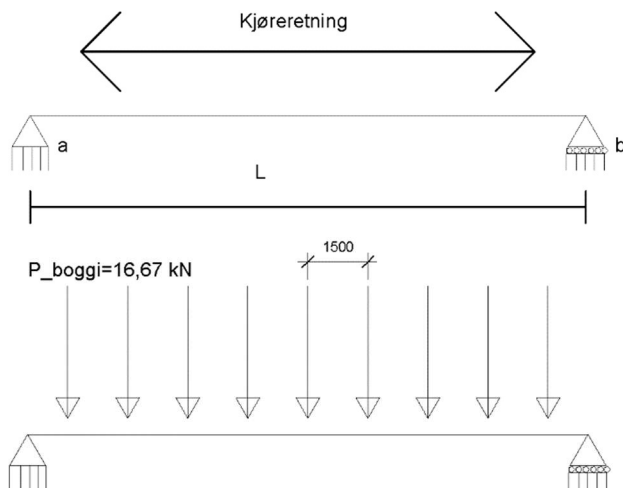
Beregner p_{boggi} som virker i lengderetning på platebro, per meter bredde.



$$p_b = \frac{6 \text{ stk} \times 25 \text{ kN}}{9 \text{ m}} = 16,67 \text{ kN}$$

Case1- 1 spenn- kun feltmoment

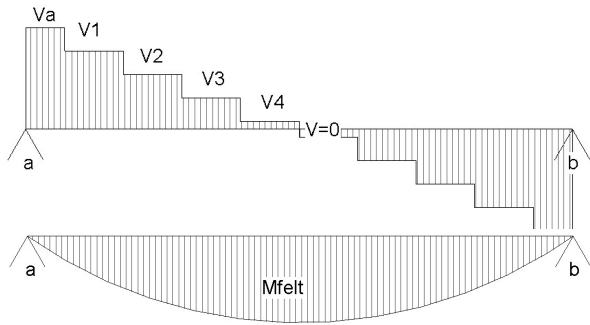
Finne største feltmoment ved å midtplassere boggilast i felt.



Sentrisk plassert $\Rightarrow a_y = b_y = V_a = V_b$

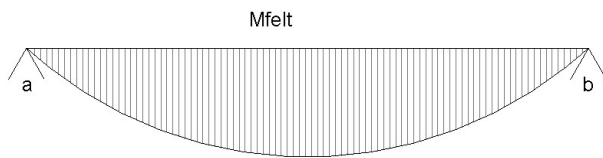
$n = \text{antall boggilaster}$

$$\sum Fy = a_y + b_y - p_b \times n_b \Rightarrow V_a = \frac{p_b \times n_b}{2}$$



$$V_1 = V_a - p_b \quad V_2 = V_1 - p_b \Rightarrow V_x = V_{x-1} - p_b$$

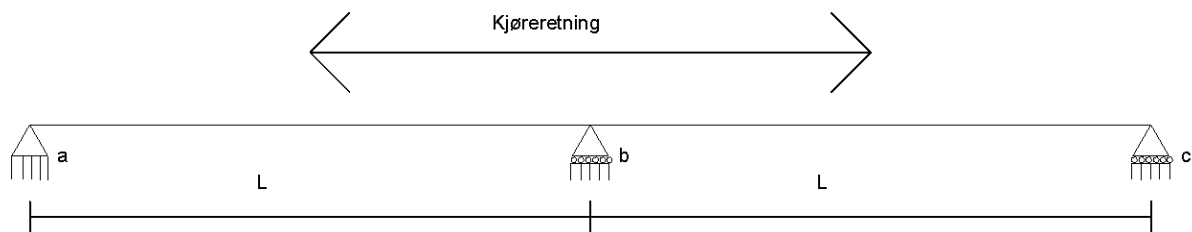
Regner V_x til $V=0$



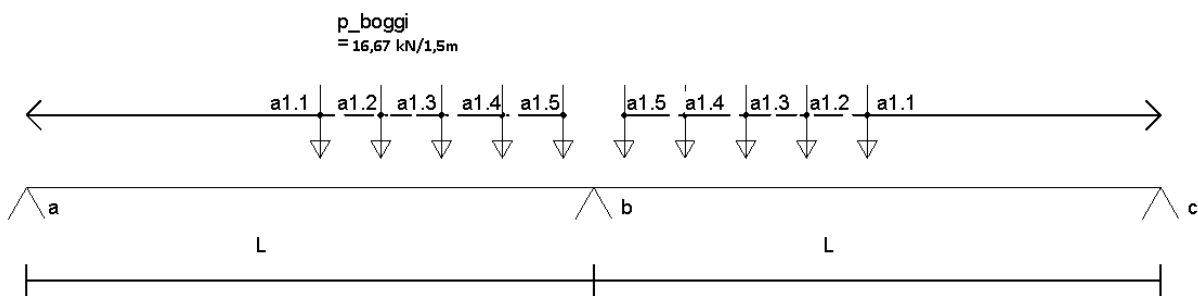
$$M_{felt} = V_a \times l_{va} + \sum V_x \times l_{vx} \text{ (når } V_x > 0\text{)}$$

Case 2- 2 spenn – feltmoment og støttemoment

Beregner største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.



Støttemoment, boggi last midtplassert over opplegg B:



3.momentligningen

Finner støttemoment M_B ved opplegg B.

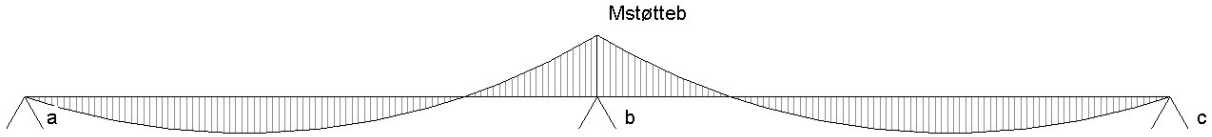
$$M_a = M_c = 0$$

$$a_{1.2} = a_{1.1} + 1,5 \text{ m (avstand boggi)}$$

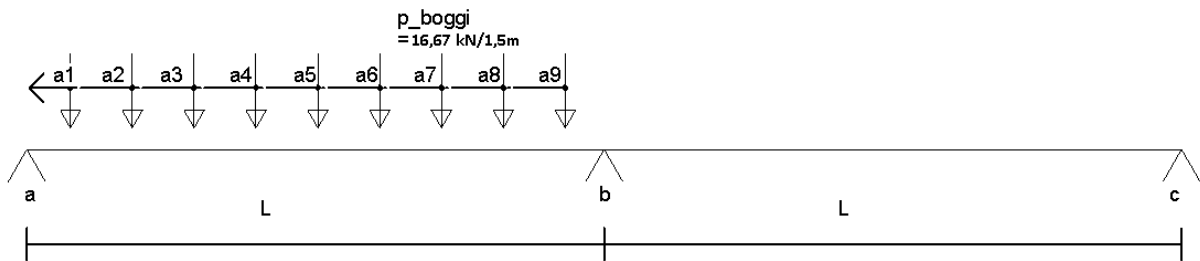
$$a_{1.x} = a_{1.x-1} + 1,5 \text{ m når } x > 1$$

$$4M_b = 2 \text{ sider} \times p_b \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_b = \frac{p_b}{2} \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$



Støttemoment, boggi last midtplassert i felt AB:



3.momentligningen

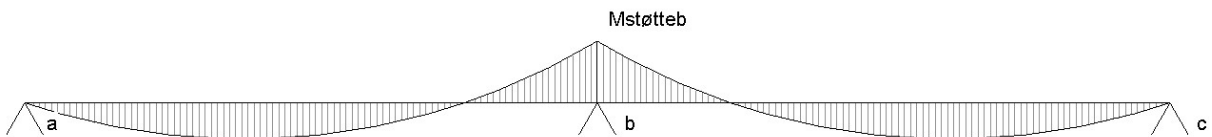
Finner støttemoment M_B ved opplegg B.

$$4M_b = p \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

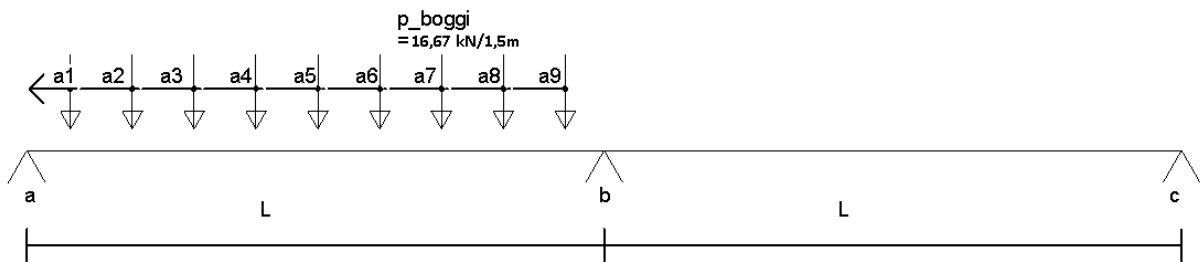
$$M_b = \frac{p}{4} \times l \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$a_{1,2} = a_{1,1} + 1,5 \text{ m (avstand boggi)}$$

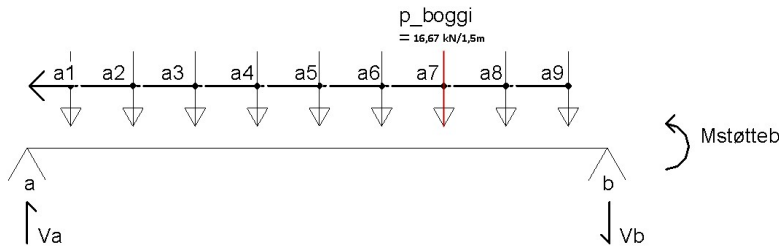
$$a_{1,x} = a_{1,x-1} + 1,5 \text{ m når } x > 1$$



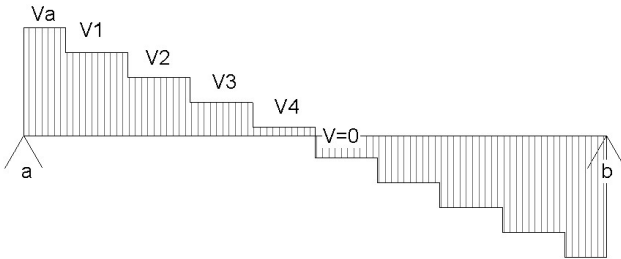
Beregner feltmoment M_b ved opplegg B.



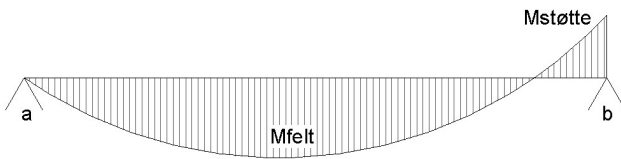
Samme lastplassering som da vi fant støttemoment B ved å midtplassere last i felt. Bruker MstøtteB til å finne feltmoment.



$$V_b = \frac{M_b + p_b \times \sum a_x}{l} \quad V_a = p_b \times n_b - V_b \quad n_b = \text{antall boggilaster}$$

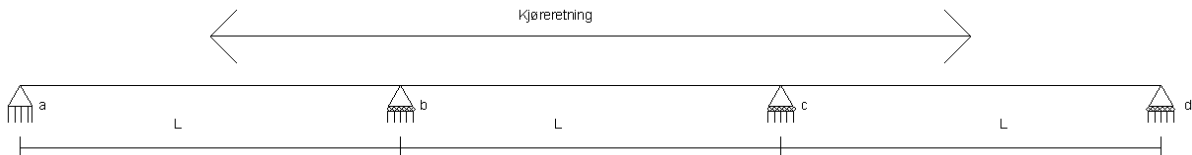


$$V_1 = V_a - p_b \quad V_2 = V_1 - p_b \Rightarrow V_x = V_{x-1} - p_b$$



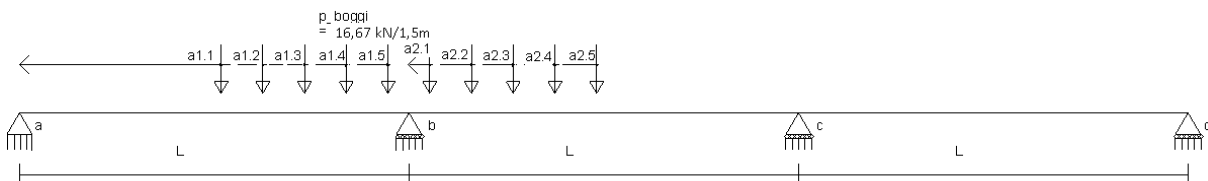
$$M_{felt} = V_a \times l_{va} + \sum V_x \times l_{vx} \quad (\text{når } V_x > 0)$$

Case 3 - 3 spenn -feltmoment og støttemoment



Beregn største støttemoment ved å sjekke midtplassert over opplegg b og midt i felt AB.

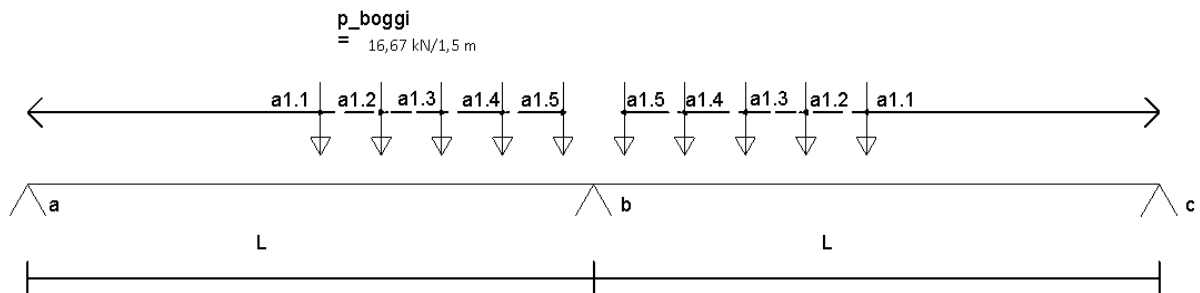
Støttemoment, boggi last plassert over opplegg B:



3.momentligningen

Finner støttemoment M_B ved opplegg B.

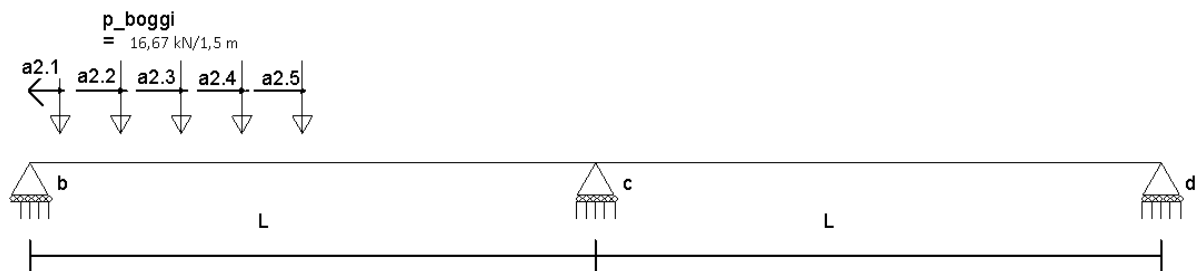
Ligning for felt AB og BC:



$$4M_b + M_c = 2 \text{ sider} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right)$$

$$M_c = 2 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 4M_b$$

Ligning for felt BC og CD:



$$4M_c + M_b = l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

Løser ligningssett for å finne M_b (støttemoment ved opplegg B)

$$4M_c = 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - 16M_b$$

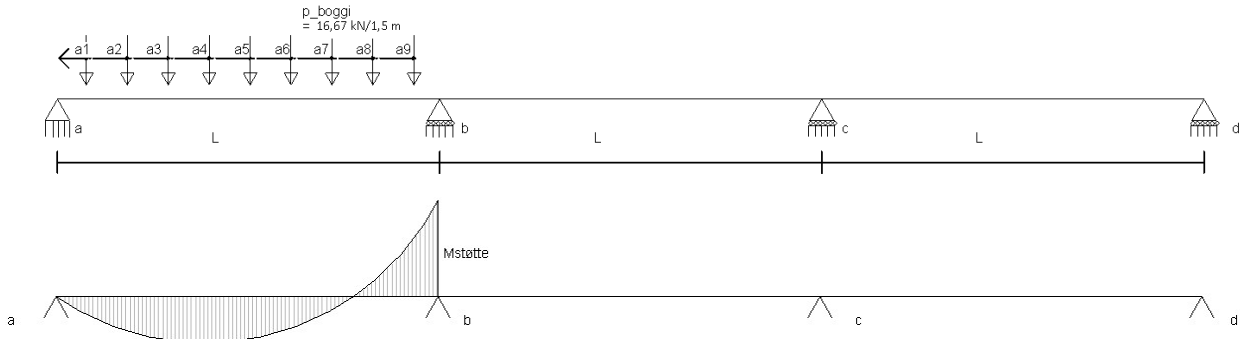
$$M_b = l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right) - 8 \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) + 16M_b$$

$$M_b = \frac{8}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{1,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{1,x}}{l} \right)^3 \right) - \frac{1}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a_{2,x}}{l} \right) - \left(\frac{a_{2,x}}{l} \right)^3 \right)$$

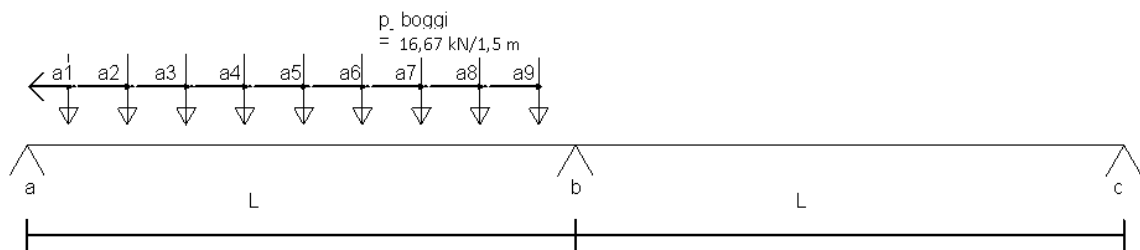
Støttemoment, boggilast plassert midt i felt AB:

3.momentligningen

Finner støttemoment ved opplegg B.

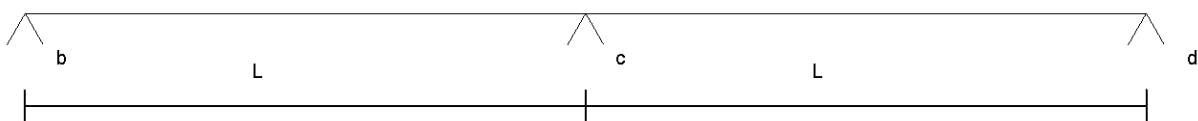


Felt AB og BC:



$$4Mb + Mc = l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

Felt BC og CD:



$$4Mc + Mb = 0$$

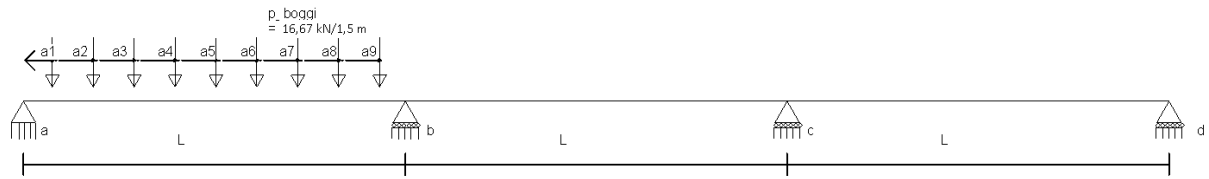
Løser ligningssett:

$$4Mc = 4 \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) - 16 \times$$

$$Mb = -4 \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right) + 16 \times$$

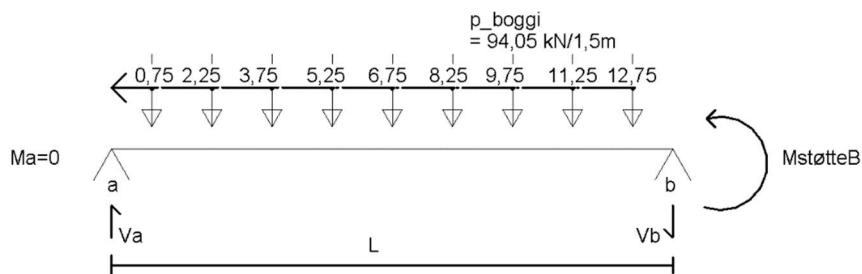
$$Mstøtteb = \frac{4}{15} \times l \times p_b \times \sum \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$

Beregner feltmoment



Ser at vi allerede har løst støttemomentet ved denne lastplasseringen.

$$M_{\text{støtteb}} = \frac{4}{15} \times l \times p_b \times \text{sum} \left(\left(\frac{a1}{l} \right) - \left(\frac{a1}{l} \right)^3 + \left(\frac{a2}{l} \right) - \left(\frac{a2}{l} \right)^3 \dots + \left(\frac{a_n}{l} \right) - \left(\frac{a_n}{l} \right)^3 \right)$$



$$V_b = \frac{M_b + \text{sum}(a_1 + a_2 \dots + a_n)}{l}$$

$$V_a = +p_b \times n(\text{antall boggi}) - V_b.$$



$$V_1 = V_a - p_b$$

$$V_2 = V_1 - p_b$$

$$V_x = V_{x-1} - p_b$$

Regner V_x til $V=0$

$a_b = 1,5m = \text{Avstand mellom boggilaster}$



$$M_{\text{felt}} = V_a \times a_1 + \sum V_x \times a_b$$

8.3 Vedlegg C

8.3.1 Betongens karakteristiske verdier og faktorer

Faktor	Tegnforklaring	Verdi
Karakteristisk sylindrefasthet etter 28 døgn	f_{ck}	45 MPa
Middelverdi av betongens sylindetrykkfasthet	f_{cm}	48 MPa
Betongens midlere aksialtrekkfasthet	f_{ctm}	3,8 MPa
Elastisitetsmodul for betong	E_{cm}	36000 MPa
Karakteristisk aksialtrekkfasthet	$f_{ctk,0,05}$	2,70 MPa
Trykktøyning i betongen	ϵ_{c2}	$2,0 \times 10^{-3}$
Tøyninggrense ved trykk i betongen	ϵ_{cu2}	3,5 %
Partialfaktor	γ_c	1,5
Materialfaktor for betong	γ_s	1,15
Tyngdetetthet uarmert betong	$P_{c,uarmert}$	$24 \frac{kN}{m^3}$
Tyngdetetthet armert betong	$P_{c,armert}$	$25 \frac{kN}{m^3}$
Karakteristisk fasthet	f_{yk}	500 MPa
Dimensjonerende fasthet	$F_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500N}{1,15 mm^2}$	$434,7 \frac{N}{mm^2}$
Elastisitetsmodul	E_s	200000 MPa

8.4 Vedlegg D

8.4.1 Beregning av midtbjelke

Beregning av midtbjelke - Eksempel 1	
LM1 i begge felt	
Dimensjonerende trykkfasthet betong	[Tabell 3.1] f_{ck} for B45
$\alpha_{cc} := 0.85$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{ck} := 45 \frac{N}{mm^2}$	[NA.2.1N] γ_c for betong γ_s for armeringsstål
$f_{cd} := f_{ck} \cdot \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} = 25.5 \frac{N}{mm^2}$	(3.15) Formel for f_{cd} [NA.3.1.6(1)P] α_{cc} [3.2.2(3)P] f_{yk}
Dimensjonerende flytespenning i armering	
$f_{yk} := 500 \frac{N}{mm^2}$ $\gamma_s := 1.15$	
$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.78 \frac{N}{mm^2}$	
Overdekning armering	
[4.4.1.1(2)P] Nominell overdekning	
$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$	
[NA.4.4.1.3] $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$	
[4.4.1.2(2)P] C_{min}	
$C_{min} = \max(C_{min,b}; C_{min,dur}; 10 \text{ mm})$ (forenklet formel)	
Krav til minste overdekning	
$C_{min,b} = \phi \cdot h = 32 \text{ mm}$ (Tabell 4.2)	
Overdekning som følge av miljøpåvirkning - eksponeringsklasse XD3, 100 år dimensjonerende brukstid	
$C_{min,dur} = 50 \text{ mm}$	
$C_{min,b} := 32 \text{ mm}$ $C_{min,dur} := 50 \text{ mm}$ $\Delta C_{min,dev} := 10 \text{ mm}$	
$C_{min} := C_{min,dur} = 50 \text{ mm}$	
Nødvendig overdekning	
$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{min,dev} = 60 \text{ mm}$	

[8.2(2)] Avstand mellom armeringsstenger

$$a_{\text{horizontal}} = \max(k_1 \cdot \phi \cdot h, dg + k_2, 20 \text{ mm}) = (2.0 \cdot 32 \text{ mm}, 32 + 5 \text{ mm}, 20 \text{ mm}) = 64 \text{ mm}$$

$$a_{\text{vertikal}} = \min(32 \text{ mm}, 1.5 \cdot \phi \cdot h) = 32 \text{ mm}$$

$$dg = 32 \text{ mm}$$

[NA.8.2] Faktor $k_1 = 2.0$ for stenger i samme lag

Faktor $k_1 = 1.5$ for avstand mellom ulike lag, men trenger ikke være større enn 32 mm for stenger som er mindre eller lik ϕ large.

Faktor $k_2 = 5 \text{ mm}$

$$a_h := 64 \text{ mm} \quad a_v := 32 \text{ mm}$$

Antar to lag lag $\phi 32$, bøyle $\phi 12$

Tverrsnittsdata

$$b_w := 650 \text{ mm} \quad t := 350 \text{ mm} \quad L_s := 30000 \text{ mm} \quad \phi_h := 32 \text{ mm} \quad \phi_b := 12 \text{ mm}$$

$$b := b_w = 650 \text{ mm} \quad h := \frac{L_s}{20} = 1.5 \text{ m}$$

$$d := h - C_{nom} - \phi_b - \phi_h - \frac{a_v}{2} = 1380 \text{ mm}$$

$$P := 706.38 \text{ kN}$$

Moment fra punktlast, midtplassert

Lastfaktorer

$$M_p := \frac{(P \cdot L_s)}{4} \cdot \gamma_Q = 7152.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\gamma_Q := 1.35$$

$$q := 17.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \gamma_Q = 23.33 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_g := 1.2$$

Egenlast bjelke

$$g := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad h_{red} := h - t = 1150 \text{ mm} \quad b_{eff} := 2075 \text{ mm}$$

$$g_{Ed} := \gamma_g \cdot g \cdot ((b_w \cdot h_{red}) + (t \cdot b_{eff})) = 44.21 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Feltmoment fra jevnt fordelt last

$$M_{fellt} := \frac{((q + g_{Ed}) \cdot L_s^2)}{8} = 7598.31 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dimensjonerende moment

$$M_{Ed} := M_p + M_{fellt} = 14750.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tynn eller tykk?

1. Tykk flens - $t > 0,33 \cdot d$
2. Tynn flens - $t < 0,33 \cdot d$

$$0,33 \cdot d = 455,4 \text{ mm} \quad \text{Tynn flens}$$

Effektiv flensbredde

$$b_{eff} := \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \quad (5.7)$$

$$b_{eff,i} := 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_0 \leq 0,2 \cdot l_0 \quad (5.7a)$$

$$b_{eff,i} \leq b_i \quad (5.7b)$$

$$b := 3500 \text{ mm}$$

$$b_1 := \frac{(b - b_w)}{2} = 1425 \text{ mm} \quad b_2 := b_1$$

$$l_1 := 30000 \text{ mm}$$

$$l_0 := 30000 \text{ mm} = 30000 \text{ mm}$$

$$b_w := 650 \text{ mm}$$

$$b_{eff,1.2} := (0,2 \cdot b_1 + 0,1 \cdot l_0) \cdot 2 = 6570 \text{ mm} \quad 0,2 \cdot l_0 = 6000 \text{ mm}$$

$$b_{eff,1.2} = 6570 \text{ mm} \quad b_1 = 1425 \text{ mm} \quad \text{b.eff ikke mindre enn } b_1, \text{ b.eff.1.2} = b_1$$

$$b_{eff,1} := b_1$$

$$b_{eff} := b_{eff,1} + b_w = 2075 \text{ mm} \quad \text{Mindre enn } b - \text{OK}$$

Nødvendig armering

$$A_s := \frac{M_{Ed}}{\left(d - \frac{t}{2}\right) \cdot f_{yd}} = 28154,3 \text{ mm}^2$$

Strekkarmering

$$A_{\sigma,h} := \pi \cdot \left(\frac{\sigma_h}{2}\right)^2 = 804,25 \text{ mm}^2$$

$$A_{\sigma,b} := \pi \cdot \left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 = 113,1 \text{ mm}^2$$

$$n := \frac{A_s}{A_{\sigma,h}} = 35,01 \quad \text{Velger } 42 \text{ } \varnothing 32, 7 \text{ lag}$$

$$A_{s,nødvendig} := 42 \cdot A_{\sigma,h} = 33778,4 \text{ mm}^2$$

Nødvendig minimumsarmering [9.2.1.1(1)]

$$b_t := b_w = 650 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} := 3.8 \frac{N}{mm^2} \quad [\text{Tabell 3.1}]$$

$$A_{s,min} := 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d = 1772.47 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min2} := 0.0013 \cdot b_t \cdot d = 1166.1 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} > A_{s,min2} \text{ OK}$$

Største armeringsareal (NA.9.1N)

$$A_c := h \cdot b_w = 975000 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,max} := 0.04 \cdot A_c = 39000 \text{ mm}^2 > A_{s,nødvendig} \text{ OK}$$

$$b_{nødvendig} := \phi_h \cdot 6 + C_{nom} \cdot 2 + a_h \cdot 5 = 632 \text{ mm} \quad \text{Det er plass til 6 jern i bredden}$$

Vertikal avstand - Vi har $h = 1500 \text{ mm}$, det er plass.

Tyngdepunkt valgt armering

$$d_{ny} := h - C_{nom} - \phi_b - \phi_h - a_v - \phi_h - a_v - \phi_h - a_v - \frac{\phi_h}{2} = 1220 \text{ mm}$$

Momentkapasitet

$$M_{Rd,ny} := f_{yd} \cdot A_{s,nødvendig} \cdot \left(d_{ny} - \frac{t}{2} \right) = 15347.14 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kontroll spenning i trykksone

$$(M_{Rd2} := f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot t \cdot \left(d_{ny} - \frac{t}{2} \right) = 19352.75 \text{ kN} \cdot \text{m})$$

$$\sigma_{cd} := \frac{M_{Rd,ny}}{t \cdot b_{eff} \cdot \left(d - \frac{t}{2} \right)} = 17.54 \frac{N}{mm^2} < \text{enn } f_{cd} - \text{OK}$$

Utnyttelse

$$\text{Utnyttelse} := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd,ny}} = 0.96 < 1 - \text{OK}$$

Beregning av midtbjelke - Eksempel 2

LM1 i begge felt + LM3 boggi 1 i felt 2

$$p_b := 94.04 \text{ kN} \cdot \gamma_Q \quad p := 282.55 \text{ kN} \cdot \gamma_Q \quad q := 5.465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \gamma_Q \quad l := 30 \text{ m}$$

$$g_{Ed} = 44.21 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$n_b := 18$ $n =$ antall boggilaster, akslinger - 18 stk på LM3 Boggi 1

$$\sum F_y = (a_y + b_y - p - p_b \cdot n_b - q \cdot l) = V_a := \frac{(p + p_b \cdot n_b + q \cdot l)}{2}$$

Sentrisk plassering - $a_y = b_y = V_a = V_b$

$$V_a := \frac{(p + p_b \cdot n_b + (q + g_{Ed}) \cdot l)}{2} = 2107.16 \text{ kN}$$

Lengder - Skjærberegning

$$l_{V_a.til.V_1} := 2250 \text{ mm} \quad l_{V_1.til.V_2} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_2.til.V_3} := 1500 \text{ mm}$$

$$l_{V_3.til.V_4} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_4.til.V_5} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_5.til.V_6} := 1500 \text{ mm}$$

$$l_{V_6.til.V_7} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_7.til.V_8} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_8.til.V_9} := 1500 \text{ mm}$$

$$l_{V_9.til.V_0} := 750 \text{ mm}$$

Skjærkrefter Regner V_x til $V = 0$.

$$V_{1_1} := (V_a - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V_a.til.V_1}) = 1991.08 \text{ kN}$$

$$V_{1_2} := V_{1_1} - p_b = 1864.13 \text{ kN}$$

$$V_{2_1} := V_{1_2} - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V_1.til.V_2} = 1786.74 \text{ kN}$$

$$V_{2_2} := V_{2_1} - p_b = 1659.79 \text{ kN}$$

$$V_{3_1} := V_{2_2} - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V_2.til.V_3} = 1582.4 \text{ kN}$$

$$V_{3_2} := V_{3_1} - p_b = 1455.45 \text{ kN}$$

$$V_{4_1} := V_{3_2} - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V_3.til.V_4} = 1378.06 \text{ kN}$$

$$V_{4_2} := V_{4_1} - p_b = 1251.11 \text{ kN}$$

$$V_{5_1} := V_{4_2} - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V_4.til.V_5} = 1173.73 \text{ kN}$$

$$V_{5_2} := V_{5_1} - p_b = 1046.77 \text{ kN}$$

$$V_{6_1} := V_{5_2} - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V_5.til.V_6} = 969.39 \text{ kN}$$

$$V_{6_2} := V_{6_1} - p_b = 842.43 \text{ kN}$$

$$V7_1 := V6_2 - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V6.til.V7} = 765.05 \text{ kN}$$

$$V7_2 := V7_1 - p_b = 638.09 \text{ kN}$$

$$V8_1 := V7_2 - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V7.til.V8} = 560.71 \text{ kN}$$

$$V8_2 := V8_1 - p_b = 433.75 \text{ kN}$$

$$V9_1 := V8_2 - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V8.til.V9} = 356.37 \text{ kN}$$

$$V9_2 := V9_1 - p_b = 229.41 \text{ kN}$$

$$V0_1 := V9_2 - (q + g_{Ed}) \cdot l_{V9.til.V0} = 190.72 \text{ kN}$$

Feltmoment

$$M_{felt1.2} := \frac{(V_a + V1_1)}{2} \cdot l_{V_a.til.V1} + \frac{(V1_2 + V2_1)}{2} \cdot l_{V1.til.V2}$$

$$M_{felt3.4} := \frac{(V2_2 + V3_1)}{2} \cdot l_{V2.til.V3} + \frac{(V3_2 + V4_1)}{2} \cdot l_{V3.til.V4}$$

$$M_{felt5.6} := \frac{(V4_2 + V5_1)}{2} \cdot l_{V4.til.V5} + \frac{(V5_2 + V6_1)}{2} \cdot l_{V5.til.V6}$$

$$M_{felt7.8} := \frac{(V6_2 + V7_1)}{2} \cdot l_{V6.til.V7} + \frac{(V7_2 + V8_1)}{2} \cdot l_{V7.til.V8}$$

$$M_{felt9.0} := \frac{(V8_2 + V9_1)}{2} \cdot l_{V8.til.V9} + \frac{(V9_2 + V0_1)}{2} \cdot l_{V9.til.V0}$$

$$M_{felt} := M_{felt1.2} + M_{felt3.4} + M_{felt5.6} + M_{felt7.8} + M_{felt9.0} = 18091.06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed} := M_{felt} \quad M_{Ed} = 18091.06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Nødvendig armering

$$A_s := \frac{M_{Ed}}{\left(d - \frac{t}{2}\right) \cdot f_{yd}} = 34530.65 \text{ mm}^2 \quad \frac{A_s}{A_{s,h}} = 42.94 \quad \text{Velger 54 stk i 9 lag } \varnothing 32$$

$$A_{s,nødvendig} := 54 \cdot A_{s,h} = 43429.38 \text{ mm}^2$$

Tyngdepunkt valgt armering

$$d_{n\ddot{y}2} := h - C_{nom} - \varnothing_b - \varnothing_h - a_v - \varnothing_h - a_v - \varnothing_h - a_v - \varnothing_h - a_v - \frac{\varnothing_h}{2} = 1156 \text{ mm}$$

Nødvendig minimumsarmering [9.2.1.1(1)]

$$b_t := b_w = 650 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} := 3.8 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad [\text{Tabell 3.1}]$$

$$A_{s,min} := 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d_{ny2} = 1484.77 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min2} := 0.0013 \cdot b_t \cdot d_{ny2} = 976.82 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} > A_{s,min2} \text{ OK}$$

Største armeringsareal (NA.9.1N)

$$A_c := h \cdot b_w = 975000 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,max} := 0.04 \cdot A_c = 39000 \text{ mm}^2 > A_{s,nødvendig} \text{ OK}$$

Momentkapasitet

$$M_{Rd,ny2} := f_{yd} \cdot A_{s,nødvendig} \cdot \left(d_{ny2} - \frac{t}{2} \right) = 18523.57 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kontroll spenning i trykksone

$$(M_{Rd2} := f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot t \cdot \left(d_{ny2} - \frac{t}{2} \right) = 18167.51 \text{ kN} \cdot \text{m})$$

$$\sigma_{cd} := \frac{M_{Rd,ny2}}{t \cdot b_{eff} \cdot \left(d - \frac{t}{2} \right)} = 21.17 \frac{N}{\text{mm}^2} < \text{enn } f_{cd} \text{ - OK}$$

Utnyttelse

$$Utnyttelse := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd,ny2}} = 0.98 < 1 \text{ - OK}$$

8.5 Vedlegg E

8.5.1 Sammenligning av beregninger

Sammenligning av resultat med lastberegning i Excel

Midtbjelke
LM1 i begge felt

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

$$P := 706.38 \text{ kN}$$

Moment fra punktlast, midtplassert

$$M_p := \frac{(P \cdot L_s)}{4} = 5297.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$q := 17.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 17.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Feltmoment fra jevnt fordelt last

$$M_{felt} := \frac{((q) \cdot L_s^2)}{8} = 1944 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dimensjonerende moment

$$M_{Ed} := M_p + M_{felt} = 7241.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Midtbjelke
LM1 i begge felt + LM3 boggi 1 i felt 2

$$p_b := 94.04 \text{ kN} \quad p := 282.55 \text{ kN} \quad q := 5.465 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad l := 30 \text{ m}$$

$n_b := 18$ $n =$ antall boggilaster, akslinger - 18 stk på LM3 Boggi 1

$$\sum F_y = (a_y + b_y - p - p_b \cdot n_b - q \cdot l) = V_a := \frac{(p + p_b \cdot n_b + q \cdot l)}{2}$$

Sentrisk plassering - $a_y = b_y = V_a = V_b$

$$V_a := \frac{(p + p_b \cdot n_b + (q) \cdot l)}{2} = 1069.61 \text{ kN}$$

Lengder - Skjærberegning

$$l_{V_a.til.V_1} := 2250 \text{ mm} \quad l_{V_1.til.V_2} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_2.til.V_3} := 1500 \text{ mm}$$

$$l_{V_3.til.V_4} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_4.til.V_5} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_5.til.V_6} := 1500 \text{ mm}$$

$$l_{V_6.til.V_7} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_7.til.V_8} := 1500 \text{ mm} \quad l_{V_8.til.V_9} := 1500 \text{ mm}$$

$$l_{V_9.til.V_0} := 750 \text{ mm}$$

Skjærkrefter Regner V_x til $V = 0$.

$$V_{1_1} := (V_a - (q) \cdot l_{V_a.til.V_1}) = 1057.31 \text{ kN}$$

$$V_{1_2} := V_{1_1} - p_b = 963.27 \text{ kN}$$

$$V_{2_1} := V_{1_2} - (q) \cdot l_{V_1.til.V_2} = 955.08 \text{ kN}$$

$$V_{2_2} := V_{2_1} - p_b = 861.04 \text{ kN}$$

$$V_{3_1} := V_{2_2} - (q) \cdot l_{V_2.til.V_3} = 852.84 \text{ kN}$$

$$V_{3_2} := V_{3_1} - p_b = 758.8 \text{ kN}$$

$$V_{4_1} := V_{3_2} - (q) \cdot l_{V_3.til.V_4} = 750.6 \text{ kN}$$

$$V_{4_2} := V_{4_1} - p_b = 656.56 \text{ kN}$$

$$V_{5_1} := V_{4_2} - (q) \cdot l_{V_4.til.V_5} = 648.36 \text{ kN}$$

$$V_{5_2} := V_{5_1} - p_b = 554.32 \text{ kN}$$

$$V_{6_1} := V_{5_2} - (q) \cdot l_{V_5.til.V_6} = 546.13 \text{ kN}$$

$$V_{6_2} := V_{6_1} - p_b = 452.09 \text{ kN}$$

$$V7_1 := V6_2 - q \cdot l_{V6.til.V7} = 443.89 \text{ kN}$$

$$V7_2 := V7_1 - p_b = 349.85 \text{ kN}$$

$$V8_1 := V7_2 - (q) \cdot l_{V7.til.V8} = 341.65 \text{ kN}$$

$$V8_2 := V8_1 - p_b = 247.61 \text{ kN}$$

$$V9_1 := V8_2 - (q) \cdot l_{V8.til.V9} = 239.41 \text{ kN}$$

$$V9_2 := V9_1 - p_b = 145.37 \text{ kN}$$

$$V0_1 := V9_2 - (q) \cdot l_{V9.til.V0} = 141.28 \text{ kN}$$

Feltmoment

$$M_{felt1.2} := \frac{(V_a + V1_1)}{2} \cdot l_{V1.til.V2} + \frac{(V1_2 + V2_1)}{2} \cdot l_{V1.til.V2}$$

$$M_{felt3.4} := \frac{(V2_2 + V3_1)}{2} \cdot l_{V2.til.V3} + \frac{(V3_2 + V4_1)}{2} \cdot l_{V3.til.V4}$$

$$M_{felt5.6} := \frac{(V4_2 + V5_1)}{2} \cdot l_{V4.til.V5} + \frac{(V5_2 + V6_1)}{2} \cdot l_{V5.til.V6}$$

$$M_{felt7.8} := \frac{(V6_2 + V7_1)}{2} \cdot l_{V6.til.V7} + \frac{(V7_2 + V8_1)}{2} \cdot l_{V7.til.V8}$$

$$M_{felt9.0} := \frac{(V8_2 + V9_1)}{2} \cdot l_{V8.til.V9} + \frac{(V9_2 + V0_1)}{2} \cdot l_{V9.til.V0}$$

$$M_{felt} := M_{felt1.2} + M_{felt3.4} + M_{felt5.6} + M_{felt7.8} + M_{felt9.0} = 9716.41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed} := M_{felt} \quad M_{Ed} = 9716.41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

8.6 Vedlegg F

8.6.1 Resultater av beregninger i Excel for bjelkebro

F.1 Bjelkebro – 1 spenn - Feltmoment

Resultat 1 spenn bjelkebro feltmoment

LM1	
Lengde	Mfelt
0	0
3	549,225
6	1137,33
9	1764,315
12	2430,18
15	3134,925
18	3878,55
21	4661,055
24	5482,44
27	6342,705
30	7241,85
33	8179,875
36	9156,78
39	10172,57
42	11227,23
45	12320,78
48	13453,2
51	14624,51
54	15834,69
57	17083,76
60	18371,7
63	19698,53
66	21064,23
69	22468,82
72	23912,28
75	25394,63
78	26915,85
81	28475,96
84	30074,94
87	31712,81
90	33389,55
93	35105,18
96	36859,68
99	38653,07
102	40485,33

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
lengde	Mfelt
0	0
3	288,598125
6	730,5675
9	1325,908125
12	2593,275
15	2976,703125
18	4032,1575
21	5240,983125
24	6603,18
27	8118,748125
30	9717,15
33	11327,84813
36	12950,8425
39	14586,13313
42	16233,72
45	17893,60313
48	19565,7825
51	21250,25813
54	22947,03
57	24656,09813
60	26377,4625
63	28111,12313
66	29857,08
69	31615,33313
72	33385,8825
75	35168,72813
78	36963,87
81	38771,30813
84	40591,0425
87	42423,07313
90	44267,4
93	46124,02313
96	47992,9425
99	49874,15813
102	51767,67

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
lengde	Mfelt
12	0
13,5	1148,64328
16,5	1633,64953
19,5	2272,02703
22,5	3063,77578
25,5	4008,89578
28,5	5107,38703
31,5	6359,24953
34,5	7764,48328
37,5	9323,08828
40,5	11035,0645
43,5	12900,412
46,5	14919,1308
49,5	17091,2208
52,5	19416,682
55,5	21895,5145
58,5	24457,1808
61,5	27031,1433
64,5	29617,402
67,5	32215,957
70,5	34826,8083
73,5	37449,9558
76,5	40085,3995
79,5	42733,1395
82,5	45393,1758
85,5	48065,5083
88,5	50750,137
91,5	53447,062
94,5	56156,2833
97,5	58877,8008
100,5	61611,6145

lengde = lengde spenn

LM3 - 1 vogn stengt for annen trafikk	
lengde	Mfelt
0	0
3	104,145
6	416,58
9	937,305
12	1666,32
15	2603,625
18	3749,22
21	5103,105
24	6665,28
27	8435,745
30	10310,355
33	12184,965
36	14059,575
39	15934,185
42	17808,795
45	19683,405
48	21558,015
51	23432,625
54	25307,235
57	27181,845
60	29056,455
63	30931,065
66	32805,675
69	34680,285
72	36554,895
75	38429,505
78	40304,115
81	42178,725
84	44053,335
87	45927,945
90	47802,555
93	49677,165
96	51551,775
99	53426,385
102	55300,995

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
lengde	Mfelt
12	0
13,5	104,145
16,5	416,58
19,5	937,305
22,5	1666,32
25,5	2603,625
28,5	3749,22
31,5	5103,105
34,5	6665,28
37,5	8435,745
40,5	10414,5
43,5	12601,545
46,5	14996,88
49,5	17600,505
52,5	20412,42
55,5	23432,625
58,5	26556,975
61,5	29681,325
64,5	32805,675
67,5	35930,025
70,5	39054,375
73,5	42178,725
76,5	45303,075
79,5	48427,425
82,5	51551,775
85,5	54676,125
88,5	57800,475
91,5	60924,825
94,5	64049,175
97,5	67173,525
100,5	70297,875

F.2 Bjelkebro – 2 spenn – Støttemoment

Resultat 2 spenn bjelkebro, støttemoment LM3 midtplassert over opplegg B

LM1		LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk		LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk		LM3 - 1 vogn stengt for annen trafikk		LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB
0	0	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!
3	223,4072	1,5	42,3301875	1,5	42,3301875	1,5	0	1,5	0
6	485,6945	4,5	303,7393125	4,5	136,21275	4,5	247,344375	4,5	0
9	786,8617	7,5	692,068125	7,5	310,107563	7,5	663,924375	7,5	99,9792
12	1126,909	10,5	1233,768188	10,5	732,268156	10,5	1288,794375	10,5	548,353061
15	1505,836	13,5	1928,8395	13,5	1353,76294	13,5	2121,954375	13,5	1272,883333
18	1923,643	16,5	2638,247403	16,5	2152,71914	16,5	2958,126834	16,5	2241,269256
21	2380,331	19,5	3240,673538	19,5	3119,05896	19,5	3618,191416	19,5	3438,633728
24	2875,898	22,5	3764,769188	22,5	4247,59838	22,5	4144,450275	22,5	4857,3228
27	3410,345	25,5	4233,616835	25,5	5535,41813	25,5	4570,98351	25,5	6493,026332
30	3983,672	28,5	4663,93422	28,5	6980,75404	28,5	4922,474008	28,5	8343,139612
33	4595,879	31,5	5067,660054	31,5	8372,30594	31,5	5216,548661	31,5	10095,68878
36	5246,967	34,5	5453,400807	34,5	9647,79857	34,5	5465,914484	34,5	11658,7276
39	5936,934	37,5	5827,46172	37,5	10820,7972	37,5	5679,880839	37,5	13052,28456
42	6665,781	40,5	6194,543813	40,5	11905,5777	40,5	5865,388542	40,5	14297,43704
45	7433,508	43,5	6558,212308	43,5	12915,3626	43,5	6027,701462	43,5	15413,70767
48	8240,116	46,5	6921,214425	46,5	13861,7906	46,5	6170,875725	46,5	16418,28044
51	9085,603	49,5	7285,698205	49,5	14754,8762	49,5	6298,082805	49,5	17325,94091
54	9969,97	52,5	7653,365705	52,5	15603,1507	52,5	6411,835704	52,5	18149,28539
57	10893,22	55,5	8025,582036	55,5	16413,8575	55,5	6514,149934	55,5	18899,00829
60	11855,34	58,5	8403,454195	58,5	17193,1467	58,5	6606,659922	58,5	19584,18994
63	12856,35	61,5	8787,888941	61,5	17946,2507	61,5	6690,704452	61,5	20212,55577
66	13896,24	64,5	9179,635867	64,5	18677,6352	64,5	6767,390258	64,5	20790,69897
69	14975,01	67,5	9579,319875	67,5	19391,1253	67,5	6837,639975	67,5	21324,26733
72	16092,65	70,5	9987,46596	70,5	20090,011	70,5	6902,228733	70,5	21818,1182
75	17249,18	73,5	10404,51834	73,5	20777,1334	73,5	6961,812392	73,5	22276,44633
78	18444,59	76,5	10830,85535	76,5	21454,9561	76,5	7016,949557	76,5	22702,88927
81	19678,88	79,5	11266,80121	79,5	22125,6243	79,5	7068,118903	79,5	23100,61415
84	20952,04	82,5	11712,6353	82,5	22791,0131	82,5	7115,732946	82,5	23472,38945
87	22264,09	85,5	12168,59968	85,5	23452,7679	85,5	7160,149056	85,5	23820,64446
90	23615,02	88,5	12634,90508	88,5	24112,3376	88,5	7201,678359	88,5	24147,51864
93	25004,82	91,5	13111,73579	91,5	24771,003	91,5	7240,592961	91,5	24454,90292
96	26433,51	94,5	13599,25369	94,5	25429,9	94,5	7277,131875	94,5	24744,47415
99	27901,08	97,5	14097,60155	97,5	26090,0388	97,5	7311,505887	97,5	25017,72422
102	29407,53	100,5	14606,90576	100,5	26752,3213	100,5	7343,901603	100,5	25275,98454

Resultat 2 spenn bjelkebro, støttemoment LM3 midtplassert i spenn AB

LM1	
Lengde	MstøtteB
0	0
3	223,4072
6	485,6945
9	786,8617
12	1126,909
15	1505,836
18	1923,643
21	2380,331
24	2875,898
27	3410,345
30	3983,672
33	4595,879
36	5246,967
39	5936,934
42	6665,781
45	7433,508
48	8240,116
51	9085,603
54	9969,97
57	10893,22
60	11855,34
63	12856,35
66	13896,24
69	14975,01
72	16092,65
75	17249,18
78	18444,59
81	19678,88
84	20952,04
87	22264,09
90	23615,02
93	25004,82
96	26433,51
99	27901,08
102	29407,53

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	42,3301875
4,5	206,75025
7,5	454,0040625
10,5	784,091625
13,5	1197,012938
16,5	1692,768
19,5	2271,356813
22,5	2932,779375
25,5	3677,035688
28,5	4504,12575
31,5	5313,281705
34,5	6112,389734
37,5	6906,812438
40,5	7700,3235
43,5	8495,655588
46,5	9294,836165
49,5	10099,40119
52,5	10910,53554
55,5	11729,1679
58,5	12556,03647
61,5	13391,7354
64,5	14236,7483
67,5	15091,47281
70,5	15956,23889
73,5	16831,32261
76,5	17716,95675
79,5	18613,33896
82,5	19520,63813
85,5	20438,99944
88,5	21368,5484
91,5	22309,39405
94,5	23261,63159
97,5	24225,3445
100,5	25200,60628

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	523,31145
15	826,545563
18	1250,89155
21	1790,19004
24	2441,36134
27	3202,69451
30	4073,163
33	5052,11353
36	6139,1106
39	7333,85269
42	8636,12445
45	10045,7679
48	11562,6647
51	13186,7242
54	14917,8759
57	16756,0643
60	18581,1369
63	20398,484
66	22212,5156
69	24026,8749
72	25844,5976
75	27668,2341
78	29499,9421
81	31341,5598
84	33194,6628
87	35060,6093
90	36940,5765
93	38835,5896
96	40746,5458
99	42674,2333
102	44619,3479

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	0
4,5	104,145
7,5	312,435
10,5	624,87
13,5	1041,45
16,5	1562,175
19,5	2187,045
22,5	2916,06
25,5	3749,22
28,5	4686,525
31,5	5579,196429
34,5	6438,877826
37,5	7273,4868
40,5	8088,595
43,5	8888,237069
46,5	9675,406452
49,5	10452,37091
52,5	11220,87986
55,5	11982,30446
58,5	12737,73462
61,5	13488,04756
64,5	14233,95733
67,5	14976,051
70,5	15714,81574
73,5	16450,65918
76,5	17183,925
79,5	17914,905
82,5	18643,84855
85,5	19370,97
88,5	20096,45466
91,5	20820,46352
94,5	21543,13714
97,5	22264,59877
100,5	22984,95694

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	0
15	140,59575
18	403,561875
21	781,0875
24	1269,267188
27	1865,93125
30	2569,777875
33	3379,978636
36	4295,98125
39	5317,403365
42	6443,971875
45	7675,4865
48	9011,797031
51	10452,7886
54	11998,37188
57	13648,47632
60	15250,73344
63	16811,97857
66	18337,80426
69	19832,83043
72	21300,90703
75	22745,268
78	24168,64976
81	25573,38333
84	26961,46674
87	28334,62241
90	29694,34313
93	31041,92903
96	32378,51777
99	33705,10909
102	35022,58511

F.3 Bjelkebro – 2 spenn – Feltmoment

Resultat 2 spenn bjelkebro, feltmoment

LM1	
Lengde	Mfelt
0	#DIV/0!
3	445,0303
6	919,2206
9	1422,571
12	1955,081
15	2516,752
18	3107,582
21	3727,572
24	4376,723
27	5055,033
30	5762,503
33	6499,133
36	7264,924
39	8059,874
42	8883,984
45	9737,255
48	10619,69
51	11531,28
54	12472,03
57	13441,94
60	14441,01
63	15469,24
66	16526,63
69	17613,18
72	18728,89
75	19873,76
78	21047,79
81	22250,98
84	23483,33
87	24744,84
90	26035,51
93	27355,34
96	28704,33
99	30082,48
102	31489,79

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
0		0
1,5	87,24222656	
4,5	374,4495703	
7,5	776,6853516	
10,5	1293,94957	
13,5	1926,242227	
16,5	2673,56332	
19,5	3535,912852	
22,5	4675,509621	
25,5	5599,28989	
28,5	6816,337734	
31,5	8055,318511	
34,5	9313,087811	
37,5	10587,45697	
40,5	11876,85638	
43,5	13180,1315	
46,5	14496,41433	
49,5	15825,03989	
52,5	17165,49013	
55,5	18517,3556	
58,5	19880,30836	
61,5	21254,08271	
64,5	22638,46111	
67,5	24033,26372	
70,5	25438,34061	
73,5	26853,56576	
76,5	28278,83251	
79,5	29714,04996	
82,5	31159,14017	
85,5	32614,03594	
88,5	34078,67899	
91,5	35553,01858	
94,5	37037,01028	
97,5	38530,61506	
100,5	40033,79845	

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
12	762,493125	
15	718,25475	
18	1485,63141	
21	2013,13031	
24	2653,45336	
27	3407,33531	
30	4275,21703	
33	5257,37906	
36	6354,00844	
39	7450,42025	
42	8833,01709	
45	10355,5652	
48	11963,0291	
51	13707,9674	
54	15569,3617	
57	17545,7361	
60	19537,2834	
63	21543,5945	
66	23564,2581	
69	25598,8769	
72	27647,0769	
75	29708,51	
78	31785,2538	
81	33863,4916	
84	35969,6797	
87	38087,4348	
90	40216,6066	
93	42357,0539	
96	44508,6442	
99	46671,2543	
102	48844,7695	

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
0		0
1,5		0
4,5	173,575	
7,5	499,896	
10,5	981,9385714	
13,5	1620,033333	
16,5	2414,270455	
19,5	3364,684615	
22,5	4471,292	
25,5	5746,353529	
28,5	7191,486316	
31,5	8648,285816	
34,5	10114,4679	
37,5	11588,25581	
40,5	13068,26889	
43,5	14553,42787	
46,5	16042,8816	
49,5	17535,95231	
52,5	19032,09492	
55,5	20530,86687	
58,5	22031,90556	
61,5	23534,91137	
64,5	25039,63473	
67,5	26545,8662	
70,5	28053,4288	
73,5	29562,17202	
76,5	31071,96706	
79,5	32582,70311	
82,5	34094,28432	
85,5	35606,62737	
88,5	37119,65948	
91,5	38633,31685	
94,5	40147,54327	
97,5	41662,28905	
100,5	43177,51012	

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
12		0
15	194,230425	
18	557,6096875	
21	1082,364107	
24	1765,583203	
27	2606,035764	
30	3603,156638	
33	4756,672252	
36	6066,44625	
39	7532,410374	
42	9176,383326	
45	10980,3545	
48	12940,52477	
51	15056,88049	
54	17329,4146	
57	19758,12399	
60	22191,83496	
63	24630,64673	
66	27074,68754	
69	29537,80571	
72	32003,83986	
75	34472,82816	
78	36944,74548	
81	39419,52537	
84	41897,07521	
87	44377,28663	
90	46860,04275	
93	49345,22313	
96	51832,70715	
99	54322,37628	
102	56814,11554	

F.4 Bjelkebro – 3 spenn – Støttemoment

**Resultat 3 spenn bjelkebro,
støttemoment LM3 midtplassert over opplegg B**

LM1		LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk		LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk		LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk		LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB
0	0	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!
3	235,709	1,5	69,6353875	1,5	44,9472625	1,5	36,45075	1,5	0
6	507,7061	4,5	299,8072875	4,5	143,449163	4,5	230,85475	4,5	0
9	815,9911	7,5	673,1256875	7,5	312,114763	7,5	619,66275	7,5	86,64864
12	1160,564	10,5	1189,590588	10,5	707,704299	10,5	1202,87475	10,5	491,3943673
15	1541,425	13,5	1849,201988	13,5	1291,56386	13,5	1980,49075	13,5	1157,166667
18	1958,574	16,5	2535,135797	16,5	1968,29994	16,5	2780,025973	16,5	1943,121917
21	2412,011	19,5	3131,899406	19,5	2951,77835	19,5	3430,961507	19,5	3165,022012
24	2901,736	22,5	3656,879588	22,5	4012,90586	22,5	3958,96803	22,5	4484,62256
27	3427,749	25,5	4128,778089	25,5	5223,31751	25,5	4391,657712	25,5	6007,68901
30	3990,05	28,5	4562,447277	28,5	6581,19731	28,5	4750,95931	28,5	7731,540166
33	4588,639	31,5	4968,98903	31,5	7911,09856	31,5	5053,264179	31,5	9397,137959
36	5223,516	34,5	5356,628135	34,5	9149,97888	34,5	5310,715793	34,5	10911,40355
39	5894,682	37,5	5731,500852	37,5	10301,7496	37,5	5532,374027	37,5	12280,11187
42	6602,135	40,5	6098,242088	40,5	11374,839	40,5	5725,082083	40,5	13515,70667
45	7345,876	43,5	6460,401401	43,5	12378,8122	43,5	5894,080702	43,5	14632,31058
48	8125,905	46,5	6820,734795	46,5	13322,9601	46,5	6043,438983	46,5	15643,64104
51	8942,222	49,5	7181,410333	49,5	14215,7577	49,5	6176,357957	49,5	16562,21091
54	9794,827	52,5	7544,154516	52,5	15064,7102	52,5	6295,386716	52,5	17399,10132
57	10683,72	55,5	7910,357824	55,5	15876,3679	55,5	6402,578231	55,5	18163,98346
60	11608,9	58,5	8281,151804	58,5	16656,4086	58,5	6499,603176	58,5	18865,24024
63	12570,37	61,5	8657,466127	61,5	17409,7411	61,5	6587,83416	61,5	19510,11912
66	13568,13	64,5	9040,071339	64,5	18140,6086	64,5	6668,408856	64,5	20104,88528
69	14602,17	67,5	9429,611288	67,5	18852,6846	67,5	6742,27787	67,5	20654,96213
72	15672,5	70,5	9826,627979	70,5	19549,1558	70,5	6810,241448	70,5	21165,05503
75	16779,13	73,5	10231,58085	73,5	20232,7951	73,5	6872,977922	73,5	21639,25764
78	17922,04	76,5	10644,86183	76,5	20906,0219	76,5	6931,065968	76,5	22081,14242
81	19101,23	79,5	11066,80728	79,5	21570,9547	79,5	6985,002184	79,5	22493,83698
84	20316,72	82,5	11497,70742	82,5	22229,4541	82,5	7035,21509	82,5	22880,08844
87	21568,49	85,5	11937,81401	85,5	22883,1596	85,5	7082,076368	85,5	23242,31756
90	22856,55	88,5	12387,34644	88,5	23533,5207	88,5	7125,909954	88,5	23582,66441
93	24180,9	91,5	12846,49678	91,5	24181,8228	91,5	7166,999447	91,5	23903,02678
96	25541,54	94,5	13315,43393	94,5	24829,2093	94,5	7205,594179	94,5	24205,09279
99	26938,46	97,5	13794,30693	97,5	25476,7001	97,5	7241,914226	97,5	24490,36845
102	28371,68	100,5	14283,24785	100,5	26125,208	100,5	7276,154573	100,5	24760,20115

Resultat 3 spenn bjelkebro, støttemoment LM3 midtplassert i spenn AB

LM1	
Lengde	MstøtteB
0	0
3	235,709
6	507,7061
9	815,9911
12	1160,564
15	1541,425
18	1958,574
21	2412,011
24	2901,736
27	3427,749
30	3990,05
33	4588,639
36	5223,516
39	5894,682
42	6602,135
45	7345,876
48	8125,905
51	8942,222
54	9794,827
57	10683,72
60	11608,9
63	12570,37
66	13568,13
69	14602,17
72	15672,5
75	16779,13
78	17922,04
81	19101,23
84	20316,72
87	21568,49
90	22856,55
93	24180,9
96	25541,54
99	26938,46
102	28371,68

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	44,9472625
4,5	218,6891625
7,5	479,1475625
10,5	826,3224625
13,5	1260,213863
16,5	1780,821763
19,5	2388,146163
22,5	3082,187063
25,5	3862,944463
28,5	4730,418363
31,5	5577,123048
34,5	6411,470445
37,5	7239,180663
40,5	8064,278963
43,5	8889,68019
46,5	9717,546972
49,5	10549,51766
52,5	11386,85613
55,5	12230,55299
58,5	13081,39563
61,5	13940,01782
64,5	14806,93542
67,5	15682,57256
70,5	16567,28121
73,5	17461,35584
76,5	18365,04476
79,5	19278,55879
82,5	20202,07806
85,5	21135,75746
88,5	22079,73085
91,5	23034,11455
94,5	23999,01009
97,5	24974,50652
100,5	25960,68226

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	439,9136
15	680,15725
18	1020,2844
21	1454,65205
24	1980,4387
27	2596,07685
30	3300,72005
33	4094,96447
36	4978,24686
39	5949,74288
42	7008,94028
45	8155,51105
48	9602,43215
51	10734,5853
54	12142,0242
57	13636,2195
60	15103,3063
63	16552,3773
66	17987,4521
69	19411,852
72	20828,3446
75	22239,2551
78	23646,551
81	25051,9085
84	26456,7643
87	27862,3572
90	29269,7607
93	30679,9098
96	32093,623
99	33511,6193
102	34934,5331

LM3 - 1 vogn stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	0
4,5	111,088
7,5	333,264
10,5	666,528
13,5	1110,88
16,5	1666,32
19,5	2332,848
22,5	3110,464
25,5	3999,168
28,5	4998,96
31,5	5951,142857
34,5	6868,136348
37,5	7758,38592
40,5	8627,834667
43,5	9480,786207
46,5	10320,43355
49,5	11149,19564
52,5	11968,93851
55,5	12781,12476
58,5	13586,91692
61,5	14387,25073
64,5	15182,88781
67,5	15974,4544
70,5	16762,47013
73,5	17547,3698
76,5	18329,52
79,5	19109,232
82,5	19886,77178
85,5	20662,368
88,5	21436,21831
91,5	22208,49443
94,5	22979,34629
97,5	23748,90535
100,5	24517,2874

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	0
15	149,9688
18	430,466
21	833,16
24	1353,885
27	1990,326667
30	2741,23526
33	3607,490992
36	4588,262264
39	5682,331964
42	6888,943786
45	8207,613449
48	9952,7905
51	11216,28437
54	12869,27908
57	14633,42068
60	16340,59351
63	18004,22234
66	19630,24228
69	21223,55665
72	22788,25192
75	24327,761
78	25844,98884
81	27342,41021
84	28822,14646
87	30286,02645
90	31735,63527
93	33172,35354
96	34597,38938
99	36011,80449
102	37416,53571

F.5 Bjelkebro – 3 spenn – Feltmoment

Resultat 3 spenn bjelkebro, feltmoment

LM1	
Lengde	Mfelt
0	0
3	439,38
6	909,864
9	1411,452
12	1944,144
15	2507,94
18	3102,84
21	3728,844
24	4385,952
27	5074,164
30	5793,48
33	6543,9
36	7325,424
39	8138,052
42	8981,784
45	9856,62
48	10762,56
51	11699,6
54	12667,75
57	13667
60	14697,36
63	15758,82
66	16851,38
69	17975,05
72	19129,82
75	20315,7
78	21532,68
81	22780,76
84	24059,95
87	25370,24
90	26711,64
93	28084,14
96	29487,74
99	30922,45
102	32388,26

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
Lengde	Mfelt
0	0
1,5	114,206625
4,5	223,8195
7,5	397,017625
10,5	563,271
13,5	793,109625
16,5	1016,0035
19,5	1302,482625
22,5	1582,017
25,5	1925,136625
28,5	2261,3115
31,5	2661,071625
34,5	3053,887
37,5	3510,287625
40,5	3948,885989
43,5	4472,784625
46,5	4972,876406
49,5	5548,562625
52,5	6115,297392
55,5	7326,604009
58,5	8559,469443
61,5	9811,107063
64,5	11079,54681
67,5	12363,35712
70,5	13661,473
73,5	14973,08593
76,5	16297,57113
79,5	17634,43825
82,5	18983,29704
85,5	20343,83312
88,5	21715,7904
91,5	23098,95815
94,5	24493,16142
97,5	25898,25374
100,5	27314,11158

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
Lengde	Mfelt
12	0
15	756,816
18	1060,9005
21	1471,6935
24	1992,0165
27	2623,28025
30	3366,2685
33	4221,4515
36	5189,1285
39	6119,35425
42	7371,54831
45	8776,74853
48	10233,8973
51	11836,1928
54	13561,0059
57	15399,0562
60	17350,3468
63	19317,822
66	21301,0452
69	23299,5776
72	25312,9957
75	27338,0725
78	29377,5027
81	31441,293
84	33517,3715
87	35606,7202
90	37708,4071
93	39822,2719
96	41948,1637
99	44085,9415
102	46235,4738

LM3 - 1 vogn stengt for annen trafikk	
Lengde	Mfelt
0	0
1,5	0
4,5	171,2606667
7,5	491,5644
10,5	964,0851429
13,5	1589,175556
16,5	2366,931818
19,5	3297,390923
22,5	4380,570133
25,5	5643,433765
28,5	7059,934737
31,5	8488,880204
34,5	9927,833762
37,5	11374,9002
40,5	12828,60681
43,5	14287,80239
46,5	15751,57904
49,5	17219,2138
52,5	18690,12525
55,5	20163,84133
58,5	21639,97527
61,5	23118,20747
64,5	24598,27171
67,5	26079,94461
70,5	27563,03739
73,5	29047,38948
76,5	30532,86353
79,5	32019,34132
82,5	33506,72061
85,5	34994,91253
88,5	36483,83945
91,5	37973,43331
94,5	39463,63415
97,5	40954,38899
100,5	42445,65079

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	Mfelt
12	0
15	0
18	#VERDI!
21	1072,105714
24	1746,22875
27	2574,481481
30	3556,219422
33	4690,581957
36	5977,419245
39	7424,750165
42	9044,15664
45	10816,47885
48	12633,55827
51	14807,2114
54	17038,32033
57	19422,54975
60	21810,43744
63	24211,95059
66	26628,11008
69	29047,24167
72	31469,48553
75	33894,88082
78	36323,39968
81	38754,97047
84	41189,49389
87	43626,85399
90	46066,92589
93	48509,58099
96	50954,69057
99	53402,12816
102	55851,77118

8.7 Vedlegg G

8.7.1 Resultater av beregninger i Excel for platebro

G.1 Platebro – 1 spenn – Feltmoment

Resultat 1 spenn platebro feltmoment

LM1	
Lengde	Mfelt
0	0
3	87,32625
6	182,64
9	285,9413
12	397,23
15	516,5063
18	643,77
21	779,0213
24	922,26
27	1073,486
30	1232,7
33	1399,901
36	1575,09
39	1758,266
42	1949,43
45	2148,581
48	2355,72
51	2570,846
54	2793,96
57	3025,061
60	3264,15
63	3511,226
66	3766,29
69	4029,341
72	4300,38
75	4579,406
78	4866,42
81	5161,421
84	5464,41
87	5775,386
90	6094,35
93	6421,301
96	6756,24
99	7099,166
102	7450,08

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
lengde	Mfelt
0	0
3	47,6325
6	123,87
9	228,7125
12	452,7
15	643,3575
18	831,6525
21	1110,48
24	1386,96
27	1692,0375
30	1984,6125
33	2280,7875
36	2580,5625
39	2883,9375
42	3190,9125
45	3501,4875
48	3815,6625
51	4133,4375
54	4454,8125
57	4779,7875
60	5108,3625
63	5440,5375
66	5776,3125
69	6115,6875
72	6458,6625
75	6805,2375
78	7155,4125
81	7509,1875
84	7866,5625
87	8227,5375
90	8592,1125
93	8960,2875
96	9332,0625
99	9707,4375
102	10086,4125

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
lengde	Mfelt
12	0
13,5	198,9375
16,5	287,775
19,5	405,2175
22,5	551,265
25,5	725,9175
28,5	929,175
31,5	1161,0375
34,5	1421,505
37,5	1710,575
40,5	2028,255
43,5	2374,5375
46,5	2749,425
49,5	3152,9175
52,5	3585,015
55,5	4045,7175
58,5	4522,5225
61,5	5002,9275
64,5	5486,9325
67,5	5974,5375
70,5	6465,7425
73,5	6960,5475
76,5	7458,9525
79,5	7960,9575
82,5	8466,5625
85,5	8975,7675
88,5	9488,5725
91,5	10004,9775
94,5	10524,9825
97,5	11048,5875
100,5	11575,7925

lengde = lengde spenn

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk	
lengde	Mfelt
0	0
3	12,5025
6	50,01
9	112,5225
12	200,04
15	312,5625
18	450,09
21	612,6225
24	800,16
27	1012,7025
30	1237,7475
33	1462,7925
36	1687,8375
39	1912,8825
42	2137,9275
45	2362,9725
48	2588,0175
51	2813,0625
54	3038,1075
57	3263,1525
60	3488,1975
63	3713,2425
66	3938,2875
69	4163,3325
72	4388,3775
75	4613,4225
78	4838,4675
81	5063,5125
84	5288,5575
87	5513,6025
90	5738,6475
93	5963,6925
96	6188,7375
99	6413,7825
102	6638,8275

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
lengde	Mfelt
12	0
13,5	12,5025
16,5	50,01
19,5	112,5225
22,5	200,04
25,5	312,5625
28,5	450,09
31,5	612,6225
34,5	800,16
37,5	1012,7025
40,5	1250,25
43,5	1512,8025
46,5	1800,36
49,5	2112,9225
52,5	2450,49
55,5	2813,0625
58,5	3188,1375
61,5	3563,2125
64,5	3938,2875
67,5	4313,3625
70,5	4688,4375
73,5	5063,5125
76,5	5438,5875
79,5	5813,6625
82,5	6188,7375
85,5	6563,8125
88,5	6938,8875
91,5	7313,9625
94,5	7689,0375
97,5	8064,1125
100,5	8439,1875

G.2 Platebro – 2 spenn – Støttemoment

**Resultat 2 spenn platebro,
støttemoment LM3 midtplassert over oppllegg B**

LM1		LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk		LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk		LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk		LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB	Lengde	MstøtteB
0	0	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!
3	36,07676	1,5	6,866025	1,5	6,866025	1,5	0	1,5	0
6	80,14103	4,5	52,9915125	4,5	23,298075	4,5	29,6934375	4,5	0
9	132,1928	7,5	123,0335625	7,5	55,332525	7,5	79,7034375	7,5	12,0024
12	192,2321	10,5	221,6806125	10,5	132,791665	10,5	154,7184375	10,5	65,8294898
15	260,2588	13,5	348,9326625	13,5	247,002558	13,5	254,7384375	13,5	152,8083333
18	336,2731	16,5	480,1463551	16,5	394,088341	16,5	355,1200801	16,5	269,0620661
21	420,2748	19,5	593,8184785	19,5	572,262763	19,5	434,3601535	19,5	412,8044379
24	512,2641	22,5	695,0273625	22,5	780,606975	22,5	497,5369875	22,5	583,1166
27	612,2409	25,5	787,8642881	25,5	1018,60355	25,5	548,7418631	25,5	779,4811246
30	720,2051	28,5	875,2924104	28,5	1285,93979	28,5	590,9379354	28,5	1001,585319
33	836,1569	31,5	959,4278196	31,5	1545,16357	31,5	626,2412946	31,5	1211,977041
36	960,0962	34,5	1041,79598	34,5	1785,23682	34,5	656,1774049	34,5	1399,618242
39	1092,023	37,5	1123,514471	37,5	2008,56395	37,5	681,8638455	37,5	1566,91332
42	1231,937	40,5	1205,416529	40,5	2217,67527	40,5	704,1338542	40,5	1716,392593
45	1379,839	43,5	1288,134078	43,5	2414,91446	43,5	723,6193531	43,5	1850,399732
48	1535,728	46,5	1372,154051	46,5	2602,34443	46,5	740,8072759	46,5	1970,997659
51	1699,605	49,5	1457,85718	49,5	2781,74019	49,5	756,0783549	49,5	2079,961364
54	1871,469	52,5	1545,545148	52,5	2954,6139	52,5	769,7342732	52,5	2178,80302
57	2051,321	55,5	1635,459916	55,5	3122,24941	55,5	782,0169912	55,5	2268,806483
60	2239,16	58,5	1727,797695	58,5	3285,73681	58,5	793,12272	58,5	2351,061834
63	2434,987	61,5	1822,719204	61,5	3446,00353	61,5	803,2121793	61,5	2426,496505
66	2638,801	64,5	1920,357306	64,5	3603,84108	64,5	812,4182313	64,5	2495,902001
69	2850,603	67,5	2020,822763	67,5	3759,92746	67,5	820,8516375	67,5	2559,956333
72	3070,392	70,5	2124,208626	70,5	3914,8458	70,5	828,6054514	70,5	2619,242621
75	3298,169	73,5	2230,593633	73,5	4069,09967	73,5	835,7584083	73,5	2674,264442
78	3533,933	76,5	2340,044843	76,5	4223,12575	76,5	842,3775681	76,5	2725,458478
81	3777,685	79,5	2452,61972	79,5	4377,30426	79,5	848,5203955	79,5	2773,204939
84	4029,424	82,5	2568,367787	82,5	4531,96756	82,5	854,2364123	82,5	2817,836182
87	4289,151	85,5	2687,331946	85,5	4687,40726	85,5	859,5685206	85,5	2859,643837
90	4556,865	88,5	2809,549546	88,5	4843,88022	88,5	864,5540706	88,5	2898,884746
93	4832,567	91,5	2935,053254	91,5	5001,61344	91,5	869,2257286	91,5	2935,785911
96	5116,256	94,5	3063,871763	94,5	5160,80821	94,5	873,6121875	94,5	2970,548639
99	5407,933	97,5	3196,030377	97,5	5321,64365	97,5	877,7387523	97,5	3003,35203
102	5707,597	100,5	3331,5515	100,5	5484,27959	100,5	881,6278246	100,5	3034,355914

Resultat 2 spenn platebro, støttemoment LM3 midtplassert i spenn AB

LM1	
Lengde	MstøtteB
0	0
3	36,07676
6	80,14103
9	132,1928
12	192,2321
15	260,2588
18	336,2731
21	420,2748
24	512,2641
27	612,2409
30	720,2051
33	836,1569
36	960,0962
39	1092,023
42	1231,937
45	1379,839
48	1535,728
51	1699,605
54	1871,469
57	2051,321
60	2239,16
63	2434,987
66	2638,801
69	2850,603
72	3070,392
75	3298,169
78	3533,933
81	3777,685
84	4029,424
87	4289,151
90	4556,865
93	4832,567
96	5116,256
99	5407,933
102	5707,597

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	6,866025
4,5	35,800575
7,5	80,837625
10,5	141,977175
13,5	219,219225
16,5	312,563775
19,5	422,010825
22,5	547,560375
25,5	689,212425
28,5	846,966975
31,5	1002,963311
34,5	1158,599227
37,5	1314,825225
40,5	1472,310175
43,5	1631,538432
46,5	1792,869356
49,5	1956,575189
52,5	2122,865946
55,5	2291,906236
58,5	2463,826898
61,5	2638,733245
64,5	2816,710994
67,5	2997,830625
70,5	3182,150622
73,5	3369,719919
76,5	3560,579775
79,5	3754,765221
82,5	3952,306193
85,5	4153,228425
88,5	4357,554161
91,5	4565,30273
94,5	4776,491004
97,5	4991,133779
100,5	5209,244085

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	80,1282
15	126,038625
18	190,239488
21	271,7931
24	370,230619
27	485,291575
30	616,819688
33	764,715505
36	928,912725
39	1109,36545
42	1306,04089
45	1518,915
48	1747,96975
51	1993,19136
54	2254,56909
57	2532,09448
60	2807,47584
63	3081,53376
66	3354,93962
69	3628,24802
72	3901,92115
75	4176,34725
78	4451,85481
81	4728,72368
84	5007,19372
87	5287,47169
90	5569,73681
93	5854,14516
96	6140,83331
99	6429,92129
102	6721,51498

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	0
4,5	12,5025
7,5	37,5075
10,5	75,015
13,5	125,025
16,5	187,5375
19,5	262,5525
22,5	350,07
25,5	450,09
28,5	562,6125
31,5	669,776857
34,5	772,9806522
37,5	873,1746
40,5	971,0275
43,5	1067,023707
46,5	1161,522581
49,5	1254,796364
52,5	1347,055071
55,5	1438,463311
58,5	1529,151923
61,5	1619,22622
64,5	1708,771919
67,5	1797,8595
70,5	1886,547447
73,5	1974,884694
76,5	2062,9125
79,5	2150,665896
82,5	2238,174818
85,5	2325,465
88,5	2412,558686
91,5	2499,475205
94,5	2586,231429
97,5	2672,842154
100,5	2759,32041

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	0
15	16,878375
18	48,4471875
21	93,76875
24	152,3742188
27	224,003125
30	308,4991875
33	405,7629545
36	515,728125
39	638,3487981
42	773,5921875
45	921,43425
48	1081,856953
51	1254,846507
54	1440,392188
57	1638,485526
60	1830,834844
63	2018,260714
66	2201,434517
69	2380,91087
72	2557,151953
75	2730,546
78	2901,421514
81	3070,058333
84	3236,696317
87	3401,542241
90	3564,775313
93	3726,551613
96	3887,007715
99	4046,263636
102	4204,425276

G.3 Platebro – 2 spenn – Feltmoment

Resultat 2 spenn platebro, feltmoment

LM1	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
3	70,70297
6	147,3966
9	230,0808
12	318,7556
15	413,4211
18	514,0772
21	620,7239
24	733,3613
27	851,9892
30	976,6078
33	1107,217
36	1243,817
39	1386,407
42	1534,988
45	1689,56
48	1850,123
51	2016,675
54	2189,219
57	2367,753
60	2552,278
63	2742,794
66	2939,3
69	3141,796
72	3350,284
75	3564,762
78	3785,23
81	4011,69
84	4244,139
87	4482,58
90	4727,011
93	4977,433
96	5233,845
99	5496,248
102	5764,642

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	0
1,5	13,8778125
4,5	62,4121875
7,5	132,4003125
10,5	223,8421875
13,5	336,7378125
16,5	471,0871875
19,5	626,8903125
22,5	804,1659581
25,5	1004,017941
28,5	1225,974967
31,5	1452,884923
34,5	1684,190476
37,5	1919,503692
40,5	2158,546366
43,5	2401,113857
46,5	2647,05232
49,5	2896,243884
52,5	3148,596733
55,5	3404,038288
58,5	3662,510425
61,5	3923,966051
64,5	4188,366607
67,5	4455,680217
70,5	4725,880305
73,5	4998,944538
76,5	5274,854007
79,5	5553,592603
82,5	5835,14651
85,5	6119,503816
88,5	6406,665099
91,5	6696,680762
94,5	6989,548944
97,5	7285,259759
100,5	7583,804637

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	129,9225
15	121,37115
18	261,875156
21	358,86
24	476,907891
27	616,149063
30	776,661656
33	958,495398
36	1161,68344
39	1379,73522
42	1636,9346
45	1914,54785
48	2215,29216
51	2539,65887
54	2885,50123
57	3252,78877
60	3623,83106
63	3998,55557
66	4376,8894
69	4758,76217
72	5144,10752
75	5532,86381
78	5925,11621
81	6321,10424
84	6721,16696
87	7124,34528
90	7530,61258
93	7939,9438
96	8352,3155
99	8767,70581
102	9186,0944

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	0
1,5	0
4,5	20,8375
7,5	60,012
10,5	117,8807143
13,5	194,4833333
16,5	289,8306818
19,5	403,9269231
22,5	536,774
25,5	689,8438235
28,5	863,3305263
31,5	1038,217806
34,5	1214,231456
37,5	1391,158176
40,5	1568,832222
43,5	1747,124028
46,5	1925,931415
49,5	2105,173017
52,5	2284,783396
55,5	2464,709425
58,5	2644,907574
61,5	2825,341874
64,5	3005,982363
67,5	3186,8039
70,5	3367,785238
73,5	3548,908307
76,5	3730,157647
79,5	3911,519955
82,5	4092,983722
85,5	4274,538947
88,5	4456,176895
91,5	4637,889903
94,5	4819,671224
97,5	5001,514896
100,5	5183,415625

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	0
15	23,3171625
18	66,94046875
21	129,9366964
24	211,9564453
27	312,8519097
30	432,5552438
33	571,0336054
36	728,270625
39	904,2581084
42	1101,615368
45	1318,18025
48	1553,496672
51	1807,562997
54	2080,378377
57	2371,942438
60	2664,106934
63	2956,883776
66	3250,288357
69	3545,983157
72	3842,028018
75	4138,42752
78	4435,178648
81	4732,273426
84	5029,700733
87	5327,447559
90	5625,499875
93	5923,843221
96	6222,463116
99	6521,345331
102	6820,476063

G.4 Platebro – 3 spenn – Støttemoment

**Resultat 3 spenn platebro,
støttemoment LM3 midtplassert over opplegg B**

LM1		LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk		LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk		LM3 - 1 vogn stengt for annen trafikk		LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	Mfelt	Lengde	Mfelt	Lengde	Mfelt	Lengde	Mfelt	Lengde	Mfelt
			#DIV/0!		#DIV/0!		#DIV/0!		#DIV/0!
0	0	0		0		0		0	
3	37,94938	1,5	11,639635	1,5	7,26376	1,5	4,375875	1,5	0
6	83,35376	4,5	52,025155	4,5	24,31128	4,5	27,713875	4,5	0
9	136,2131	7,5	119,108675	7,5	55,12088	7,5	74,389875	7,5	10,40208
12	196,5275	10,5	212,890195	10,5	127,477708	10,5	144,403875	10,5	58,99138776
15	264,2969	13,5	333,369715	13,5	234,530507	13,5	237,755875	13,5	138,9166667
18	339,5213	16,5	459,8406152	16,5	359,371145	16,5	333,7392552	16,5	233,2697851
21	422,2007	19,5	571,8322757	19,5	539,906513	19,5	411,8833957	19,5	379,9576331
24	512,335	22,5	672,426435	22,5	735,53072	22,5	475,270035	22,5	538,37432
27	609,9244	25,5	764,9379057	25,5	958,940799	25,5	527,2139857	25,5	721,2168789
30	714,9688	28,5	851,9992125	28,5	1209,81487	28,5	570,3477725	28,5	928,1634349
33	827,4682	31,5	935,5781207	31,5	1457,05569	31,5	606,6391607	31,5	1128,116735
36	947,4226	34,5	1017,132442	34,5	1689,48924	34,5	637,545962	34,5	1309,90276
39	1074,832	37,5	1097,749805	37,5	1907,80878	37,5	664,1558046	37,5	1474,214784
42	1209,696	40,5	1178,251728	40,5	2113,50819	40,5	687,2902083	40,5	1622,546667
45	1352,016	43,5	1259,267359	43,5	2308,28286	43,5	707,5783185	43,5	1756,593817
48	1501,79	46,5	1341,285186	46,5	2493,77956	46,5	725,5086263	46,5	1878,002997
51	1659,019	49,5	1424,689492	49,5	2671,50044	49,5	741,4654122	49,5	1988,276364
54	1823,704	52,5	1509,786292	52,5	2842,7758	52,5	755,7546921	52,5	2088,744196
57	1995,843	55,5	1596,822043	55,5	3008,76663	55,5	768,6229232	55,5	2180,567509
60	2175,438	58,5	1685,997308	58,5	3170,4793	58,5	780,2706679	58,5	2264,752663
63	2362,487	61,5	1777,476867	61,5	3328,78387	61,5	790,8627066	61,5	2342,169709
66	2556,991	64,5	1871,397296	64,5	3484,43245	64,5	800,5356159	64,5	2413,570773
69	2758,951	67,5	1967,872715	67,5	3638,07613	67,5	809,403515	67,5	2479,606933
72	2968,365	70,5	2066,999193	70,5	3790,27978	70,5	817,5624726	70,5	2540,84306
75	3185,235	73,5	2168,858162	73,5	3941,53484	73,5	825,0939216	73,5	2597,770596
78	3409,559	76,5	2273,519092	76,5	4092,27017	76,5	832,0673317	76,5	2650,818408
81	3641,338	79,5	2381,041599	79,5	4242,86125	79,5	838,5423189	79,5	2700,361965
84	3880,573	82,5	2491,477127	82,5	4393,63785	82,5	844,5703266	82,5	2746,731055
87	4127,262	85,5	2604,870295	85,5	4544,89061	85,5	850,1959747	85,5	2790,216288
90	4381,406	88,5	2721,259992	88,5	4696,87642	88,5	855,4581516	88,5	2831,074576
93	4643,006	91,5	2840,680263	91,5	4849,82311	91,5	860,3909029	91,5	2869,533749
96	4912,06	94,5	2963,161041	94,5	5003,93334	94,5	865,0241607	94,5	2905,796463
99	5188,57	97,5	3088,728745	97,5	5159,38791	97,5	869,3843451	97,5	2940,043512
102	5472,534	100,5	3217,406783	100,5	5316,34857	100,5	873,4948634	100,5	2972,43665

Resultat 3 spenn platebro, støttemoment LM3 midtplassert i spenn AB

LM1	
Lengde	MstøtteB
0	0
3	37,94938
6	83,35376
9	136,2131
12	196,5275
15	264,2969
18	339,5213
21	422,2007
24	512,335
27	609,9244
30	714,9688
33	827,4682
36	947,4226
39	1074,832
42	1209,696
45	1352,016
48	1501,79
51	1659,019
54	1823,704
57	1995,843
60	2175,438
63	2362,487
66	2556,991
69	2758,951
72	2968,365
75	3185,235
78	3409,559
81	3641,338
84	3880,573
87	4127,262
90	4381,406
93	4643,006
96	4912,06
99	5188,57
102	5472,534

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	6,866025
4,5	35,800575
7,5	80,837625
10,5	141,977175
13,5	219,219225
16,5	312,563775
19,5	422,010825
22,5	547,560375
25,5	689,212425
28,5	846,966975
31,5	1002,963311
34,5	1158,599227
37,5	1314,825225
40,5	1472,310175
43,5	1631,538432
46,5	1792,869356
49,5	1956,575189
52,5	2122,865946
55,5	2291,906236
58,5	2463,826898
61,5	2638,733245
64,5	2816,710994
67,5	2997,830625
70,5	3182,150622
73,5	3369,719919
76,5	3560,579775
79,5	3754,765221
82,5	3952,306193
85,5	4153,228425
88,5	4357,554161
91,5	4565,30273
94,5	4776,491004
97,5	4991,133779
100,5	5209,244085

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	81,63008
15	128,4412
18	194,28212
21	278,15264
24	379,55266
27	498,204347
30	633,95767
33	786,918299
36	956,9864
39	1144,01586
42	1347,91589
45	1568,62834
48	1843,90257
51	2064,71123
54	2335,63906
57	2623,26996
60	2907,42182
63	3189,70627
66	3470,83581
69	3751,39908
72	4031,88666
75	4312,71065
78	4594,21981
81	4876,71123
84	5160,43956
87	5445,62437
90	5732,45593
93	6021,1
96	6311,70161
99	6604,3882
102	6899,27226

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
0	#DIV/0!
1,5	0
4,5	13,336
7,5	40,008
10,5	80,016
13,5	133,36
16,5	200,04
19,5	280,056
22,5	373,408
25,5	480,096
28,5	600,12
31,5	714,4285714
34,5	824,5126957
37,5	931,38624
40,5	1035,762667
43,5	1138,158621
46,5	1238,957419
49,5	1338,449455
52,5	1436,858743
55,5	1534,360865
58,5	1631,095385
61,5	1727,174634
64,5	1822,690047
67,5	1917,7168
70,5	2012,317277
73,5	2106,543673
76,5	2200,44
79,5	2294,043623
82,5	2387,386473
85,5	2480,496
88,5	2573,395932
91,5	2666,106885
94,5	2758,646857
97,5	2851,031631
100,5	2943,275104

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk	
Lengde	MstøtteB
12	0
15	18,0036
18	51,677
21	100,02
24	162,5325
27	238,9366667
30	329,08247
33	433,0755785
36	550,8161597
39	682,1581006
42	827,0106071
45	985,3155422
48	1194,82225
51	1346,503388
54	1544,943701
57	1756,727083
60	1961,671423
63	2161,388351
66	2356,59037
69	2547,866119
72	2735,706175
75	2920,522654
78	3102,664294
81	3282,428188
84	3460,069001
87	3635,806287
90	3809,830332
93	3982,306881
96	4153,380966
99	4323,180043
102	4491,81658

G.5 Platebro – 3 spenn – Feltmoment

Resultat 3 spenn platebro, feltmoment

LM1	
Lengde	Mfelt
0	#DIV/0!
3	70,70297
6	147,3966
9	230,0808
12	318,7556
15	413,4211
18	514,0772
21	620,7239
24	733,3613
27	851,9892
30	976,6078
33	1107,217
36	1243,817
39	1386,407
42	1534,988
45	1689,56
48	1850,123
51	2016,675
54	2189,219
57	2367,753
60	2552,278
63	2742,794
66	2939,3
69	3141,796
72	3350,284
75	3564,762
78	3785,23
81	4011,69
84	4244,139
87	4482,58
90	4727,011
93	4977,433
96	5233,845
99	5496,248
102	5764,642

LM3 - 1 vogn åpent for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
0		0
1,5	13,8778125	
4,5	62,4121875	
7,5	132,4003125	
10,5	223,8421875	
13,5	336,7378125	
16,5	471,0871875	
19,5	626,8903125	
22,5	804,1659581	
25,5	1004,017941	
28,5	1225,974967	
31,5	1452,884923	
34,5	1684,190476	
37,5	1919,503692	
40,5	2158,546366	
43,5	2401,113857	
46,5	2647,05232	
49,5	2896,243884	
52,5	3148,596733	
55,5	3404,038288	
58,5	3662,510425	
61,5	3923,966051	
64,5	4188,366607	
67,5	4455,680217	
70,5	4725,880305	
73,5	4998,944538	
76,5	5274,854007	
79,5	5553,592603	
82,5	5835,14651	
85,5	6119,503816	
88,5	6406,665099	
91,5	6696,680762	
94,5	6989,548944	
97,5	7285,259759	
100,5	7583,804637	

LM3 - 2 vogner åpent for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
12	129,9225	
15	121,37115	
18	261,875156	
21	358,86	
24	476,907891	
27	616,149063	
30	776,661656	
33	958,495398	
36	1161,68344	
39	1379,73522	
42	1636,9346	
45	1914,54785	
48	2215,29216	
51	2539,65887	
54	2885,50123	
57	3252,78877	
60	3623,83106	
63	3998,55557	
66	4376,8894	
69	4758,76217	
72	5144,10752	
75	5532,86381	
78	5925,11621	
81	6321,10424	
84	6721,16696	
87	7124,34528	
90	7530,61258	
93	7939,9438	
96	8352,3155	
99	8767,70581	
102	9186,0944	

LM3 -1 vogn stengt for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
0		0
1,5		0
4,5	20,8375	
7,5	60,012	
10,5	117,8807143	
13,5	194,4833333	
16,5	289,8306818	
19,5	403,9269231	
22,5	536,774	
25,5	689,8438235	
28,5	863,3305263	
31,5	1038,217806	
34,5	1214,231456	
37,5	1391,158176	
40,5	1568,832222	
43,5	1747,124028	
46,5	1925,931415	
49,5	2105,173017	
52,5	2284,783396	
55,5	2464,709425	
58,5	2644,907574	
61,5	2825,341874	
64,5	3005,982363	
67,5	3186,8039	
70,5	3367,785238	
73,5	3548,908307	
76,5	3730,157647	
79,5	3911,519955	
82,5	4092,983722	
85,5	4274,538947	
88,5	4456,176895	
91,5	4637,889903	
94,5	4819,671224	
97,5	5001,514896	
100,5	5183,415625	

LM3 - 2 vogner stengt for annen trafikk		
Lengde	Mfelt	
12		0
15	23,3171625	
18	66,94046875	
21	129,9366964	
24	211,9564453	
27	312,8519097	
30	432,5552438	
33	571,0336054	
36	728,270625	
39	904,2581084	
42	1101,615368	
45	1318,18025	
48	1553,496672	
51	1807,562997	
54	2080,378377	
57	2371,942438	
60	2664,106934	
63	2956,883776	
66	3250,288357	
69	3545,983157	
72	3842,028018	
75	4138,42752	
78	4435,178648	
81	4732,273426	
84	5029,700733	
87	5327,447559	
90	5625,499875	
93	5923,843221	
96	6222,463116	
99	6521,345331	
102	6820,476063	