



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTETET

## BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/studieretning: Byggingeniør bachelor, konstruksjonsteknikk.	Vårsemesteret, 2023  Åpen / <del>Konfidensiell</del>
Forfatter: Jørgen Espedal & Simon Bø	<i>Jørgen Espedal Simon Bø</i> ..... Underskrift
Fagansvarlig: Mudiyan Nirosha Damayanthi Adasooriya  Veileder: Mudiyan Nirosha Damayanthi Adasooriya  Ekstern veileder: Christopher Schive	
Tittel på oppgaven: Dimensjonerende påkjøringslaster for klasse B-bærende konstruksjoner over jernbanen for toghastigheter $V > 120$ km/t  Engelsk tittel: Design impact loads for Class B-bearing structures over the railway for train speeds $V > 120$ km/h.	
Studiepoeng: 20	
Emneord: Påkjøringslaster, bærende konstruksjoner, Ansys-simulering, risikoanalyse, håndkalkulasjoner	Sidetall: 66 + vedlegg/annet: 12 Stavanger, 15.mai 2023

## **Forord**

Vi vil gjerne takke vår veileder Mudiyan Nirosha Damayanthi Adasooriya og Christopher Schive fra Bane NOR, for god veiledning og oppfølging som har vært til stor hjelp.

Vi vil også takke Adugna Deressa Akessa for hjelp med Ansys Workbench.

## Sammendrag

Togavsporinger kan forekomme, og for å beskytte bærende konstruksjoner over jernbanen mot togkollisjon, må påkjøringslaster dimensjoneres. Det er ventet at fremtidig togtrafikk vil øke, samt hastigheten til tog.

Hovedmålet med oppgaven er å dimensjonere påkjøringslaster for bærende konstruksjoner over jernbanen for toghastigheter  $> 120$  km/t.

En litteraturstudie av kjøretøyskollisjoner på broer gjennomføres, hvor det undersøkes hvilke feilmønstre som kan oppstå på en søyle.

Simuleringer av ulike togkollisjoner i Ansys workbench utføres, og i tillegg gjøres håndkalkulasjoner med ulike formler.

Resultatene fra simuleringene og håndkalkulasjonene sammenlignes, og gjennom en vurdering av resultatene fastsettes påkjøringslaster for ulike hastighetsgrupper. I tillegg gjøres en kvalitativ- og kvantitativ risikovurdering ved hjelp av rettleiding fra UIC Code 777-2 R og NS-EN 1991-1-7, hvor det blir konkludert at risikoen for togavsporinger i Norge er på et lavt nivå.

Til slutt, avsluttes oppgaven med diskusjon, og forslag til videre arbeid.

## **Abstract**

Train derailments can occur, and to protect load-bearing structures from train collision, impact loads must be designed. It is expected that future train traffic will increase, as well as train speeds.

The main objective is to design impact loads for load-bearing structures over the railway for train speeds  $> 120$  km/h.

A literature study of vehicle collisions on bridges, is being conducted to investigate which failure modes may occur on a column.

Simulations of various train collisions in Ansys Workbench are being performed, in addition, hand calculations are being made using different formulas.

The results of the simulations and hand calculations are being compared, and though an assessment of the results, impact loads are determined for different speed groups. In addition, a qualitative and quantitative risk assessment is being performed using guidance from UIC Code 777-2 R and NS-EN 1991-1-7, where it is concluded that the risk of train derailment in Norway is at a low level.

Finally, this study is concluded with a discussion and proposals for further work.

# Innholdsfortegnelse

<b>FORORD .....</b>	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>FIGURLISTE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>TABELLISTE .....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUKSJON.....</b>	<b>1</b>
<i>1.1 Bakgrunn og introduksjon .....</i>	<i>1</i>
<i>1.2 Problemstilling.....</i>	<i>2</i>
<i>1.3 Omfang og avgrensninger .....</i>	<i>2</i>
<i>1.4 Kapitteloversikt.....</i>	<i>3</i>
<b>2 BÆRENDE KONSTRUKSJON UTSATT FOR KOLLISJON – LITTERATURSTUDIE.....</b>	<b>4</b>
<i>2.1 Slagbelastning på søyle .....</i>	<i>5</i>
2.1.1 Brosøyle feilmodus.....	6
<i>2.2 Material .....</i>	<i>10</i>
2.2.1 Armert betong.....	10
2.2.2 Betong.....	11
2.2.3 Armeringsstål .....	11
<b>3 RAMMEBETINGELSER FOR DIMENSJONERING AV PÅKJØRINGSLASTER.....</b>	<b>12</b>
<i>3.1 Påkjøringslaster for klasse A- og klasse B-konstruksjoner .....</i>	<i>12</i>
<i>3.2 Klassifisering av konstruksjoner.....</i>	<i>13</i>
3.2.1 Soneinndeling.....	13
<i>3.4 Klasse B overbygg .....</i>	<i>15</i>
<i>3.3 Klasse A overbygg .....</i>	<i>15</i>
<i>3.5 Støtdynamikk.....</i>	<i>17</i>
<b>4 ANSYS-SIMULERING .....</b>	<b>19</b>
<i>4.1 Ingeniør data - material.....</i>	<i>19</i>
<i>4.2 Togmodeller .....</i>	<i>22</i>
4.2.1 Modell 1.....	23

4.2.2 Modell 2 versjon 1 .....	24
4.2.3 Modell 2 versjon 2 .....	25
4.3 Vegg- og søylemodell .....	25
4.4 Simuleringsoppsett .....	27
4.4.1- Geometry .....	27
4.5 Analyse innstillinger .....	28
4.6 Simuleringsresultater .....	29
4.7 Simuleringer – resultater og diskusjon .....	35
4.7.1 Simulering 1 og 2 .....	35
4.7.2 Simulering 3, 4 og 5 .....	35
4.7.3 Simulering 6, 7 og 8 .....	36
4.7.4 Simulering 9 .....	36
4.7.5 Simulering 10 og 11 .....	36
<b>5 HÅNDKALKULASJONER .....</b>	<b>37</b>
5.1 Kraft parallelt med spor .....	37
5.2 Kraft vinkelrett på spor .....	38
5.3 Støtdynamikk .....	40
<b>6 RISIKOANALYSE .....</b>	<b>42</b>
6.1 Kvalitativ risikoanalyse .....	42
6.1.1 togavsporing årsaker .....	42
6.1.2 Tillat toghastighet i Norge .....	43
6.1.3 Fremtidig trafikk .....	44
6.1.4 Ulykkessituasjon .....	44
6.1.5 Konsekvensklasser – ulykkessituasjon .....	44
6.1.6 Konsekvenser .....	45
6.2 Kvantitativ risikoanalyse .....	47
6.2.1 Sannsynlighetsregning for avsporing .....	47
6.2.3 Avsporingfrekvens .....	47
6.2.4 Sannsynlighet for at toget kolliderer med bærekonstruksjon .....	50
6.2.5 Sannsynlighet for at broen kollapse som et resultat av en kollisjon .....	51
6.2.6 Risikoevaluering .....	52
6.3 Forebyggende og beskyttende tiltak .....	53

6.3.1 Forebyggende og beskyttende tiltak for klasse B-konstruksjoner.....	53
6.3.2 Ekstra forebyggende og beskyttende tiltak.....	54
6.3.3 Bøyeinnretninger .....	54
6.3.4 Absorberende innretninger .....	54
<b>7 DIMENSJONERENDE PÅKJØRINGSLASTER FOR KLASSE B-KONSTRUKSJONER... 56</b>	
7.1 Sikkerhetsfaktor .....	57
7.2 Kraft parallelt med spor: 120 - 160 km/t.....	58
7.3 Kraft vinkelrett med spor: 120 - 160 km/t.....	58
7.4 Kraft parallelt med spor: 160 - 200 km/t.....	58
7.5 Kraft vinkelrett på spor: 160 - 200 km/t.....	59
7.6 Kraft parallelt med spor: 200 - 250 km/t.....	59
7.7 Kraft vinkelrett på spor: 200 - 250 km/t .....	59
<b>8 DATAPROGRAMMER..... 60</b>	
8.1 Ansys Workbench.....	60
8.2 SpaceClaim .....	60
8.2 MATLAB .....	60
<b>9 DISKUSJON..... 61</b>	
9.1 Simulering.....	61
9.2 Feilkilder.....	61
9.3 UIC Code 777-2 R .....	61
9.4 Påkjøringslast.....	62
<b>10 KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID ..... 63</b>	
10.1 konklusjon .....	63
10.2 Videre arbeid .....	63
<b>REFERANSER..... 64</b>	
<b>VEDLEGG..... 67</b>	

## Figurliste

Figur 1: Eschede Togulykke (McDonough, 2021) .....	1
Figur 2: Broer i Oslo kommune (lokalhistoriewiki.no, 2023) .....	4
Figur 3: Punching shear feilmodus, (V.DO, Pham, & Hao, Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact, 2019) .....	6
Figur 4: Punching shear feilmodus, (Texas Transportation Institute, 2010) .....	7
Figur 5: Forenklet skjærmodell for søyle, (V.DO, Pham, & Hao, Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact, 2019).....	7
Figur 6: Søyle med bøyesvikt (Zhang, Gholipour, & Mousavi, 2020).....	8
Figur 7: Søylesprekker. Tegnet i Paint .....	9
Figur 8: Skjærsvikt på søyle (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018).....	9
Figur 9: Fullstendig søylesvikt (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018).....	10
Figur 10: Appendix B-presentation of zones, Fig. 1 -Zone 1 (UIC, 2002, s. 20).....	14
Figur 11: Appendix B-presentation of zones, Fig. 2 -Zone 2 (UIC, 2002, s. 20).....	14
Figur 12: Appendix B-presentation of zones, Fig. 3 -Zone 3 .....	14
Figur 13: Støtmodell, Figur C.1 (NS-EN 1991-1-7, s 47) .....	18
Figur 14: Strukturell stål egenskaper .....	20
Figur 15: Aluminiumslegering egenskaper.....	21
Figur 16: Betong egenskaper .....	22
Figur 17: Togmodell 1 .....	23
Figur 18: Togmodell 2 versjon 1 .....	24
Figur 19: Togmodell 2 versjon 2 .....	25
Figur 20: Søylemodell.....	26
Figur 21: Veggmodell.....	26



Figur 22: Simlueringsoppsett.....	27
Figur 23: Analyse innstillinger .....	28
Figur 24: Simulering 1 .....	29
Figur 25: Simulering 1 resultat .....	29
Figur 26: Simulering 2 .....	30
Figur 27: Simulering 2 resultat .....	30
Figur 28: Simulering 3 .....	31
Figur 29: Simulering 3 resultat .....	31
Figur 30: Simulering 4 resultat .....	31
Figur 31: Simulering 5 resultat .....	31
Figur 32: Simulering 6 .....	32
Figur 33: Simulering 6 resultat .....	32
Figur 34: Simulering 7 resultat .....	32
Figur 35: Simulering 8 resultat .....	32
Figur 36: Simulering 9 .....	33
Figur 37: Simulering 9 resultat .....	33
Figur 38: Simulering10 .....	33
Figur 39: Simulering 10 resultat .....	34
Figur 40: Simulering 11 .....	34
Figur 41: Simulering 11 resultat .....	34
Figur 42: Deformasjons område (Wikipedia, 2022) .....	37
Figur 43: Togavsporing i kurve (Padgett, 2018).....	62

## Tabelliste

Tabell 1: Konstruksjoner over jernbanen (Bane NOR, 2021) .....	12
Tabell 2: Konstruksjoner over jernbanen (Bane NOR, 2021) .....	13
Tabell 3: Simuleringsresultater .....	35
Tabell 4: Resultat av formel basert på newtons andre lov .....	38
Tabell 5: Resultat av av formel basert på newtons andre lov, vinkelrett på spor .....	39
Tabell 6: Resultat av støtdynamikk formelen .....	41
Tabell 7: Dimensjonerende ulykkessituasjoner – bruk av konsekvensklasser (NS-EN 1991-1-7: 2006+NA:2008, s 15).....	44
Tabell 8: Dimensjonerende ulykkessituasjoner – brok av konsekvensklasser (NS-EN 1991-1-7: 2006+NA:2008, s 16) .....	45
Tabell 9: Slagbelastning mot konstruksjon – konsekvenser .....	46
Tabell 10: Togkm og avsporingfrekvens i Norge (Andersen, Leangerlokket - Dimensjonerende laster for brann og påkjørsel, Trondheim) .....	48
Tabell 11: Avsporingfrekvens fra for spor med og uten veksler, (UIC, 2002, s 27).....	48
Tabell 12: Sannsynlighet for at tog kolliderer med bro, 1 spor .....	51
Tabell 13: Sannsynlighet for at tog kolliderer med bro, 2 spor .....	51
Tabell 14: Sannsynlighet for at broen kollapser ved kollisjon (p3).....	52

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn og introduksjon

Togavsporinger forekommer sjeldent, og de fleste togavsporinger skjer ved lav hastighet uten store konsekvenser. Tog som avsporer i høyere hastighet derimot, vil ha et større faremoment, og kan medføre store materielle skader og tap av menneskeliv.



*Figur 1: Eschede Togulykke (McDonough, 2021)*

Et eksempel er høyhastighetstoget, ICE 1 som avsporet i Eschede, Tyskland, 3 juni 1998 med en hastighet på 200 km/t. Konsekvensene avsporingen medførte var katastrofale, og er historiens verste høyhastighetsulykke registrert. Ulykken tok livet av 101 mennesker, og skadet 88. Årsaken til ulykken var en defekt hjulring på den forreste vognen som førte til at toget avsporet ved en etterfølgende sporveksel. Det forreste lokomotivet ble revet av og fortsatte helt til det ble automatisk stoppet, og var relativt uskadd. Togets tredje vogn kolliderte med bropilarene på en veibro som gikk over jernbanen ved sporvekselen. Som følge av kollisjonen begynte broen å kollapse. Den fjerde vognen klarerte broen, men vogn nr. 5 ble knust sammen av det kollapsende brodekket. De etterfølgende vognene fra vogn 6 til vogn 12 ble sidelengs presset sammen, og skadene var store (Wikipedia, 2023).

I Norge har vi flere høyere hastighetsbaner, blant annet follobanen som nylig åpnet, og det planlegges flere jernbaneprosjekter av Bane NOR med bærende konstruksjoner. Ved enkelte prosjekter har prosjekterende konsulenter etterlyst hvilke påkjøringslaster for bærende konstruksjoner det skal tas høyde for (Schive C. ). I Bane NORs tekniske regelverk, er dimensjonerende påkjøringslaster kun fastsatt for toghastighet 0-50 km/t og 50-120 km/t. Påkjøringslaster for toghastighet  $V > 120$  km/t er ikke fastsatt, og som et oppgaveforslag fra Bane NOR, blir det forsøkt i denne oppgaven å komme med et forslag til dimensjonerende påkjøringslaster for toghastigheter over 120 km/t, sammen med en risikovurdering.

Bane NOR er et norsk statsforetak, opprettet etter jernbanereformen i 2017. Bane NORs ansvarsområder omfatter drifting, utvikling, bygging og vedlikeholdelse av det nasjonale jernbanenettet (Bane NOR).

## **1.2 Problemstilling**

Fastsette dimensjonerende påkjøringslaster for klasse B-konstruksjoner over jernbanen for toghastigheter  $V > 120$  km/t.

## **1.3 Omfang og avgrensninger**

I oppgaven fastsettes dimensjonerende påkjøringslaster for klasse B bærende konstruksjoner, for toghastigheter  $V > 120$  km/t med utgangspunkt i relevante dokumenter, standarder, bruk av dataprogrammet Ansys Workbench og håndkalkulasjoner. En generell risikoanalyse med kvalitative- og kvantitative metoder gjennomføres, samt forslag til risikoreduserende tiltak.

Dimensjonerende påkjøringslaster for  $V > 120$  km/t for klasse A-konstruksjoner fastsettes ikke for å avgrense oppgaven.

Denne oppgaven vil ikke ta hensyn til eventuell brann ved påkjørsel av bærende konstruksjon, men vil være aktuelt, særlig ved transport av brannfarlig gods.

Lang simuleringstid i dataprogrammet Ansys Workbench har vært en avgrensende faktor for antall simuleringer som kunne gjennomføres.

## 1.4 Kapitteloversikt

- Kapittel 2 undersøker tidligere studier av bærende konstruksjoner utsatt for dynamisk slagbelastning.
- Kapittel 3 gir en oversikt over påkjøringslaster, design, anbefalinger og krav som stilles for konstruksjoner kategorisert i ulike klasser, soner og grupper.
- Kapittel 4 tar for seg simuleringer av togkollisjoner mot bærende konstruksjon med hastigheter over 120 km/t.
- Kapittel 5 tar for seg håndkalkulasjoner av påkjøringslaster parallelt og vinkelrett på spor.
- Kapittel 6 gransker risikoen knyttet til togavsporinger i hastigheter  $V > 120$  km/t.
- Kapittel 7 inneholder dimensjonerende påkjøringslaster for bærekonstruksjoner for  $V > 120$  km/t.
- Kapittel 8 inneholder informasjon om dataprogrammene, Ansys Workbench, SpaceClaim og MATLAB.
- Kapittel 9 drøfter feilkilder og usikkerheter knyttet til oppgaven.
- Kapittel 10 består av konklusjon og anbefalinger til videre arbeid. Til slutt gis det en oversikt over referanser og vedlegg

## 2 Bærende konstruksjon utsatt for kollisjon – Litteraturstudie

Denne litteraturstudien tar en nærmere titt på bærende konstruksjoner over vei- og jernbanen under risiko for slagbelastning fra kjøretøy, tog og andre objekter. Hovedfokuset er å studere tidligere studier for å forstå oppførselen til bærende konstruksjonselementer utsatt for kollisjon. Det blir tatt utgangspunkt i disse studiene: (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018) og (V.DO, Pham, & Hao, Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact, 2019).

Bærende konstruksjoner er konstruert for å bære ulike laster (trafikklast, snølast, vindlast og andre laster) og overføre disse lastene til fundamentet eller grunnen under. Disse konstruksjonene består ofte av søyler, bjelker, fundament og vegger, og kan separeres i to grupper, horisontale og vertikale strukturelle konstruksjonselementer. Horisontale strukturelle konstruksjonselementer er f.eks. bjelker, og brukes til å bære gulv, dekker eller tak. Vertikale strukturelle konstruksjonselementer er søyler og vegger. For illustrasjon viser bildet under, Geitabru, en veibro over jernbanen i Oslo, bestående av flere søyler som bærer det overgående dekket.



Figur 2: Broer i Oslo kommune ([lokalhistoriewiki.no](http://lokalhistoriewiki.no), 2023)

## 2.1 Slagbelastning på søyle

En søyle er et strukturelt bærende konstruksjonselement, ofte brukt i forbindelse med broer og bygninger. Tverrsnittet til en søyle kan variere i form, og kan være rundt, kvadratisk, rektangulært eller polygonalt. Basert på bilder av broer med søyler, er det imidlertid mest vanlig for søyler å ha en rund, kvadratisk eller et rektangulært tverrsnitt.

Flere numeriske og eksperimentelle studier hvor en søyle har blitt utsatt for en slagbelastning har blitt gjennomført (V.DO, Pham, & Hao, Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact, 2019), (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018). I disse studiene blir det gjort klart at en søyle utsatt for en slagbelastning kan gi ulike feilmønstre. Fra virkelige hendelser, har det blitt observert at de vanligste feilmønstrene for en bro søyle er, bøye- og skjærsvikt, «*punching shear*» og fullstendig søylesvikt. (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018). Å forutse hvilken feilmodus en søyle vil oppleve vil være avhengig av flere faktorer bl.a. hastighet og vekten til objektet som kolliderer, søylens dimensjoner, materialtype, deformasjon og varighet av kollisjonen. Blant disse faktorene viser studien til Tin V.DO, Thong M. Pham, Hong Hao at kollisjonshastigheten og massen til motoren vil bestemme maksimal slagbelastning påført en vilkårlig søyle under en kollisjon (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018).

En slagbelastning karakteriseres av varigheten og intensiteten, og kan kategoriseres i tre grupper (Zhang, Gholipour, & Mousavi, 2020).

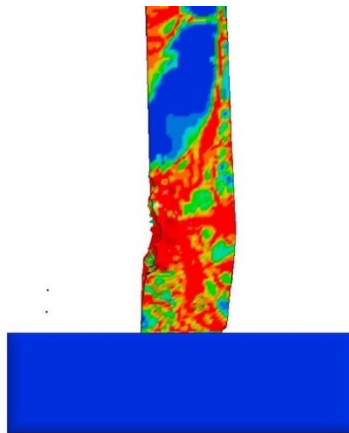
1. Kvasi-statisk belastning: «en belastning der strukturen når sin maksimale respons før slagbelastningens varighet slutter»
2. Dynamisk belastning: «belastning der strukturen når sin maksimale respons nesten samtidig med slutten av slagbelastnings varighet»
3. Impulsiv belastning: «der slagvarigheten sluttet før den når strukturens maksimale respons» (Zhang, Gholipour, & Mousavi, 2020).

### 2.1.1 Brosøyle feilmodus

En slagbelastning fra et avsporet tog med en hastighet på over 120 km/t, vil utsette en søyle for store skjærkrefter, krefter som virker parallelt med objektets tverrsnitt. Nevnt tidligere vil en slagbelastning på en brosøyle gi ulike feilmoduser. Tin V.DO, Thong M. Pham, Hong Hao nevner i sin studie at den vanligste feilmodus for søyler av armert betong utsatt for slagbelastning er *punching shear*. Studien henviser til andre studier hvor skjærmekanismen til søyler har blitt undersøkt gjennom eksperimenter og numeriske undersøkelser (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018).

### Skjærkraft fra konsentrert last feilmodus

Skjærkraft fra konsentrert last, også kalt *Punching shear* feilmodus oppstår når søylen utsettes for en konsentrert slagbelastning på et avgrenset areal. Figuren nedenfor viser en datamodell av en brosøyle med *punching shear* feilmodus, hvor modellen har blitt utsatt for en simulert påkjørsel av motorvogn.



Figur 3: *Punching shear* feilmodus, (V.DO, Pham, & Hao, Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact, 2019)

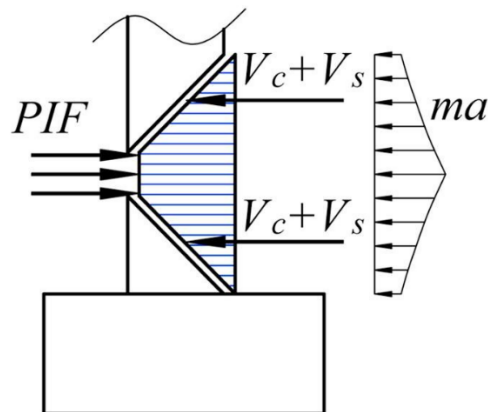


Bildet nedenfor viser en søyle utsatt for *punching shear* fra en lastebilulykke ved Pyke Road Bridge, Texas. Det kan tydelig ses at søylen har fått feilmodus som følge av kollisjonen.



Figur 4: *Punching shear feilmodus, (Texas Transportation Institute, 2010)*

En forenklet modell av en søyle utsatt for *punching shear* er vist nedenfor. PIF illustrerer skjærkraften, og  $V_c + V_s$  illustrerer søylens motkraft.



Figur 5: *Forenklet skjærmodell for søyle, (V.DO, Pham, & Hao, Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact, 2019)*

En søyle opplever *punching shear* feilmodus, når slagbelastningen er større enn det søylen er dimensjonert til å motstå. Med andre ord, når PIF skjærkraften er større enn  $V_c + V_s$ , vil søylen oppleve feilmodus.

## **Bøyesvikt**

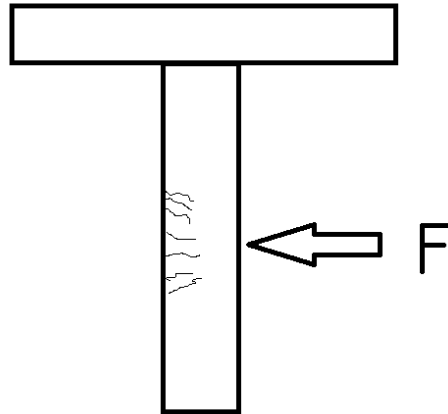
Andre feilmoduser på søyle som kan oppstå som følge av en kollisjon, er bøyesvikt, hvor søylen bøyer seg ut av planet, og kan delvis eller helt miste bæreevnen. Figuren nedenfor viser en deformert søyle med bøyesvikt. Bøyesvikten kan forverres ytterligere, og total søylesvikt kan oppstå, dersom søylens bæreevne ikke er i stand til å motstå den komprimerende vekten på søylen.



*Figur 6: Søyle med bøyesvikt (Zhang, Gholipour, & Mousavi, 2020)*

## **Søylesprekker**

Sprekker kan oppstå på søyler som opplever strekkbelastning, ofte som et resultat av bøying. Sprekkene vil variere i størrelse avhengig av strekkbelastning og hvor stor krumning det er i søylen. Illustrasjonen under viser en søyle med spenning på baksiden hvor det er sprekker.



Figur 7: Søylesprekker. Tegnet i Paint

### Skjærsvikt

Skjærsvikt er en strukturell svikt, som kan oppstå når bærende konstruksjonselement blir utsatt for slagbelastning som forårsaker konstruksjonselementet til å brette på tvers. Bildet nedenfor viser en skjærsvikt på toppen av søylen.



Figur 8: Skjærsvikt på søyle (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018)

## Brutal skade



*Figur 9: Fullstendig søylesvikt (V.DO, Pham, & Hao, Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision, 2018)*

Brutal skade oppstår ved en kollisjon, dersom søylen ikke er i stand til å motstå kreftene påført, og som resulterer i tap av all bæreevne. For illustrasjon, se figur 9 ovenfor.

## 2.2 Material

Valg av material for bærende konstruksjon avhenger av materialets egenskaper i forhold til bærende krav. Det er vanlig å bruke solide materialer, som tre, stål, aluminium, betong, murstein og armert betong. For konstruksjoner over jernbanen, er armert betong et aktuelt material å bruke av dens egenskaper til å motstå en kollisjonslast.

### 2.2.1 Armert betong

Armert betong er et komposittmateriale bestående av flere materialer, hovedsakelig betong og stål, og blir ofte brukt i konstruksjoner på grunn av dets egenskaper. Betong har en god evne til å motstå komprimerende kraft, men har begrensninger til å motstå strekkrefter, og har bare 1/10 strekkstyrke i forhold til trykkstyrken (Thue, armert betong, 2022). Stål derimot er egnet for å tåle store strekkrefter, og en kombinasjon av stål og betong gjør en konstruksjon i stand til å tåle både komprimerende- og strekkrefter.

### **2.2.2 Betong**

Betong er en blanding av sand, grus, pukk, vann, sement og tilsetningsstoffer. Betong brukes til ulike konstruksjoner, bl.a. broer, tunneler, hus og offshore plattformer. Den komprimerende styrken til betong vil variere avhengig av betongklassen. I den norske standarden for betong, er betong delt opp i tre grupper; lett-, normal- og tungvekt betong.

### **2.2.3 Armeringsstål**

Armeringsstålet brukt i armert betong består av stålstenger med sirkulært tverrsnitt. Kamstål er i dag det mest brukte armeringsstålet (Thue, armeringsstål, 2019). Ved bygging av broer eller konstruksjoner med lengre spennvidde brukes spennarmering (Wikipedia, 2023).

### 3 Rammebetingelser for dimensjonering av påkjøringslaster

For rammebetingelser for dimensjonering av påkjøringslaster brukes følgende dokument, standard og regelverk:

- UIC Code 777-2, 2<sup>nd</sup> versjon, september 2002
- NS-EN 1991-1-7:2006+NA:2008
- Bane NORs tekniske regelverk

UIC Code 777-2, *structures built over railway lines – Construction requirements in the track zone*, utgitt av den internasjonale jernbaneunionen. Dokumentet spesifiserer hvilke krav som stilles for konstruksjoner bygd over jernbanen, og inneholder rettleiding for risikoanalyse, samt forslag til tiltak som kan iverksettes. UIC Code 777-2 har i Norge ingen offisiell status, og det er ikke påkrevd å følge dokumentets krav og anbefalinger. (Overbygging av jernbanespor – Jernbaneverkets krav til konstruksjonen, Christopher Schive).

NS-EN 1991-1-7:2006+NA:2008, Eurokode 1: *Laster på konstruksjoner Del 1-7: Allmenne laster, Ulykkeslaster*, utgitt av Norsk standard. Standarden inneholder mye av de samme krav UIC Code 777-2 spesifiserer, hvor enkelte krav er tilpasset for norske krav.

Bane NOR tekniske regelverk er et verktøy som omfatter alle krav til utforming, bygging og dimensjonering av jernbaneanlegg, og er åpen for offentligheten (Bane NOR, 2022).

#### 3.1 Påkjøringslaster for klasse A- og klasse B-konstruksjoner

Ifølge Bane NORs tekniske regelverk, konstruksjoner over jernbanen, er krav til følgende påkjøringslaster for klasse A- og B-konstruksjoner med hastighetsområde < 50 km/t og 50 – 120 km/t, gitt i tabell 1 og tabell 2:

Tabell 1: Konstruksjoner over jernbanen (Bane NOR, 2021)

Hastighetsområde	
< 50 km/t	50-120 km/t
3 000 kN – 300 · d kN	8 000 kN – 300 · d kN

Tabell 2: Konstruksjoner over jernbanen (Bane NOR, 2021)

Hastighetsområde	
< 50 km/t	50-120 km/t
$1\,500\text{ kN} - 300 \cdot d\text{ kN}$	$3\,000\text{ kN} - 300 \cdot d\text{ kN}$

d = konstruksjonens avstand fra spormidt.

- Kraft påføres parallelt over sporet med en høyde på 1,8 m.
- Kraft påføres parallelt over sporet med en høyde på 2 m, dersom bærende konstruksjon er plassert på en beskyttende plattform, rampe eller sokkel med minimum høyde på 600 mm.

Bane NORs tekniske regelverk opplyser at påkjøringslaster for  $V > 120\text{ km/t}$  skal minst være av sammen størrelse som påkjøringslastene gitt i tabell 1 og 2.

### 3.2 Klassifisering av konstruksjoner

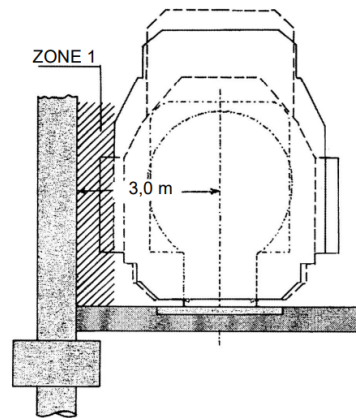
Fra NS-EN 1991-1-7 4.5.1.2 kan konstruksjoner som er utsatt for støt av avsporet tog, klassifiseres som klasse A- og klasse B-konstruksjoner.

- Klasse A-konstruksjoner: «Konstruksjoner som spenner over eller langs en jernbane i drift, og som enten er permanent oppholdssted eller tidvis er et samlingssted for mennesker eller består av mer enn én etasje» (NS-EN 1991-1-7 Tabell 4.3).
- Klasse B-konstruksjoner: «Massive konstruksjoner som spenner over eller langs en jernbane i drift, f.eks. vegbroer eller bygninger med én etasje som ikke er permanent oppholdssted eller ikke er et midlertidig samlingssted for mennesker» (NS-EN 1991-1-7 Tabell 4.3).

#### 6.3.4 Soneinndeling

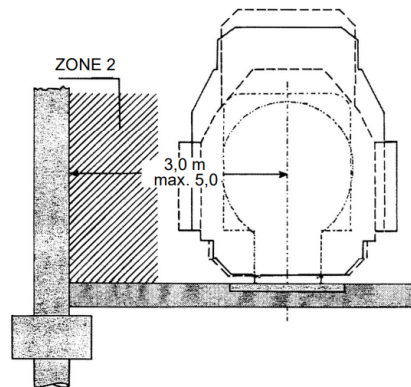
Klasse A har i tillegg 3 soner, hvor hver av dem sier noe om hvor nærme konstruksjonen er til spormidt (Appendix B, UIC).

- Sone 1: Distanse til nærmeste spormidt er 3 m eller mindre.



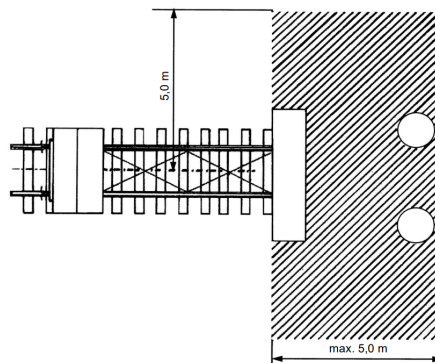
Figur 10: Appendix B-presentation of zones, Fig. 1 -Zone 1 (UIC, 2002, s. 20)

- Sone 2: Distanse til nærmeste spormidt er mellom 3 eller 5 m.



Figur 11: Appendix B-presentation of zones, Fig. 2 -Zone 2 (UIC, 2002, s. 20)

- Sone 3: Er området 5 m bak sporslutt ved buttspor.



Figur 12: Appendix B-presentation of zones, Fig. 3 -Zone 3



I Norge vil ikke sone 1 være relevant, da bærende konstruksjoner ligger 3 m eller mindre fra spormidtd, vil ligge innenfor sporets frittromsprofil og er dermed ikke tillatt (Overbygging av jernbanespor – Jernbaneverkets krav til konstruksjonen, Christopher Schive).

### 6.3 Klasse B overbygg

Bærende konstruksjonselementer for klasse B overbygg kan ifølge UIC 777-2 6.6.1 vurderes som kontinuerlige vegger hvis de samsvarer med følgende minimum dimensjoner:

$$L: W \geq 4:1 \quad W \geq 0,6 \text{ m} \quad L \geq H/2$$

Hvor  $L$  = Lengde

$W$  = Bredde

$H$  = Høyde

UIC 777-2 6.6.2 beskriver at bærende konstruksjonselementer skal dimensjoneres med en slik robusthet til å tåle påkjøringslaster fra avsporet tog for å redusere sannsynligheten for kollaps av konstruksjonen. I tillegg bør også elementene beskyttes av et hevet fundament på minst 76 cm over skinne.

### 6.3 Klasse A overbygg

#### Sone 1

Design:

Bærende konstruksjonselementer bør designes som kontinuerlige vegger, men ikke kontinuerlige vegger, vegger oppdelt i seksjoner vil være tillatt (UIC 777-2, Appendix D).

Fra UIC 777-2 Appendix D, skal krefter på konstruksjonen påføres med høyde på 1,8 m over skinnespor.

På første veggseksjon skal følgende krefter påføres:

- 10 000 kN parallelt med spor
- 3 500 kN vinkelrett på spor

For etterfølgende veggseksjoner skal følgende krefter påføres:

- 4 000 kN parallelt med spor
- 1 500 kN vinkelrett på spor

## Sone 2

I henhold til UIC 777-2, 5.2 er konstruksjonelementer i sone 2, delt opp i tre følgende grupper, avhengig av høyeste tillatte hastighet og trafikktype:

- Gruppe 1: konstruksjonelementer ved siden av spor med vanlig togtrafikk i hastigheter mellom 50 km/t og 120 km/t, og eldre tog med en maksimal hastighet på 100 km/t
- Gruppe 2: konstruksjonelementer ved siden av spor med vanlig togtrafikk med maksimal hastighet 50 km/t
- Gruppe 3: konstruksjonelementer ved siden av spor med maksimal hastighet på 20 km/t

Ved tildeling av konstruksjonelementer til en av de tre gruppene nevnt ovenfor, vil det være aktuelt å ta hensyn til banebruk i nåtid og fremtidig forventet banebruk (UIC 777-2 5.2).

### Gruppe 1 bærende konstruksjonelementer

Design:

UIC 777-2 5.4.1.1 spesifiserer at bærende konstruksjonelementer bør designes som kontinuerlige vegger, men ikke-kontinuerlige vegger vil være tillatt. Dersom de bærende konstruksjonelementer består av veggseksjoner, bør seksjonene dimensjoneres slik at ved tap av bæreevne til en veggseksjon, som følge av kollisjon fra et avsporet tog, ikke vil resultere i kollaps av konstruksjonen.

Minimum dimensjoner:

$$L: W = 4:1 \quad W \geq 0,8 \text{ m} \quad L \geq H/2$$

Hvor L = Lengde

W = Bredde

H = Høyde

Krefter på konstruksjonen skal påføres med høyde på 1,8 m over spor.

Bærende konstruksjonelementer dimensjoneres for følgende krefter:

- 4 000 kN parallelt med spor
- 1 500 kN vinkelrett på spor

## **Gruppe 2 bærende konstruksjonselementer**

Design:

Fra UIC 777-2 5.4.2.1, skal gruppe 2 bærende konstruksjonselementer utformes i samsvar med design for gruppe 1 bærende konstruksjonselementer. Minimum dimensjoner for gruppe 1 er også gjeldende for gruppe 2. Videre presiseres det at dersom bærende konstruksjonselementer ikke kan utformes som kontinuerlige vegger, kan de utformes som individuelle søyler. Hvis dette gjøres bør krasjbarrierer plasseres foran den fremste søylen, særlig ved avspøringsutsatte områder. Dette er for å beskytte søylene til konstruksjonen for å forhindre kollaps.

Krefter på konstruksjonen skal påføres med høyde på 1,8 m over spor bærende konstruksjonselementer dimensjoneres for følgende krefter:

- 2 000 kN parallelt med spor
- 750 kN vinkelrett på spor

## **Gruppe 3 bærende konstruksjonselementer**

Design:

Gruppe 3 bærende konstruksjonselementer dimensjoneres med samme krefter som gruppe 2. Tap av bæreevne til et konstruksjonselement trengs ikke å sjekkes (UIC 777-2, 5.4.3.1).

## **Sone 3**

Formen og dimensjonene til søyler plassert innenfor sone 3 velges fritt (UIC 777-2, 5.5.1).

## **6.3 Støtdynamikk**

Et støt defineres som en kollisjon mellom to legemer. Støt klassifiseres som et mykt eller et hardt støt. Ved mykt støt blir energien ved kollisjon hovedsakelig absorbert av legemet gjennom deformasjon, forutsatt at minst ett av legemer er elastisk. Ved hardt støt blir energien hovedsakelig absorbert av støtlegemet forutsatt at begge legemer er stive (NS-EN 1991-1-7, C.2, C.2.1, C.2.2).

Det antas at en kollisjon mellom et tog og en konstruksjon er et hardt støt. Det innebærer at konstruksjonen er stiv og ubevegelig, og at toget i dette tilfelle deformeres lineært i løpet av støtfasen (NS-EN 1991-1-7, C.2.1).

Dynamisk interaksjonskraft er gitt som:

$$F = V_r \sqrt{km}$$

Hvor:

$V_r$  = objektets hastighet ved støt

$m = \rho AL$  = objektets masse

$k = EA/L$  = ekvivalent stivhet for objektet

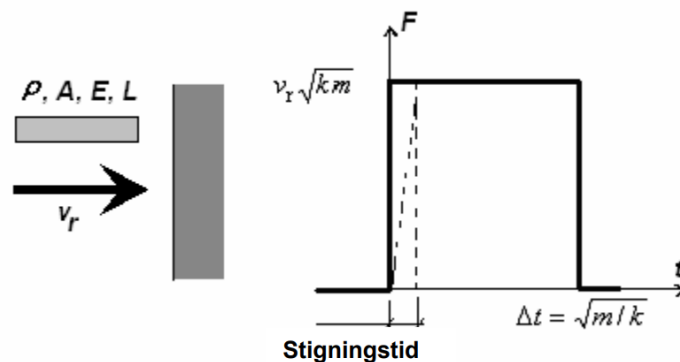
$L$  = lengden på objektet

$A$  = Arealet av tverrsnittet

$E$  = elastisitetsmodul

$\rho$  = massetetthet til objektet

Støtmodell:



Figur 13: Støtmodell, Figur C.1 (NS-EN 1991-1-7, s 47)

Merknad: Fra en studie gjort av Haitham A-Thairy og Y.C Wang (Al-Thairy & Wang, 2014), blir det oppgitt at formelen ser bort ifra interaksjonen mellom et kjøretøy og konstruksjonen som blir påført en slagbelastning, som vil resulterer i overestimerte verdier for interaksjonskraft for hardt støt. I tillegg blir ikke den plastiske oppførselen til kjøretøyet og konstruksjonen tatt med i betraktning. Det blir likevel valgt å bruke formelen for dynamisk interaksjonskraft oppgitt i NS-EN 1991-1-7 C.2.1 (C.1), som følger av manglende formel for togkollisjon i NS-EN 1991-1-7.

## 4 Ansys-simulering

### Mål

Studere oppførselen til tog som kolliderer med vegg og søyle i ulike påkjøringsscenario, og hente ut data fra simuleringene til å fastsette dimensjonerende påkjøringslaster for ulike hastighetsgrupper.

### Beskrivelse

Alle modeller og simuleringer er gjort i dataprogrammet *Ansys® Workbench* versjon 2020 R1. Analysemodulen *Explicit Dynamics* brukes for å utføre 11 forskjellige simuleringer av ulike tog, vegg- og søyle modeller i ulike hastigheter. Simulering 1-5 utføres med togmodell 1. Simulering 6-8 utføres med togmodell 2 versjon 1, og simulering 9-11 med togmodell 2 versjon 2.

### Simuleringsoversikt:

- Simulering 1: togmodell 1, frontkollisjon på langside vegg – 160 km/t
- Simulering 2: togmodell 1, frontkollisjon med søyle – 160 km/t
- Simulering 3-5: togmodell 1, sidekollisjon med langside vegg -160, 200 og 250 km/t
- Simulering 6-8: togmodell 2 versjon 1, sidekollisjon med langside vegg – 160, 200 og 250 km/t
- Simulering 9: togmodell 2 versjon 2, frontkollisjon med langside vegg – 160 km/t
- Simulering 10: togmodell 2 versjon 2, frontkollisjon med bredside vegg – 160 km/t
- Simulering 11: togmodell 2 versjon 2, frontkollisjon med søyle – 160 km/t

Merknad: simulering 1, 2, 9, 10 og 11 er kun gjort i hastighet 160, og ikke for 200- og 250 km/t som følge av lang simuleringstid og irrelevant data fra disse simuleringene.

### 4.1 Ingeniørdata – material

Materialene er hentet fra «Engineering data» i *Explicit dynamics*. Følgende materialer brukes:

- «Structural steel», strukturelt stål
- «Aluminium Alloy», aluminiumslegering
- «Concrete», betong

Egenskapen til materialene er gitt i figur 14,15, og 16.

## Structural Steel



Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Density	7850,0 kg/m <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+11 Pa
Poisson's Ratio	0,30000
Bulk Modulus	1,6667e+11 Pa
Shear Modulus	7,6923e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 Pa
Compressive Yield Strength	2,5e+08 Pa
Strain-Life Parameters	
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	4,6e+08 Pa
Tensile Yield Strength	2,5e+08 Pa
<b>Thermal</b>	
Isotropic Thermal Conductivity	60,500 W/m·°C
Specific Heat Constant Pressure	434,00 J/kg·°C
<b>Electric</b>	
Isotropic Resistivity	1,7e-07 ohm·m
<b>Magnetic</b>	
Isotropic Relative Permeability	10000

Figur 14: Strukturell stål egenskaper

# Aluminum Alloy

General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Density	2770,0 kg/m <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	7,1e+10 Pa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	6,9608e+10 Pa
Shear Modulus	2,6692e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2,3e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 Pa
Compressive Yield Strength	2,8e+08 Pa
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	3,1e+08 Pa
Tensile Yield Strength	2,8e+08 Pa
<b>Thermal</b>	
Isotropic Thermal Conductivity	
Specific Heat Constant Pressure	875,00 J/kg·°C
<b>Electric</b>	
Isotropic Resistivity	
<b>Magnetic</b>	
Isotropic Relative Permeability	1,000

Figur 15: Aluminiumlegering egenskaper

Density	2300,0 kg/m <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	3e+10 Pa
Poisson's Ratio	0,18000
Bulk Modulus	1,5625e+10 Pa
Shear Modulus	1,2712e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,4e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	4,1e+07 Pa
Compressive Yield Strength	0 Pa
Tensile Ultimate Strength	5e+06 Pa
Tensile Yield Strength	0 Pa
<b>Thermal</b>	
Isotropic Thermal Conductivity	0,72000 W/m·°C
Specific Heat Constant Pressure	780,00 J/kg·°C

Figur 16: Betong egenskaper

Armert betong brukes ikke da dette er en omfattende designprosess som inkluderer design og dimensjonering. For mer realistisk fremstilling av vegg- og søylemodell bør armert betong inngås. Vegg- og søylemodell består derfor kun av betong. I Ansys simuleringene er betong mer robust enn antatt, selv uten armering, og simuleringene vil likevel gi en realistisk fremstilling.

## 4.2 Togmodeller

Modelleringsprogrammet *SpaceClaim* er benyttet til å modellere togmodellene. Det er hensiktsmessig å ha flere modeller for å sammenligne og undersøke hvordan ulike faktorer kan påvirke utfallet til en simulering. To ulike togmodeller er derfor modellert.

### Modell 1

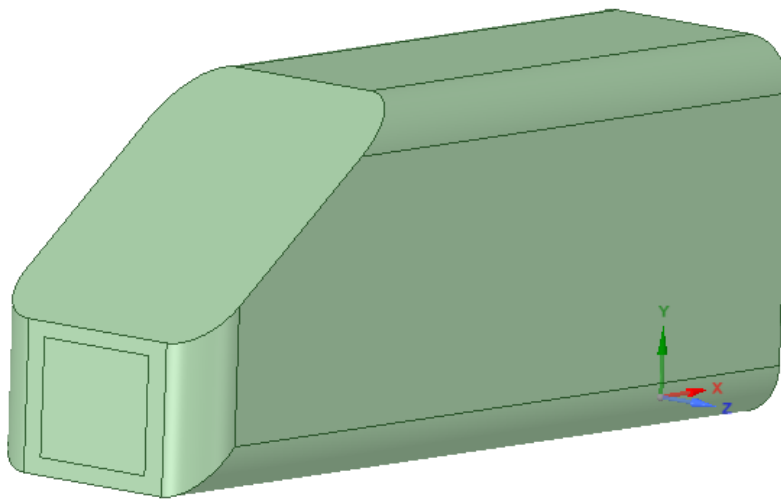
Modell 1 er første generasjon av togmodellen der massen til hele togsettet for et persontog er inkludert. Denne modellen tar hensyn til vekten av både selve togsettet, og passasjerene som befinner seg om bord.



## Modell 2

Modell 2 er andre generasjon og har en mer realistisk utforming med lengre lengde enn modell 1. To ulike versjoner av modell 2 er utformet. Versjon 1 brukes i sidekollisjoner, og versjon 2 brukes i frontkollisjon. Massen til modell 2 er ekvivalent med vekten til et lokomotiv til et passasjertogsett.

### 4.2.1 Modell 1



Figur 17: Togmodell 1

#### Dimensjoner

Modellen har en enkel utforming basert på flytoget, type 78 (Jernbane.net).

- Topp snut: 1,8 m over skinne
- Høyde: 4,4 m
- Lengde: 10 m
- Bredde: 3,3 m

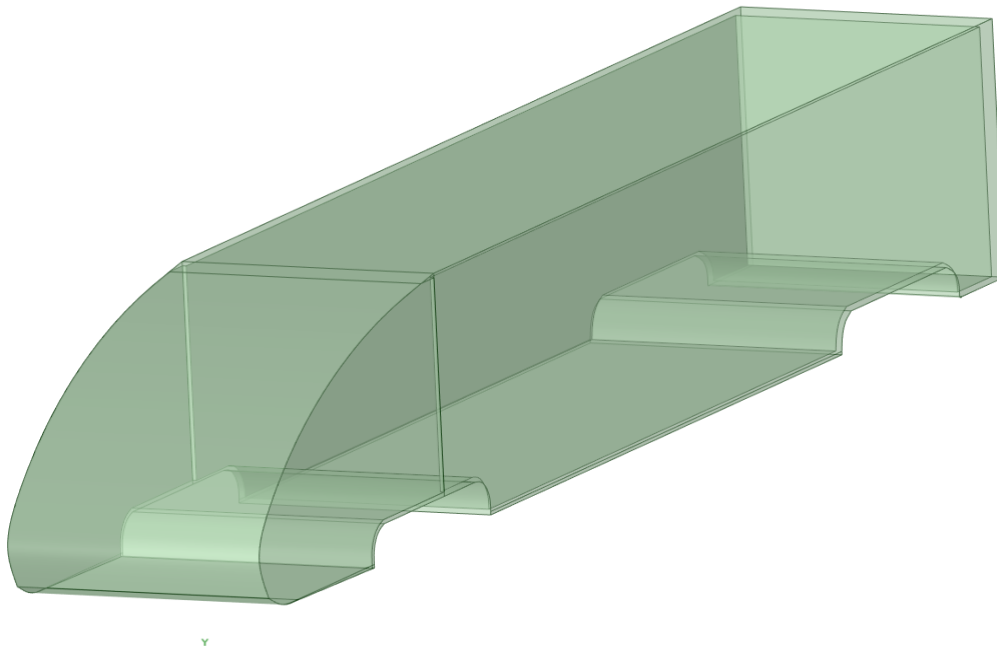
Modellen er designet slik at massen til hele togsettet er plassert i lokomotivet. I virkeligheten vil vekten være fordelt utover togets vogner. Dette vil resultere i noe unøyaktig simulering og det er antatt at en slagbelastning fra modell 1 vil være større enn i realiteten.

### Material, vekt og volum

- Material: strukturelt stål
- Vekt: 275,048 tonn
- Volum: 35,038m<sup>3</sup>

Det nye flytoget, type 78 har en egenvekt på 236 tonn med 238 sitteplasser, med en gjennomsnittsvikt på 75 kg per passasjer, blir vekten 254 tonn uten bagasje (Jernbane.net). Sammenlignet med type 76 med egenvekt på 250 tonn og fullastet, 298 tonn (Norsketog, 2023) er 275,048 tonn en rimelig antagelse av vekt.

### 4.2.2 Modell 2 versjon 1



Figur 18: Togmodell 2 versjon 1

### Dimensjoner

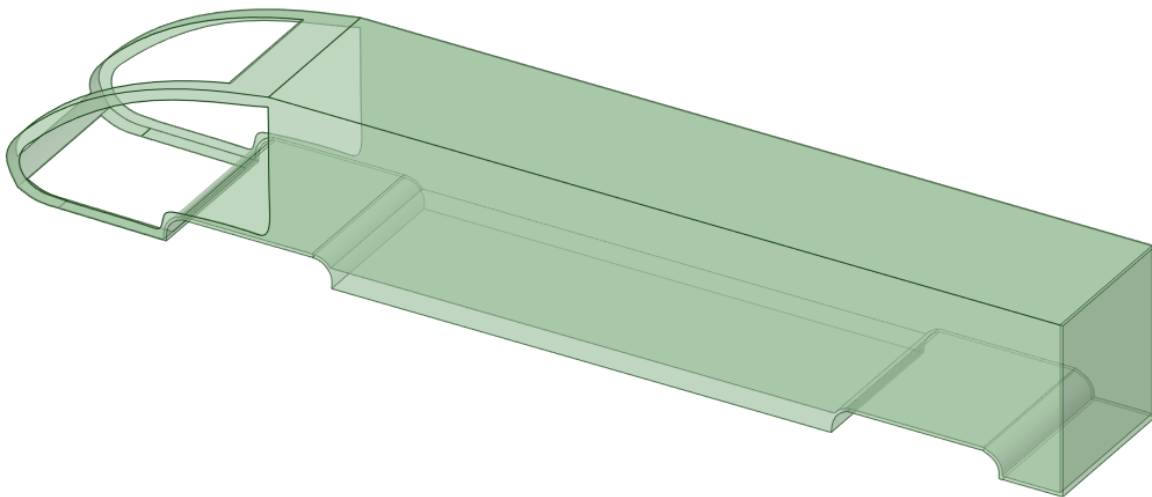
Modell 2 er etterlignet av bilder fra høyhastighetstog, og ble modellert for bedre etterligning av karosseriet til et tog, og for mer nøyaktig simulering. Veggene, taket og gulvet er tynnere sammenlignet med modell 1 og har en tykkelse på 13 mm, og gulvet er 50 mm.

- Høyde: 3,3 m
- Bredde: 3,58 m
- Lengde: 21,8 m

### Material, vekt og volum

- Material: aluminiumlegering
- Vekt: 51,439 tonn
- Volum: 18,57 m<sup>3</sup>

### 4.2.3 Modell 2 versjon 2



Figur 19: Togmodell 2 versjon 2

### Dimensjoner

Samme konsept og utforming som versjon 1, med unntak av fronten. Fronten er designet slik at den lettere skal deformeres under en kollisjon.

### Material, vekt og volum

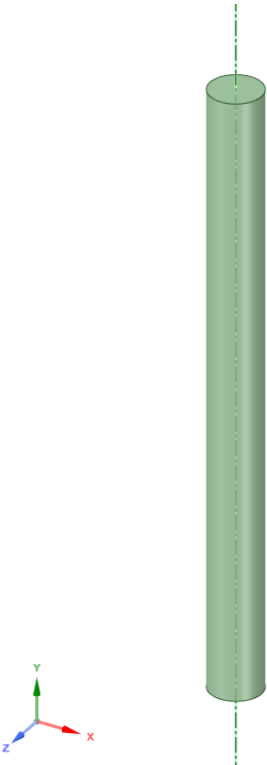
- Material: aluminiumslegering
- Vekt: 50,552 tonn
- Volum: 18,25 m<sup>3</sup>

### 4.3 Vegg- og søylemodell

Det er blitt valgt å ta med søyler og kontinuerlig vegg som bærende konstruksjonselement utsatt for togkollisjon. Veggene har en høyde på 7 m, og en tykkelse på 0,6 m. Veggens lengde for hver simulering er varierende.

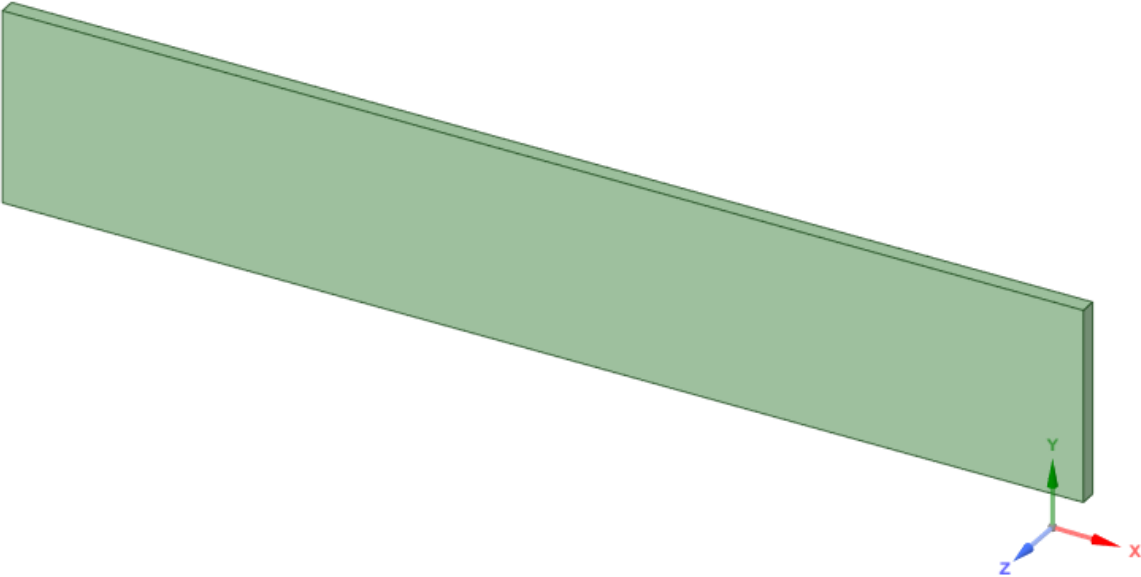
Søylens tykkelse er 0,6m i diameter med en høyde på 7 m. Vegg og søyle er av betong.

**Søylemodell**



*Figur 20: Søylemodell*

**Veggmodell**



*Figur 21: Veggmodell*

## 4.4 Simuleringsoppsett

Oppsettet til simuleringene er vist til høyre.

4.4.1- *Geometry*, er modellen lastet inn fra spaceclaim sammen med bæreelement og understøtte.

4.4.2- *Materials*, er materialene valgt fra ingeniørdata.

4.4.3- *Construction Geometry*, er ikke brukt. En «path» er opprettet, men ikke benyttet.

4.4.4- *Coordinate Systems*, ble benyttet med standard oppsett ble benyttet. Egendefinert og lokale koordinatsystem kan opprettes.

4.4.5- *Connections*, viser til kontaktoverflater mellom objekter. Kontakt med minimal overlapp kan fjernes i *Connections*.

4.4.5- *Mesh*, er oppdeling av modellene i noder. Nodene består av små tre- eller firkanter som sammen representerer modellen. I en simulering blir oppførselen til hver node på modellen simulert.

4.4.6- *Explicit Dynamics*, er en modul i Ansys Workbench.

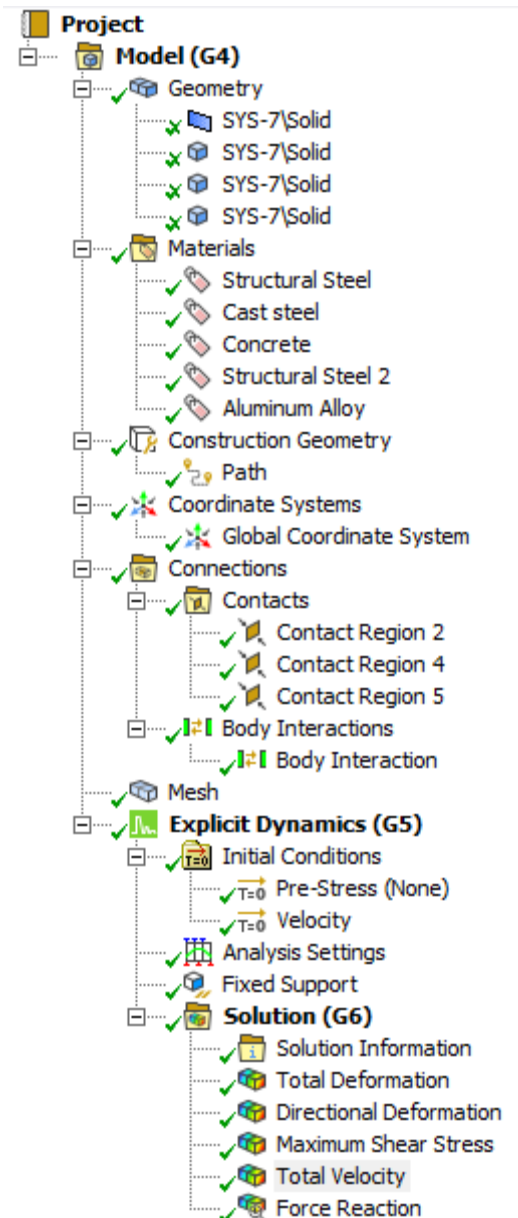
4.4.7- *Initial Conditions*, fart og andre eventuelle innledende forhold blir spesifisert for hver simulering.

4.4.8- *Analysis settings*, oppgir blant annet tidsrommet til en simulering.

4.4.9- *Fixed support*, oppgir hvilke ender av konstruksjonen som står fast i, for eksempel bakken.

4.4.10- *Solution*, her legges til det en ønsker av resultater.

4.4.11- *Solution Information*, oppgir hvor lang tid det er igjen av simuleringen, og hvilke feilmeldinger som eventuelt oppsto under simulering.



Figur 22: Simuleringsoppsett

## 4.5 Analyse innstillinger

«End time», «Maximum Energy» Error», og «Result Number Of Points» er innstillinger som er endret i Ansys. *End Time* representerer sluttiden til simulering. *End time* på 0,1 gir en simulering en varighet på 0-0,1 sekunder. For hver simulering er *End time* tilpasset etter behov. *Maximum energy error* har standard verdi på 0,1, men er endret til 10, etter feilmelding «energy error to large». *Result number of points* er antall punkter som resultatet blir oppgitt i. Standarden er å bruke 100, men for simuleringene brukes det 200 punkter.

Details of "Analysis Settings"	
Analysis Settings Preference	
Type	Custom
Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integration
End Time	5,e-002
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
Solver Controls	
Solve Units	mm, mg, ms
Beam Solution Type	Bending
Beam Time Step Safety Factor	0,5
Hex Integration Type	Exact
Shell Sublayers	3
Shell Shear Correction Factor	0,8333
Shell BWC Warp Correction	Yes
Shell Thickness Update	Nodal
Tet Integration	Average Nodal Pressure
Shell Inertia Update	Recompute
Density Update	Program Controlled
Minimum Velocity	1,e-006 m s <sup>-1</sup>
Maximum Velocity	1,e+010 m s <sup>-1</sup>
Radius Cutoff	1,e-003
Minimum Strain Rate Cutoff	1,e-010

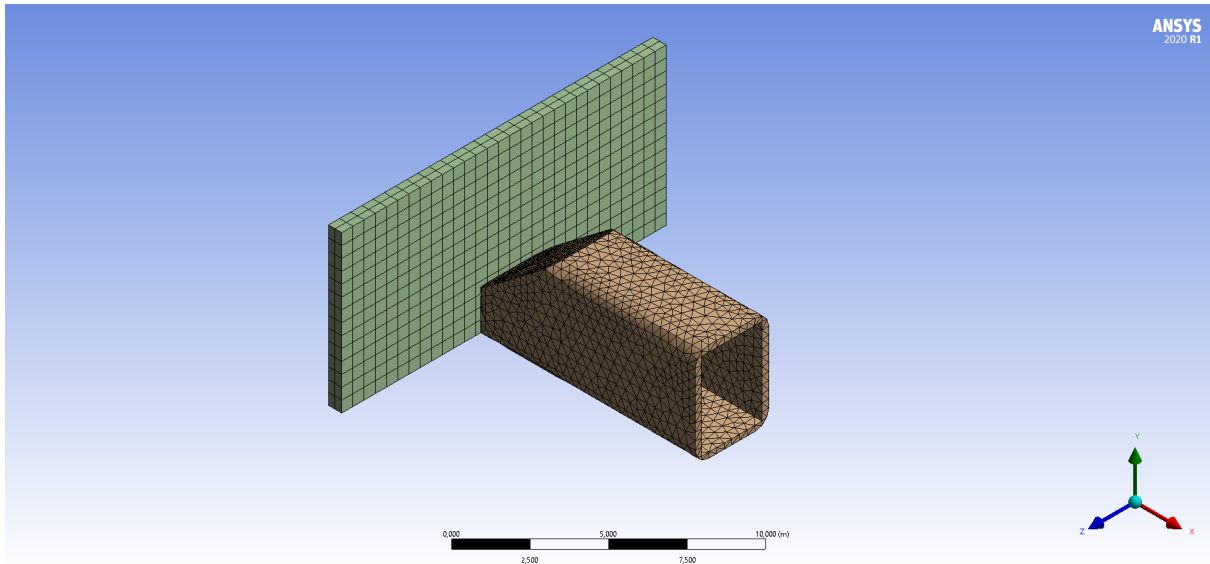
Damping Controls	
Linear Artificial Viscosity	0,2
Quadratic Artificial Viscosity	1,
Linear Viscosity in Expansion	No
Artificial Viscosity For Shells	Yes
Hourglass Damping	AUTODYN Standard
Viscous Coefficient	0,1
Static Damping	0,
Erosion Controls	
On Geometric Strain Limit	Yes
Geometric Strain Limit	1,5
On Material Failure	No
On Minimum Element Time Step	No
Retain Inertia of Eroded Material	Yes
Output Controls	
Step-aware Output Controls	No
Save Results on	Equally Spaced Points
Result Number Of Points	100
Save Restart Files on	Equally Spaced Points
Restart Number Of Points	5
Save Result Tracker Data on	Cycles
Tracker Cycles	1
Output Contact Forces	Off
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	F:\tog1_files\dp0\SYS-7\MECH\
Scratch Solver Files Directory	

Figur 23: Analyse innstillinger

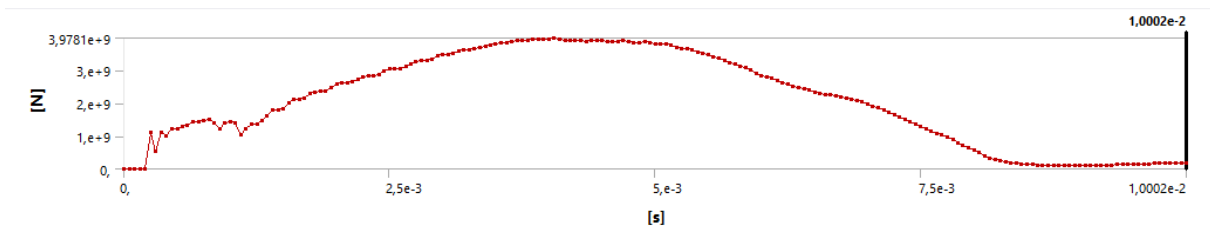
## 4.6 Simuleringsresultater

Det vises til simuleringsscenario med følgende resultater for hver simulering. Grafene viser slagbelastning i newton (N) i y- retning, og varighet i sekunder (s) i x – retning.

**Simulering 1** – Togmodell 1, frontkollisjon med langside vegg – 160 km/t

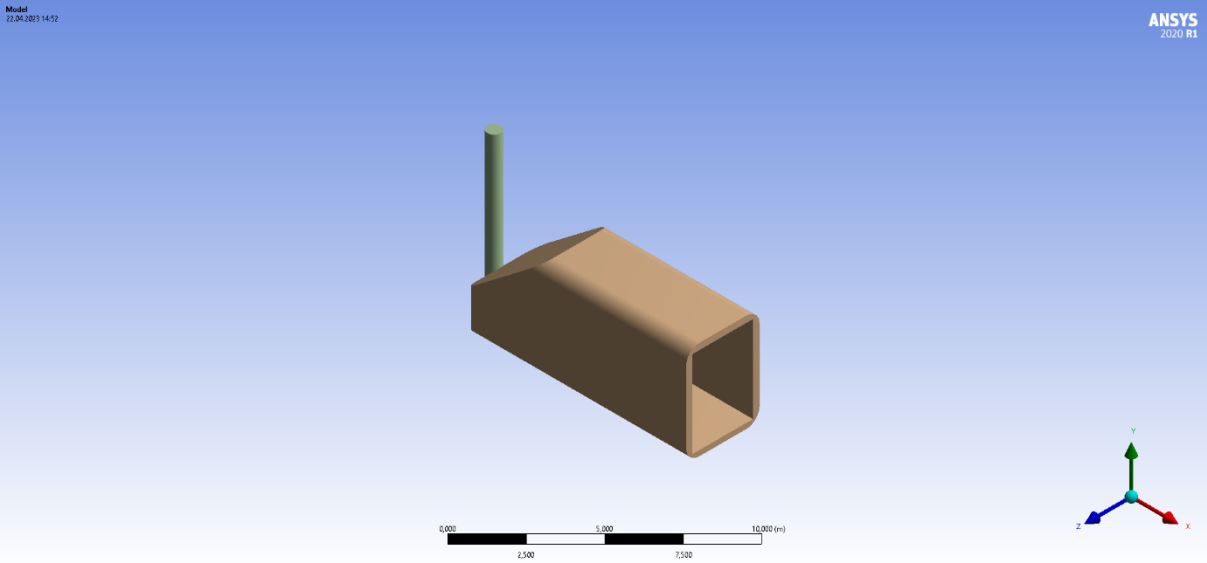


Figur 24: Simulering 1

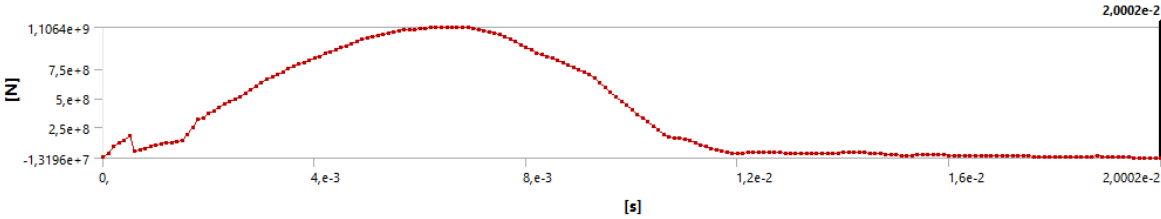


Figur 25: Simulering 1 resultat

# Simulering 2 – Tog modell 1, frontkollisjon med søyle – 160 km/t



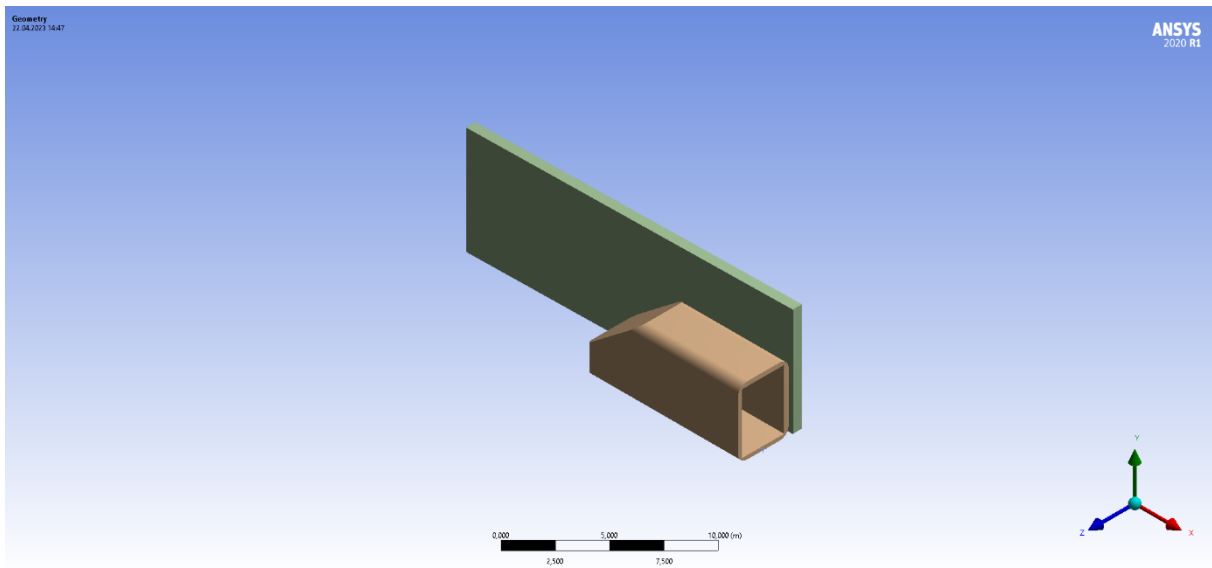
Figur 26: Simulering 2



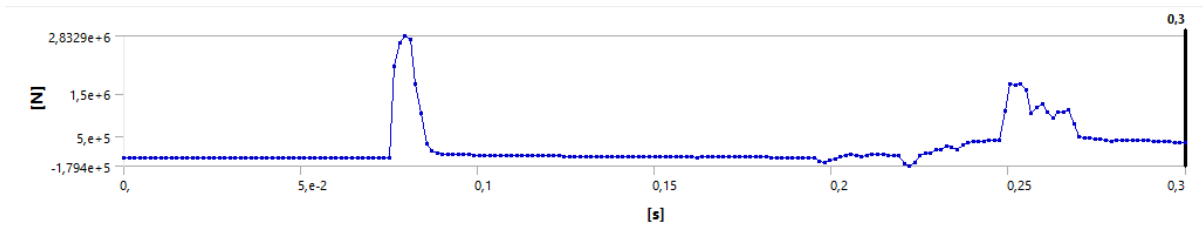
Figur 27: Simulering 2 resultat



### Simulering 3 – Tog modell 1, sidekollisjon med langside vegg – 160 km/t

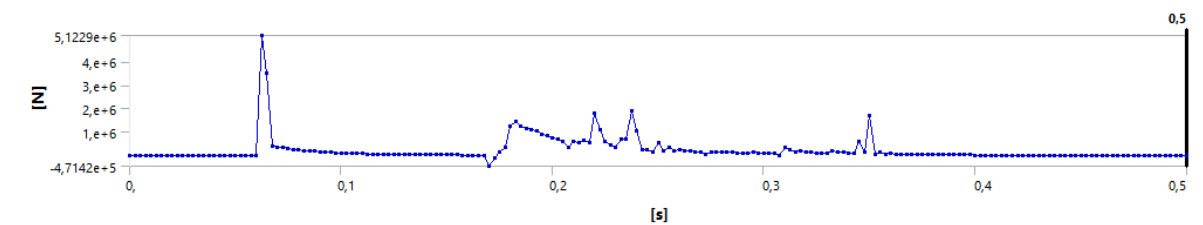


Figur 28: Simulering 3



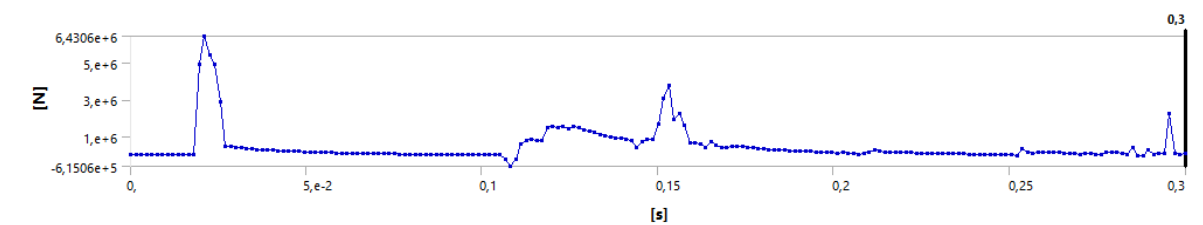
Figur 29: Simulering 3 resultat

### Simulering 4 – Tog modell 1, sidekollisjon – 200 km/t



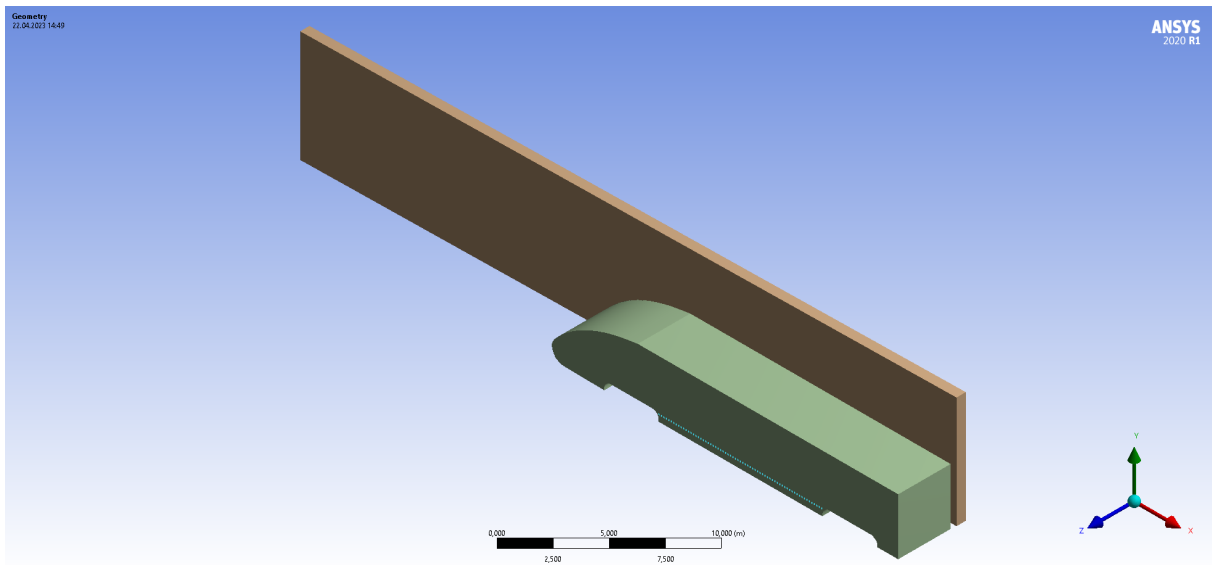
Figur 30: Simulering 4 resultat

### Simulering 5 – Tog modell 1, sidekollisjon – 250 km/t

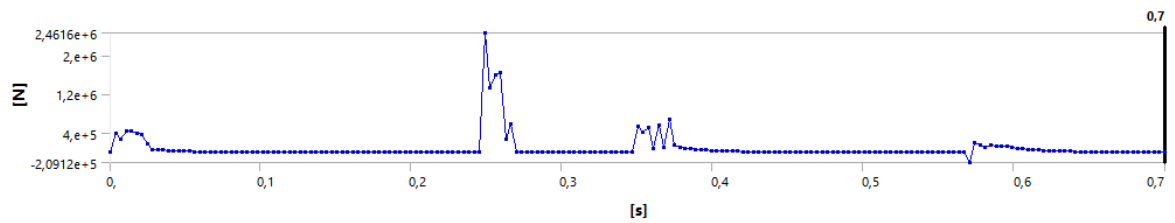


Figur 31: Simulering 5 resultat

### Simulering 6 – Tog modell 2, versjon 1 sidekollisjon – 160 km/t

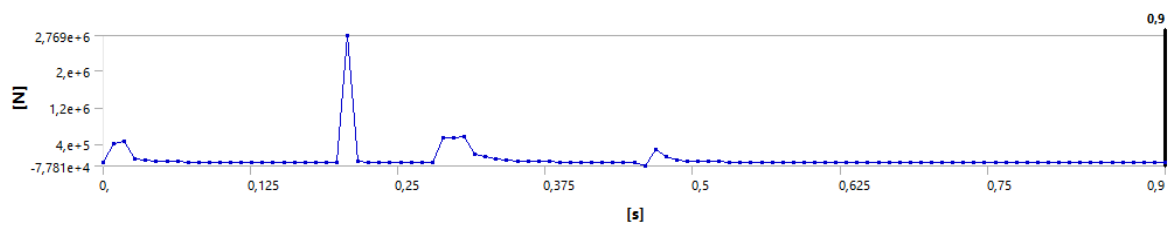


Figur 32: Simulering 6



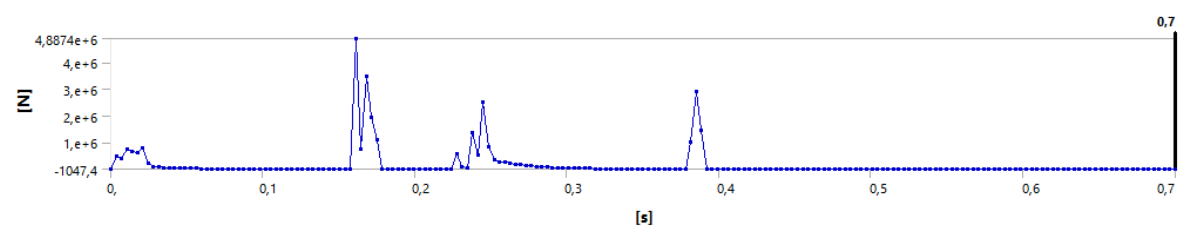
Figur 33: Simulering 6 resultat

### Simulering 7 – Tog modell 2, versjon 1 sidekollisjon – 200 km/t



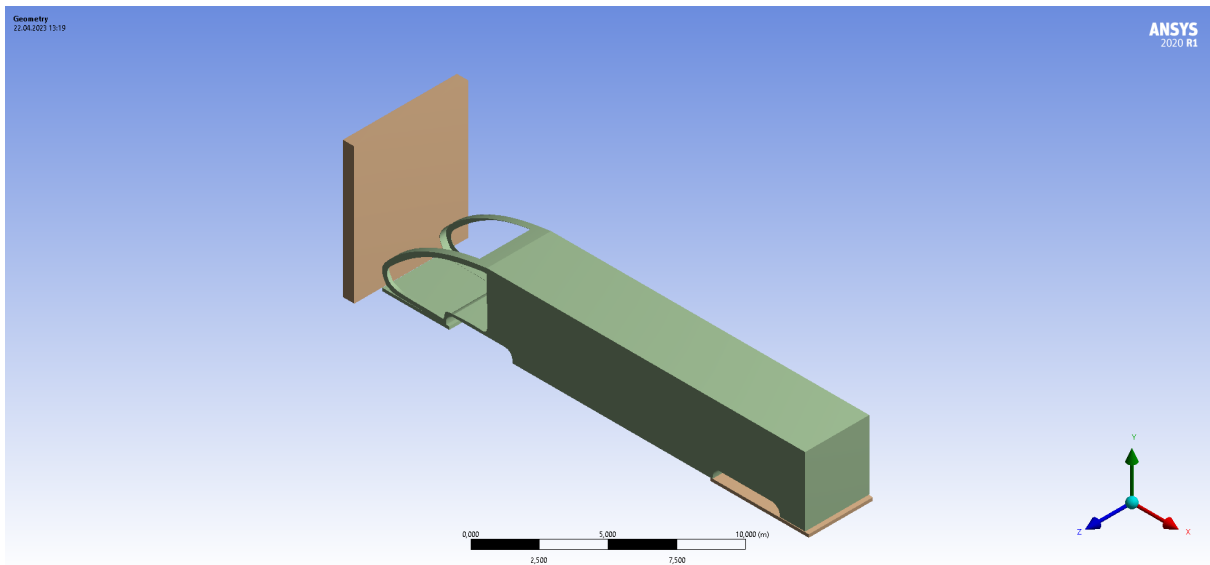
Figur 34: Simulering 7 resultat

### Simulering 8 – Tog modell 2, versjon 1 sidekollisjon – 250 km/t

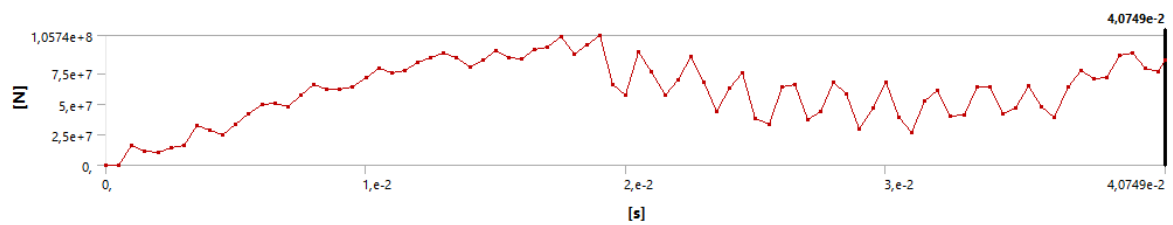


Figur 35: Simulering 8 resultat

## Simulering 9 – Tog modell 2, versjon 2 frontkollisjon med langside vegg – 160 km/t

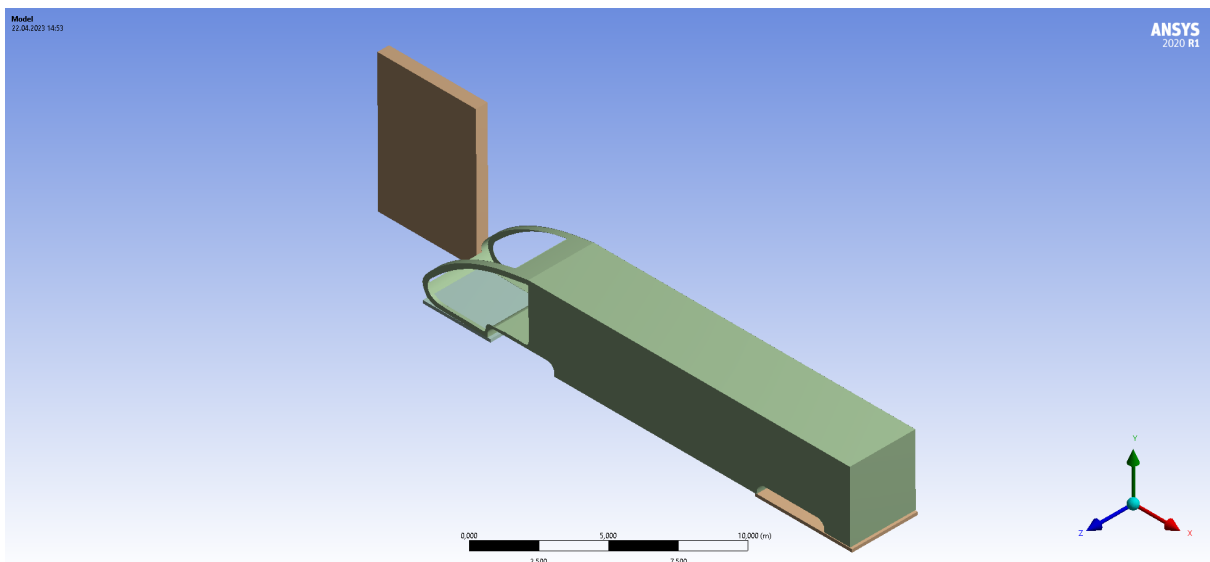


Figur 36: Simulering 9

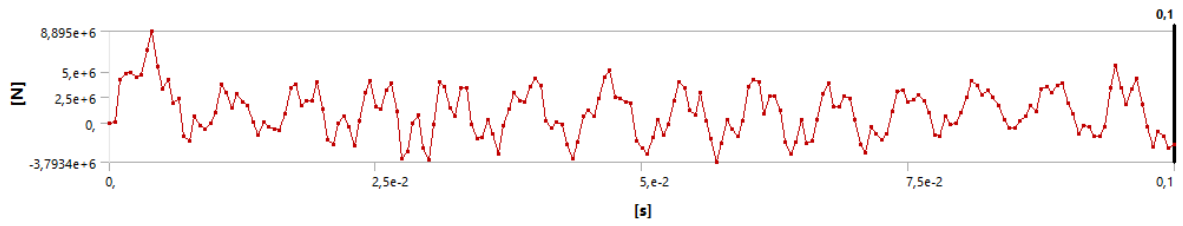


Figur 37: Simulering 9 resultat

## Simulering 10 – Tog modell 2, versjon 2 frontkollisjon bredside vegg – 160 km/t

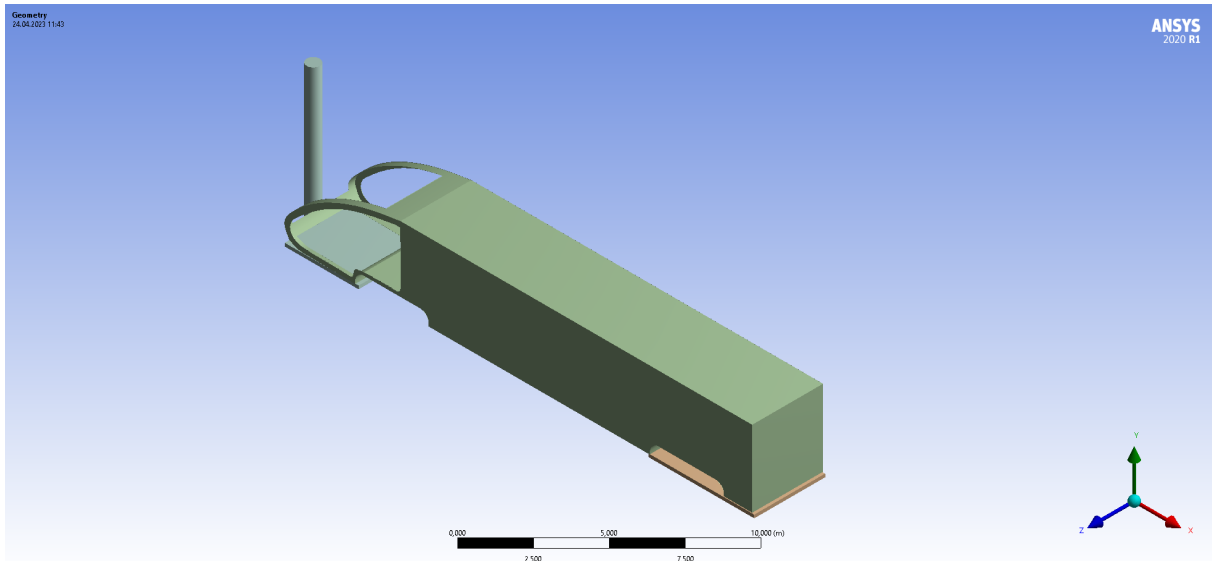


Figur 38: Simulering10

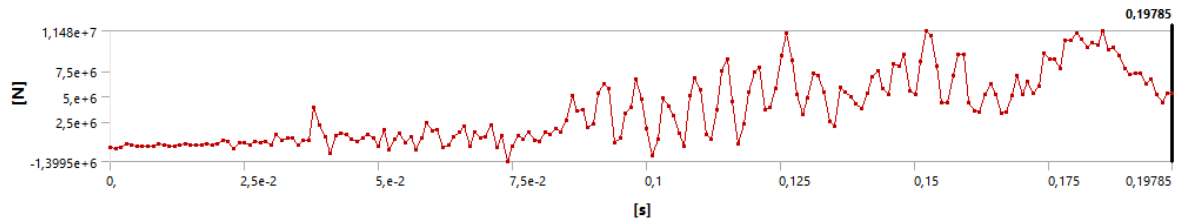


Figur 39: Simulering 10 resultat

**Simulering 11 – Tog modell 2, versjon 2 frontkollisjon med søyle – 160 km/t**



Figur 40: Simulering 11



Figur 41: Simulering 11 resultat

## 4.7 Simuleringer – resultater og diskusjon

### Resultater:

Tabell 3: Simuleringsresultater

Simulering	Maksimum slagbelastning
1	3 900 000 kN
2	1 106 400 kN
3	2 832,9 kN
4	5 122,9 kN
5	6 430,6 kN
6	2 416 kN
7	2 769 kN
8	4 887,4 kN
9	105 000 kN
10	8 895 kN
11	11 480 kN

En video av alle simuleringene kan ses her: <https://youtu.be/pwpDgq4pixg>

### Diskusjon

#### 4.7.1 Simulering 1 og 2

I simulering 1 deformerte veggen og toget med 0,11 m og 0,16 m, og i simulering 2 deformerte søylen og toget med 0,277 m og 0,25 m. Deformasjonen er veldig lav i disse tilfellene, og kan skyldes de høye påkjøringslastene.

#### 4.7.2 Simulering 3, 4 og 5

I simuleringene 3, 4, og 5 blir det simulert en sidekollisjon hvor toget kolliderte med en inngangsvinkel på 1 grad. Fra resultatene ser man at første slagbelastning gir den største belastningen på veggen, og øker ved stigende hastighet. En andre slagbelastning blir påført på veggen av slyngkraften første slagbelastning gir på toget. En tredje slagbelastning blir også påført, men for simulering 3 vises ikke dette på grunn av for kort tidsrom.

#### **4.7.3 Simulering 6, 7 og 8**

Slagbelastning 2 kommer fra slyngkraften fra baksiden av toget, forårsaket av det første slaget, og simuleringene 6,7 og 8 viser i motsetning til simuleringene 3,4, og 5, at slagbelastning 2 er størst, og er høyere enn det første slaget. Forklaringen skyldes bruk av ulike togmodeller i simuleringene, som forårsaker togmodell 1 og 2 til å treffe veggene ulikt.

#### **4.7.4 Simulering 9**

Målet med togmodell 2 versjon 2, var å simulere en høyere deformasjon for å dempe den høye kollisjonskraften fra togmodell 1. Noe mer deformasjon ble oppnådd, men ikke i den grad som var ønsket. Resultatet fra simuleringen ga en slagbelastning på 105 700 kN, og som følge av den høye slagbelastningen var det urimelig å simulere en togkollisjon for 200 og 250 km/t.

#### **4.7.5 Simulering 10 og 11**

I simuleringene 10 og 11 opplever togmodellen betraktelig mer deformasjon ved frontkollisjon mot bredside vegg, og søyle, i motsetning til simulering 9, hvor togmodellen kolliderer med langsideside vegg. På grunn av tekniske årsaker måtte tykkelsen til togmodellen bli oppgitt i geometri, istedenfor å bli importert fra SpaceClaim, som ble gjort i de andre simuleringene, og er grunnen til det skjer mer deformasjon.

## 5 Håndkalkulasjoner

Håndkalkulasjoner med Newtons andre lov, bevegelseslikning, støtdynamikk- og kinetisk energi formel, gjennomføres for sammenligning med Ansys simuleringene gjort i forrige kapittel.

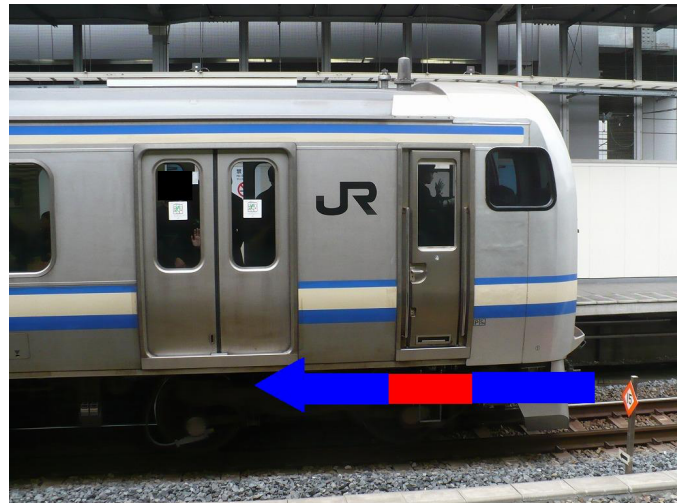
### 5.1 Kraft parallelt med spor

I utregningene blir det antatt en direkte påkjørsel på vegg, hvor veggen har en neglisjerbar deformasjon.

Ved bruk av den kinetiske energi formelen gitt under, kan man finne kraften utført på veggen.

$$F = \frac{\frac{1}{2} * m * v^2}{s}$$

- Hastigheten til toget,  $V$ : 120 km/t
- Massen til toget,  $m = 250\,000$  kg
- Deformasjonslengden til toget,  $s = 2,5$  m



Figur 42: Deformasjons område (Wikipedia, 2022)

Det tas utgangspunktet i toget, E217 fra figur 42, som har en gitt deformasjonssone vist av pila. Deformasjonslengden er ikke spesifisert, men ved hjelp av teknisk data om dobbeltdørenes dimensjoner, estimeres deformasjonslengden til ca. 2,5 m. (E217series).

$$F = \frac{0,5 * 250\,000 * 33,33^2}{2,5} = 55\,544\text{ kN}$$

Slagbelastnings tidsforløp med formelen:  $F\Delta t = mv$

$$\Delta t = \frac{250\,000 * 33,33}{55\,544\,000} = 0,15\text{ sekunder}$$

Slagbelastning og tidsforløp for 160, 200 og 250 km/t er gitt i tabellen under.

Tabell 4: Resultat av formel basert på newtons andre lov

Fart	160 km/t	200 km/t	250 km/t
Kraft, F	96 800 kN	151 250 kN	238 050 kN
Tidsforløp, t	0,113 s	0,09 s	0,072 s

I realiteten vil tidsforløpet til en togkollisjon ha en lengre varighet enn beregnet, da deformasjonen til vegg er neglisjert. For mer nøyaktighet bør veggens deformasjon inkluderes. I tillegg er slagbelastningen kun beregnet for et legeme, mens i realiteten består et tog av flere legemer, bestående av vogner, som vil under en kollisjon, utsette en vegg for flere slagbelastninger. Dette er veldig komplisert og bør gjøres i avansert programvare.

## 5.2 Kraft vinkelrett på spor

Det blir ikke antatt en direkte påkjørsel, og det brukes derfor en lavere vekt for å reflektere dette. I likhet med kapittel 5.1 blir det antatt at vegg har neglisjerbar deformasjon. Kraft vinkelrett på spor,  $F_t$  er illustrert i Figur 43, kapittel 7.

Bruker samme formel:

$$F_t = \frac{\frac{1}{2} * m * v^2 * \sin\theta}{s}$$

- Hastighet, V: 120 km/t
- Masse, m = 50 000 kg
- Deformasjonslengde, s = 2,5 m
- Inngangsvinkel,  $\theta = 1^\circ$

$$F_t = \frac{\left(\frac{1}{2} * 50\,000 * 33,33^2 * \sin(1)\right)}{2,5} = 193,88KN$$

Tidsforløp for 120 km/t

$$\Delta t = \frac{50\,000 * 33,33}{193\,880} = 8,59 \text{ sekunder}$$

Et tidsforløp på 8,59 sekunder for en slagbelastning regnes som urealistisk. Tidsforløpet for de andre hastighetene blir derfor ikke oppgitt.



Slagbelastning for 160, 200 og 250 km/t er gitt i tabellen under.

Tabell 5: Resultat av av formel basert på newtons andre lov, vinkelrett på spor

Fart	160 km/t	200 km/t	250 km/t
Kraft, Ft	345 kN	539 kN	842 kN

Bruk av denne formelen gir urimelig lave verdier. I en studie gjort av Hyun-Ung Bae, Kyung-Min Yun, Jiho Moon, og Nam-Hyoung Lim hvor de evaluerte kollisjonskreftene på «containment wall» for høyhastighetstog gjennom flere kollisjonssimuleringer. Viste resultatene fra en simulering på 300 km/t med inngangsvinkel på 0,3-0,4°, en maks slagbelastning på 4064 kN. (Bae, Yun, Moon, & Lim, 2018). Ved bruk av:

$$F_t = \frac{1}{2} * m * v^2 * \sin\theta$$

med hastighet 300 km/t med inngangsvinkel 0,4°, blir slagbelastningen 485 kN. En alternativ metode med bruk av bevegelsesmengde før- og etter kollisjon, brukes videre for mer nøyaktighet.

Ved en sidekollisjon på vegg, vil ikke all kinetiske energi bli overført til veggen. Hvor mye energi som overføres er avhengig av flere variabler, blant annet togets hastighet, inngangsvinkel, og om kollisjonen er et hardt eller et mykt støt.

Det blir antatt at 10% av bevegelsesenergien overføres til veggen under en sidekollisjon fra et tog. Hastigheten til toget er 120 km/t, og kollisjonen har en varighet på 0,1 sekunder. Med formelen,  $P = mv$  gir dette en impuls:

$$P = mv = 0,1 * 250000 \text{ kg} * 33,33 \frac{m}{s} = 833250 \text{ Ns}$$

Dette gi en slagbelastning på:

$$F = \frac{I}{t} = \frac{833250}{0,1} = 8332500 \text{ N} = 8332,5 \text{ kN}$$

Fra Bane NORs tekniske regelverk er påkjøringslasten for hastighetsområde 50 – 120 km/t, 3000 kN. (Bane NOR, 2021). Sammenlignet med resultatet fra siste utregning, er det mer enn dobbelt så mye. Hvis det istedenfor antas at 5% av bevegelsesenergien fra toget blir overført til veggen under en sidekollisjon, med samme varighet, blir slagbelastningen 4166 kN. Dette stemmer mer overens med påkjøringslasten gitt i teknisk regelverk. Utregningen er gitt under:

Impuls:

$$P = mv = 0,05 * 250000 \text{ kg} * 33,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 833250 \text{ Ns}$$

Slagbelastning:

$$F = \frac{I}{t} = \frac{416625}{0,1} = 4166250 \text{ N} = 4166 \text{ kN}$$

### 5.3 Støtdynamikk

Fra kapittel 3.5 støtdynamikk er den dynamiske interaksjonskraften gitt som:

$$F = V_r \sqrt{km}$$

$k$  – verdien for tog har ikke blitt fastsatt i NS-EN 1991-1-7, eller andre relevante standarder. På grunn av manglende informasjon angående  $k$  – verdi, brukes  $k = 300 \text{ kN/m}$  for bil, gitt i studien fra Lin Chen, Hao Wu og Tao Liu (Chen, Wu, & Liu, 2020).

$$m = 250\,000 \text{ kg}$$

$$V_r = 33,33 \text{ m/s (120 km/t)}$$

Dynamisk interaksjonskraft:

$$F = 33,33 \sqrt{300\,000 * 250\,000} = 9128 \text{ kN}$$

Tidsforløp:

$$t = \frac{mv}{F} = \frac{250\,000 * 33,33}{9\,128\,000} = 0,912 \text{ sekunder}$$

Resultatene for 120, 160, 200 og 250 km/t er gitt i tabell 6.

Tabell 6: Resultat av støtdynamikk formelen

<b>Fart</b>	<b>120km/t</b>	<b>160km/t</b>	<b>200km/t</b>	<b>250km/t</b>
<b>Kraft, F</b>	9128 kN	12170 kN	15213 kN	19017 kN
<b>Tidsforløp, t</b>	0,912 s	0,912 s	0,912 s	0,912 s

## 6 Risikoanalyse

I risikoanalysen kartlegges risikoen forbundet med tog som ferdes på jernbanenettverket i Norge, med hastigheter over 120 km/t. Risikoanalysen gjøres i henhold til tillegg B fra NS-EN 1991-1-7 og består av to deler, kvalitativ- og kvantitativ risikoanalyse.

I den kvalitative vurdering, identifiseres mulige kilder til togavsporing, hvilke farefulle hendelser som kan oppstå, og beskrivelse av mulige konsekvenser (NS-EN 1991-1-7, B.4.1).

I den kvantitative vurderingen, beregnes avsporingsfrekvensen, sannsynligheten for at et tog kolliderer med bærende konstruksjon, og sannsynligheten for at en bro kollapser.

En risikoevaluering gjennomføres, og til slutt hvilke tiltak som kan redusere risikoen.

Informasjon om utgitte rapporter om togavsporinger i Norge er hentet fra Statens havarikommisjon for transport (SHT). SHT har siden 2002 undersøkt alle alvorlige ulykker i forbindelse med jernbanen, der store materielle skader har blitt påført på tog eller andre objekter i nærheten av togsporet. Hendelser der mennesker har blitt skadet eller mistet livet ved jernbanen har også blitt undersøkt. Pågående undersøkelser inkluderes ikke av usikkerhet knyttet til hendelsesforløp og årsak.

### 6.1 Kvalitativ risikoanalyse

#### 6.1.1 togavsporings årsaker

En togavsporing kan forekomme av flere årsaker. Det er listet under ulike årsaker som kan forårsake et tog til å avspore:

- Sporveksel
- Feil på infrastruktur
- Feil/slitasje på hjul
- Teknisk systemfeil på signalsystem. Feil eller manglende varslings.
- Uønsket materiell på skinner
- Feilfordelt last

- Solslyng
- Menneskelig feil.
- Kommunikasjonssvikt mellom fører av toget og annet personell
- Overskridelse av tillatt hastighet på en gitt strekning, særlig i en kurve
- Sabotasje/terrorangrep

Avsporing behøver ikke å ende i noe seriøst eller katastrofalt utfall. De fleste avsporingene skjer ved sporveksel i lav hastighet, og forårsaker som regel skade i mindre omfang på infrastruktur. Det er avsporing i høyere hastighet nærme konstruksjoner som utgjør stor fare. Togulykker har i nyere tid vist at tog med en høy hastighet vil gi betraktelig større konsekvenser ved avsporing, enn ved lavere hastighet. Ved høy hastighet er den kinetiske energien betydelig høyere enn ved lav hastighet, som følge av at den kinetiske energien øker med kvadrat av hastigheten. Tog som avsporer i høy hastighet, er ytterst sjeldent. Fra Statens havarikommisjon for transport (SHT) er det kun registrert en ulykke i Norge der et tog avsporet med en hastighet på over 120 km/t. Togavsporingen skjedde ved Nykirke stasjon på Vestfoldbanen, 2012. Fra rapporten om togavsporing gjort av SHT, blir det oppgitt at toget hadde en hastighet på 130 km/t på en strekning der tillatt hastighet var 70 km/t. Den utløsende faktoren til avsporing var for høy hastighet forårsaket av menneskelig feil, der føreren av toget hadde oversett varslet hastighetsreduksjon til 70 km/t (Statens havarikommisjon, 2013).

### **6.1.2 Tillat toghastighet i Norge**

Tillatt hastighet for tog vil variere avhengig av type tog, og hva slags hastighet en toglinje er dimensjonert for å tåle. I Norge er høyeste tillatte hastighet for tog, 250 km/t. Dette gjelder kun for Vestfoldbanen og Follobanen (Wikipedia, 2022). Ca. 30 prosent av jernbanenettverket har kapasitet til å tåle hastigheter på mer enn 100 km/t, mens kun 1,2 prosent tåler hastigheter på mer enn 160 km/t (Wikipedia, 2023).

Det er åpnet for diskusjon om bygging av nye høyhastighetsbaner i Norge, der blant annet mulighetene for bygging av høyhastighetsbane mellom Oslo – Stockholm og Göteborg vurderes (Bane NOR, 2023). Den tillatte hastigheten på toginfrastrukturen i fremtiden vil mest sannsynlig øke, etter hvert som infrastrukturen gjennomgår oppgraderinger som tillater høyere hastighet, samt reduseres reisetiden.

### 6.1.3 Fremtidig trafikk

Den fremtidige togtrafikken er ventet til å øke, særlig rundt byområdene. Flere strekninger har kapasitetsutfordringer, og flere prosjekter er under utbygging og planlegging. Bane NOR bygger blant annet et nytt dobbeltspor mellom Stokke og Sandefjord for å åpne for mer trafikk og høyere hastighet mellom Oslo og Skien. Det bygges også ny togtunnel mellom Arna og Bergen som vil utgjøre et nytt dobbeltspor, sammen med opprinnelig tunnel. Det vil øke kapasiteten på denne strekningen (Bane NOR).

### 6.1.4 Ulykkessituasjon

En hypotetisk ulykkessituasjon hvor et tog avsporer i høy hastighet, vil være avhengig av ulike faktorer, se kapittel 6.1.1.

Ulykkessituasjon der et tog avsporer kan være:

- Toget avsporer og kolliderer med en bro/konstruksjon med eller uten kollaps av konstruksjonen.
- Toget avsporer og kolliderer med et annet tog på samme spor eller spor som går ved siden av.
- Toget avsporer og treffer trær, skilt, mennesker eller andre objekter i nærheten av banesporet.
- Toget avsporer og begynner å brenne.
- Toget avsporer, og farlige kjemikalier blir sluppet ut.

Ulykkessituasjoner nevnt ovenfor er basert på tidligere ulykker. Andre ulykkessituasjoner kan oppstå.

### 6.1.5 Konsekvensklasser – ulykkessituasjon

Ifølge NS-EN 1991-1-7, kan en dimensjonerende ulykkessituasjon baseres på følgende konsekvensklasser:

Tabell 7: Dimensjonerende ulykkessituasjoner – bruk av konsekvensklasser (NS-EN 1991-1-7: 2006+NA:2008, s 15)

<b>CC1</b>	«Små konsekvenser ved brudd»
<b>CC2</b>	«Middels konsekvenser ved brudd»
<b>CC3</b>	«Store konsekvenser ved brudd»

En dimensjonerende ulykkessituasjon for de forskjellige konsekvensklassene, kan fra NS-EN tas hensyn på følgende måte:

Tabell 8: Dimensjonerende ulykkessituasjoner – brok av konsekvensklasser (NS-EN 1991-1-7: 2006+NA:2008, s 16)

<b>CC1</b>	«Ingen bestemte hensyn er nødvendige for ulykkeslaster bortsett fra å sikre de aktuelle reglene for robusthet og stabilitet gitt i henholdsvis NS-EN 1990 til NS-EN 1999, følges.»
<b>CC2</b>	«Avhengig av de særegne forhold som gjelder for konstruksjonen, kan en forenklet analyse ved hjelp av en modell for statiske ekvivalent påvirkning eller forskrevne prosjekterings/konstruksjonsregler brukes»
<b>CC3</b>	«En undersøkelse av det særskilte tilfellet bør utføres for å bestemme nødvendig pålitelighetsnivå og omfanget av konstruksjonsanalysen. Dette kan kreve gjennomføring av en risikoanalyse og brok av nøyaktige metoder, f.eks. dynamiske analyse, ikke lineære modeller og samvirke mellom last og konstruksjon»

### 6.1.6 Konsekvenser

Et tog som avsporer i høyere hastighet kan gi en rekke konsekvenser av ulik grad.

Alvorlighetsgraden av konsekvensene til et tog som avsporer, er avhengig av blant annet farten til toget, omgivelsene der avsporingen skjer, og hvordan toget avsporer.

#### Personskader

Ulykker i forbindelse med togavsporing i høy hastighet kan gi alvorlige personskader, og kan i verste fall føre til dødsfall blant passasjerer, personell eller fotgjengere som befinner seg i nærheten av togsporet. Siden år 2000 har totalt 34 mennesker omkommet i togulykker i Norge (Wikipedia, 2023). Ingen av dødsfallene er fra avsporet tog i høy hastighet. Kun en person har blitt hardt skadet, og fire lettere skadet (SHA).

#### Materielle skader

En avsporing i høyere hastighet, vil i de fleste tilfeller føre til store materielle ødeleggelser. Det inkluderer ødeleggelser av togvogner, skinner, signal/kontaktledning/veisikring/bomanlegg, og annen infrastruktur. En avsporing vil i de fleste tilfeller føre til materielle ødeleggelser på togsettet. Dersom et tog avsporer i høy

hastighet mot en konstruksjon og en påkjørsel skjer, vil de materielle ødeleggelsene på toget og konstruksjonen være store. Et eksempel på det, er Eschede-ulykken nevnt i introduksjonen.

Tabell 9: Slagbelastning mot konstruksjon – konsekvenser

<b>Slagbelastning mot konstruksjon – konsekvenser</b>	
<b>Små konsekvenser</b>	Ingen strukturelle skader eller tap av bæreevne. Kun små utvendige skader i form av små sprekker eller løsnet betongbiter som kan fikses.
<b>Middels konsekvenser</b>	Noen strukturelle skader. Svekket bæreevne. En vurdering på om det må fikses eller byttes, må tas.
<b>Store konsekvenser</b>	Store strukturelle skader. Kan føre til kollaps av konstruksjonen. Skadet konstruksjonselement må byttes ut.

### **Trafikale problemer**

Et tog som avsporer, vil føre til trafikkforstyrrelse på jernbanenettverket, og resultere i at andre tog kan blir forsinket, eller omdirigert til andre ruter, hvis mulig. Dette kan gi ulemper for reisende passasjerer.

### **Miljøproblemer**

Tog som transporterer farlige stoffer, olje eller giftige kjemikalier, og avsporer, kan gi både kortvarige, og langvarige miljøproblemer ved utslipp. Område utsatt for utslipp kan gi skader på dyreliv, planter og jordsmonn. I tillegg kan også vann og luft bli forurenset av giftige kjemikalier, og gi helseskader på mennesker og dyr.

### **Økonomiske konsekvenser**

Ødeleggelsene en togavsporing medfører, vil gi store økonomiske tap, og må dekkes av ansvarlige parter. Personskader i forbindelse med en togulykke dekkes av forsikringsselskapet. En togavsporing vil også føre til økonomisk tap for andre parter involvert, i form av frakt av varer og tjenester.



## 6.2 Kvantitativ risikoanalyse.

### 6.2.1 Sannsynlighetsregning for avsporing

For beregninger av sannsynligheter for avsporing, følges UIC 777-2 *Appendix F* prosedyre for risikovurdering av klasse B-konstruksjoner.

### 6.2.3 Avsporingsfrekvens

Tabellen under er utarbeidet gjennom informasjon om avsporinger for gods- og persontog, hentet fra Statens havarikommisjon for transport (SHT).

Tabellen inneholder antall togkm gods- og persontog har tilbakebrakt, og antall avsporing i perioden 2002-2021, hentet fra SHTs skaderapporter. Avsporing som følge av passering av endebutt er ikke relevant, og inkluderes ikke.

I tabellen under er det summert opp antall togkm for gods- og persontog hentet fra SJTs sine årlige rapporter, samt er avsporinger som er blitt undersøkt av SHT i perioden 2002-2021 (Statens havarikommisjon). Her er ikke avsporinger på grunn av passeringer av endebutt, blitt tatt med. Til slutt er avsporingsfrekvens per 100 millioner togkm, beregnet.

For fordeling av togkm på stasjon/sporvekslområde mot linje, brukes samme fordeling antatt av Terje Andersen, fra rapport gjort for Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen Trondheim AS (Andersen, Leangerlokket - Dimensjonerende laster for brann og påkjørsel, Trondheim).

- «For godstog: 15% av togkm ved stasjon/sporvekselområde og 85% for linjen utenom.»
- «For persontog: 20% av togkm ved stasjon/sporvekselområde og 80% for linje utenom.» (Andersen, Leangerlokket - Dimensjonerende laster for brann og påkjørsel, Trondheim)

Tabell 10: Togkm og avsporingsfrekvens i Norge (Andersen, Leangerlokket - Dimensjonerende laster for brann og påkjørsel, Trondheim)

Togtype	Antall togkm i registreringsperioden 2002-2021 (Statens jernbanetilsyn) (Jernbanedirektoratet, 2022)	Totalt antall avsporinger 2002-2021 (SHT)			Avsporingsfrekvens per 100 mill. Togkm	
		Ved stasjon	På linjen	Totalt	Ved stasjon	på linje
Persontog	693 mill togkm	6	2	8	4,3	0,3
Godstog	167 mill togkm	18	12	30	71,9	8,4

UIC 777-2 har oppgitt en avsporingsfrekvens for person- og godstog, gitt i tabell 11.

Tabell 11: Avsporingsfrekvens fra for spor med og uten veksel, (UIC, 2002, s 27)

	Spor uten veksel (vanlig bane) (togkm)	Spor med veksel (basert på togstasjoner) (togkm)
Person tog	$0,25 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-8}$
Godstog	$2,5 \times 10^{-8}$	$25 \times 10^{-8}$

De norske avsporingsfrekvensene er noe høyere for godstog, og mer spesifikt for godstog. I perioden 2013-2021 har det kun vært en avsporing for persontog, og det under skift. Avsporing for norske persontog de siste årene har vært 1,4 per 100 millioner togkm (stasjon), og 0 per 100 millioner togkm (linje). Det brukes derfor UIC 777-2 sine tall for persontog, og den norske erfaringen for godstog.

Kritisk linje for avsporing ved 160 km/t regnes ut ved hjelp av bevegelsesligningene. Fra utregningene blir det funnet at kritisk linje for avsporing ved 160 km/t, er 329,1 m for bro/overgang. Utregningen er vist under:

$$v_0 = 44,4 \text{ m/s,}$$

$$v = 0$$

$$a = -3 \text{ m/s}^2 \text{ (hentet fra UIC 777-2)}$$

$$v = v_0 + at \rightarrow t = 14,81$$

$$s = 0.5(v + v_0) * t \rightarrow 329,1 \text{ m} \approx 330 \text{ m}$$

UIC 777-2 bruker formelen:  $\frac{v^2}{80}$  (hvor  $v^2$  er oppgitt i km/t) som gir 320 meter, og stemmer overens med utregningen av kritisk linje.

Ved bruk av formel, hentet fra UIC 777-2, kan en regne ut avsporingsfrekvensen:

$$e_r * d * Z_d * 365 * 10^{-3}$$

I 2019 utgjorde godstog 16,5% av togkm i Norge (SHT), 16,5% av togtrafikken på 1 spor er godstog, og ved 2 spor er den 8%. I realiteten er togtrafikken for godstog på 2 spor mindre enn 8%, men det finnes ingen tall for dette.

Halvere godstog-km ved 2 spor, på bakgrunn av at 2 spor har en tendens til å være mellom to eller flere byer. UIC 777-2 foreslår en verdi på 100 tog til dagen, på 1 spor, og 200 tog på 2 spor.

#### **Avsporingsfrekvens på linje med 1 spor:**

$$\text{Årlig avsporingsfrekvens godstog: } 8,4 * 0,330 * 16 * 365 * 10^{-8} = 16,18 \times 10^{-5}$$

$$\text{Årlig avsporingsfrekvens persontog: } 0,25 * 0,330 * 84 * 365 * 10^{-8} = 2,52 \times 10^{-5}$$

$$\text{Sum} = 1,87 \times 10^{-4}$$

#### **Avsporingsfrekvens på linje med 2 spor:**

$$\text{Årlig avsporingsfrekvens godstog: } 8,4 * 0,330 * 16 * 365 * 10^{-8} = 16,18 \times 10^{-5}$$

$$\text{Årlig avsporingsfrekvens persontog: } 0,25 * 0,330 * 184 * 365 * 10^{-8} = 5,5407 \times 10^{-5}$$

$$\text{Sum} = 2,17 \times 10^{-4}$$

Dette gir en returperiode for en gjennomsnittlig bro over 1 spor, 5348 år, for 2 spor 4608 år.

Det betyr i teorien at en bro ikke vil bli utsatt for slagbelastning fra et avsporet tog, i løpet av broens levetid, men settes sannsynligheten til 1000 broer (oppdiktet tall), minsker tallet betydelig. Med 1000 broer, er returperioden på 5,34 år, mellom hver gang et tog i teorien skal avspore på vei mot en bro, og dette er uten sporveksling.

#### 6.2.4 Sannsynlighet for at toget kolliderer med bærekonstruksjon

En viktig del av risikovurdering, er sannsynligheten for at et tog kolliderer med en konstruksjon, gitt at den sporer av innenfor kritisk linje. For å beregne dette brukes formler gitt under fra UIC 777-2.

Forutsatt retardasjon for avsporede tog:  $a = -3 \text{ m/s}^2$  (UIC, Appendix F, s 27)

$$\text{Likning 2a (enkeltspor): } P2 = \left[ \frac{b-a}{b} \right]^2 \times 0,5 \times \frac{c}{d}$$

$$\text{Likning 2b (dobbeltspor): } P2 = \left[ \left[ \frac{b-a}{b} \right]^2 + \left[ \frac{b-(a+4,2)}{b} \right]^2 \right] \times 0,25 \times \frac{c}{d}$$

$$\text{Likning 3} \quad c = \left( \frac{d}{b} \right) \times (b - a)$$

For 160 km/t med 3 meter avstand fra senterlinje-togspor til bærende konstruksjon, gir dette:

$$c = \left( \frac{330}{16,3} \right) \times (16,3 - 3) \Rightarrow 269$$

$$P2_a = \left( \frac{16,3 - 3}{16,3} \right)^2 \times 0,5 \times \frac{269}{330} = 0,27$$

$$P2_b = \left[ \left( \frac{16,3 - 3}{16,3} \right)^2 + \left[ \frac{16,3 - (3 + 4,2)}{16,3} \right]^2 \right] \times 0,25 \times \frac{269}{330} = 0,20$$

Formlene ovenfor gir følgende verdier for  $P2_a$  og  $P2_b$ , gitt i tabell 12 og 13.

P2<sub>a</sub>:

Tabell 12: Sannsynlighet for at tog kolliderer med bro, 1 spor

Horisontal avstand (a) (m)	Fart Ved Avsporing (km/t)		
	160	200	250
3	0,27	0,29	0,31
5	0,17	0,19	0,22
7	0,09	0,12	0,15
10	0,03	0,05	0,07

P2<sub>b</sub>:

Tabell 13: Sannsynlighet for at tog kolliderer med bro, 2 spor

Horisontal avstand (a) (m)	Fart Ved Avsporing (km/t)		
	160	200	250
3	0,20	0,22	0,25
5	0,12	0,14	0,17
7	0,06	0,08	0,11
10	0,02	0,05	0,05

Utregningene tar ikke hensyn til sidelengs motstand skapt av toglinjene. For P2<sub>b</sub> er det antatt at det ikke er noen skillevegg mellom linjene, og at dem ligger ved en avstand på 4,2 meter (UIC 777-2, Appendix F.2).

### 6.2.5 Sannsynlighet for at broen kollapser som et resultat av en kollisjon

Det absolutt verste tilfellet av en kollisjon mellom tog og bro, er delvis eller full kollaps av broen. Det er derfor en viktig del av risikovurderingen å regne ut sannsynligheten for at broen kollapser i det tilfellet.

Formelen under har to antagelser. Første antagelse er at  $\alpha = 1$ , for alle kollisjoner i en hastighet på 60 km/t eller over, ender med kollaps av bro. Andre antagelse er forutsatt retardasjon for avsporede tog:  $a = -3 \text{ m/s}^2$ . I praksis vil ikke alle kollisjoner ende med kollaps hvis kollisjonen skjer i 60 km/t eller høyere. En mer realistisk konservativ alfa verdi på  $\alpha = 0,8$  velges istedenfor. Verdien tilsier at de fleste kollisjoner på bærende konstruksjon vil ende med kollaps, men ikke alle tilfeller.

UIC 777-2 har gitt følgende formel, hentet fra Appendix F.3:

$$P3 = \left( 1 - \frac{2}{3} * \left[ \frac{t(2b - 2a - t)}{(b - a)^2} \right] \right) * \alpha$$

Tabell 14: Sannsynlighet for at broen kollapser ved kollisjon (p3)

Horisontal avstand (a) (m)	Fart Ved Avsporing (km/t)		
	160	200	250
<b>3</b>	0,76	0,78	0,79
<b>5</b>	0,72	0,76	0,78
<b>7</b>	0,68	0,74	0,77
<b>10</b>	0,56	0,68	0,74

P3 tar ikke hensyn til eventuelle forsterkninger gjort mot kollisjoner.

### 6.2.6 Risikoevaluering

I risikoanalysen blir det gjort klart at en togavsporing kan forekomme av ulike årsaker, og at konsekvensene ved en togavsporing i høyere hastighet er betraktelig høyere, enn ved lav hastighet. Fra 6.2.3 avsporingfrekvens, er den norske avsporingfrekvensen lav for persontog, hvor kun to avsporinger på linje har skjedd i perioden 2002-2021. Ingen ulykker der et tog avsporer i høyere hastighet mot en bærende konstruksjon, er registrert, og det er ingenting som tyder på at bærende konstruksjoner over jernbanen, er under stor risiko for slagbelastning fra avsporet tog. På bakgrunn av den informasjonen er det ingen grunnlag for å iverksette ytterligere tiltak for beskyttelse. Det kan konkluderes med at det er veldig trygt for høyhastighetstog å ferdes på jernbanen, og sannsynligheten for avsporing er lav.

Skulle en bro bli utsatt for kollisjon fra et avsporet tog, kan det være aktuelt å styrke robustheten til broen for å unngå kollaps. Fra 6.2.5, er sannsynligheten for at en bro kollapser under en kollisjon, hvor hastigheten er 160 km/t, og bærende konstruksjon er på 10 m avstand, 56%. Sannsynligheten øker til 68% for 200 km/t, og 74% for 250 km/t. Disse sannsynlighetene er høye verdier for en avstand på 10 m. 6.3 gir forslag til forebyggende og beskyttende tiltak for bærende konstruksjoner.

## 6.3 Forebyggende og beskyttende tiltak

### 6.3.1 Forebyggende og beskyttende tiltak for klasse B-konstruksjoner

Det anbefales at det tas en spesifikk vurdering av klasse B-konstruksjoner innenfor et togs avsporingsområde, for å etablere de tiltak som gir optimalisert beskyttelse av konstruksjonen. Forebyggende og beskyttende tiltak skal ha som formål å avlede et tog ved avsporing bort fra bærende konstruksjoner, og mennesker, samt redusere konsekvensene til et minimum ved en eventuell avsporing. Det legges særlig vekt på målet med tiltak at ingen menneskeliv skal gå tapt, eller bli skadet. Materiell ødeleggelse kan aksepteres til den grad at menneskeliv ikke vil bli satt i livsfare.

NS-EN 1991-1-7 anbefaler følgende tiltak til vurdering av klasse B-konstruksjoner: (NS-EN 1991-1-7 B.9.4 (2))

- Sikre robustheten til konstruksjonens underbygning mot sammenstøt fra et avsporet tog, for å redusere sannsynligheten for kollaps av konstruksjonen.
- Sikring av overbygningens spennere, for å hindre kollaps av konstruksjonen mot et sammenstøt med konstruksjonens underbygning fra et avsporet tog
- Begrense sideveis forflytning til et avsporet tog med tiltak for å redusere sannsynligheten for kollisjon med konstruksjon.
- Øke sideveis klaring til konstruksjonen for å redusere sannsynligheten for kollisjon fra et avsporet tog
- Unngå plassering av konstruksjon i nærheten av sporveksel for å redusere sannsynligheten for at et avsporet tog blir ledet mot konstruksjonen.
- Bygge kontinuerlige vegger for å redusere sannsynligheten for kollaps av konstruksjonen som følge av slagbelastning fra et avsporet tog
- Overbygg med atskilte søyler, der unngåelse av atskilte søyler ikke er mulig, vil det være ønskelig at søylene har tilstrekkelig med bæreevne til å bære overbygget skulle en søyle miste sin bæreevne ved en kollisjon.
- Installering av bøyeinnretning og absorberende innretning der det er aktuelt for å redusere sannsynligheten for slagbelastning mot konstruksjonen.

Andre aktuelle tiltak kan være:

- Sjekk av feil på sporveksel
- Installering av sensorer for oppdaging av gjenstander liggende på spor.

### 6.3.2 Ekstra forebyggende og beskyttende tiltak

Ved toglinjer med høyere mulig risiko for avsporing kan det være hensiktsmessig med ekstra tiltak for å minimere konsekvensene ved en avsporing. Iverksetting av tiltak gjøres på bakgrunn av en spesifikk vurdering av den aktuelle linjen som har en høyere risiko.

Vurderingen bør blant annet inkludere hvor mye vedlikeholdsarbeid og kostnad et tiltak vil kreve, samt arbeidet som kreves for å bytte ut et skadet tiltak. I tillegg bør det også vurderes i hvor stor grad et tiltak vil være effektivt ved en eventuell avsporing (UIC 777-2, s 17).

Tiltak som kan iverksettes kan deles opp i to grupper: Bøye- og absorberende innretninger (UIC 777-2, s 17).

### 6.3.3 Bøyeinnretninger

Hensikten til bøyeinnretninger er å avlede tog bort fra situasjoner som vil gi store konsekvenser. Bøyeinnretninger kan være hevet fundamentsokler, plattformkanter, ledevegger og ledeskinner.

- Ifølge UIC 777-2 er hevet fundamentsokler og plattformkanter tiltak som reduserer kollisjonsrisikoen og er passende for alle hastigheter (UIC 777-2, s 17). I Bane NORs tekniske regelverk, forutsettes det at en universelt utformet plattform har en plattformhøyde på 760 mm målt vinkelrett på sporplanet.
- UIC Code 777-2 oppgir at det vil være aktuelt å installere ledevegger, dersom ledeveggene er i stand til å tåle horisontale krefter og i tillegg har en høy grad for duktilitet. Ledevegger bør installeres så nærme sporet som mulig, så lenge minimums frie rom for sporet er oppfylt. I tillegg bør også ledevegger overholde krav for hevet fundament med et minimum høyde på 760 mm over skinne (UIC 777-2, s 17).
- Ledeskinner er tiltak som beskytter klasse A-konstruksjoner (gruppe 3) mot kollisjon (UIC 777-2, s 17).

### 6.3.4 Absorberende innretninger

Ved kollisjon skal en absorberende innretning være i stand til å absorbere den kinetiske energien progressivt, og i tillegg beskytte bærende konstruksjoner langs toglinjen mot kollisjon (UIC 777-2, s 17). Krasjbarrierer og absorberende innretninger er konstruksjonselementer, som kan være aktuelt å installeres i denne sammenhengen.



- For klasse A-konstruksjoner, er krasjbarrierer passende for gruppe 2 og 3 for beskyttelse av individuelle søyler. «Krasjbarrierer bør dimensjoneres slik at de sørger for maksimum defleksjon. Avstivningen bør designes slik at et bruddpunkt hindrer søylen i å bli revet ut og tillater at den skadede delen kan byttes ut.» (UIC 777-2, s 17)
- I henhold til UIC 777-2, «bør absorberende innretninger avtales med relevant administrasjon» for klasse B-konstruksjoner (UIC 777-2, s 17). I dette tilfelle, er det Bane NOR som tar avgjørelsen om det er hensiktsmessig med absorberende innretninger for klasse B-konstruksjoner

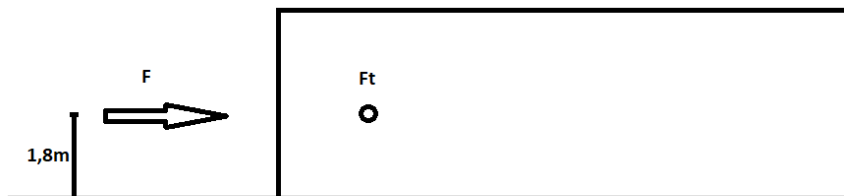
## 7 Dimensjonerende påkjøringslaster for klasse B-konstruksjoner

Forslag til dimensjonerende påkjøringslaster for ulike hastighetsgrupper over 120 km/t, er basert på erfaringer gjort i forbindelse med risikoanalysen i kapittel 6, sammen med resultatene fra simuleringene gjort i Ansys Workbench, og håndkalkulasjoner.

Dimensjonerende påkjøringslaster for klasse B-konstruksjoner kategoriseres i tre hastighetsgrupper:

- Gruppe 1: 120 – 160 km/t
- Gruppe 2: 160 – 200 km/t
- Gruppe 3: 200 – 250 km/t

Bærende konstruksjonselementer vurderes som kontinuerlige vegger. Krefter på konstruksjonen påføres med høyde på 1,8 m over skinne.



Figur 43: Illustrasjon av krefter påført på vegg, tegnet i Paint

### Gruppe 1: 120 – 160 km/t

Kraft parallelt med sporet:

$$F = 16000 \text{ kN}$$

Kraft vinkelrett på sporet:

$$F_T = 3500 \text{ kN}$$

### Gruppe 2: 160 – 200 km/t

Kraft parallelt med sporet:

$$F = 20000 \text{ kN}$$

Kraft vinkelrett på sporet:

$$F_T = 5000 \text{ kN}$$

### **Gruppe 3: 200 – 250 km/t**

Kraft parallelt med sporet:

$$F = 25000 \text{ kN}$$

Kraft vinkelrett på sporet:

$$F_T = 7500 \text{ kN}$$

### **Formkrav**

Ingen standarder har formulert formkrav for klasse B-konstruksjoner for  $V > 120 \text{ km/t}$ .

Mange av de formkravene gitt for klasse B-konstruksjoner med hastighet  $V < 50 \text{ km/t}$  og  $50 - 120 \text{ km/t}$ , vil være de samme for  $V > 120 \text{ km/t}$ .

For  $V > 120 \text{ km/t}$  vurderes bærende konstruksjon elementer for klasse B overbygg som kontinuerlige vegger med følgende dimensjoner:

$$L: W \geq 4:1 \quad W \geq 0,6 \text{ m} \quad L \geq H/2$$

Hvor  $L = \text{Lengde}$

$W = \text{Bredde}$

$H = \text{Høyde}$

### **Avstandskrav**

Minimum avstand mellom bærende konstruksjon til spormidtd skal være 4 m. Avstand på mindre enn 4 m anbefales ikke.

## **7.1 Sikkerhetsfaktor**

Ved fastsettelse av anbefalt dimensjonerende ulykkelast brukes vanligvis en sikkerhetsfaktor 1,3. For bygninger brukes sikkerhetsfaktor 1,5 for dynamiske krefter, og 1,3 for statiske krefter. En ulykke er dynamisk, og en sikkerhetsfaktor på minst 1,5 bør velges, men ettersom en avsporing for en vilkårlig bro er lav, brukes heller en sikkerhetsfaktor på 1,3. Med lavere sikkerhetsfaktor blir færre ressurser brukt til konstruering av broen, som sparer penger, og miljøet.

## **7.2 Kraft parallelt med spor: 120 - 160 km/t**

Anbefalt dimensjonerende påkjøringslast er satt til 16 000 kN. Data fra simulering 1 og 2 viser urimelig høye krefter som er urealistisk å dimensjonere for. Det velges derfor å se bort fra disse dataene.

Simulering 10 og 11 viser krefter som samsvarer med håndutregninger gjort i kapittel 5.3, men av ukjent feil, ble ikke volum- og vektverdiene til togmodell 2, versjon 2 importert fra SpaceClaim. Dette gjelder kun for simulering 10 og 11. Av usikkerhet knyttet til simuleringene, blir grunnlaget for anbefalt påkjøringslast basert på utregningene gjort i kapittel 5.3 støtdynamikk. Fra tabell 6 er en påkjøringslast på 12 170 kN for 160 km/t oppgitt. Med sikkerhetsfaktoren blir påkjøringslasten 16 000 kN.

Påkjøringslast baseres kapittel 5.3, og ikke en kombinasjon av 5.1 og 5.3. Verdiene i 5.1 er utledet med en antagelse på 2,5 m i deformasjon. Sammenlignet med teknisk regelverk for 50 – 120 km/t, er påkjøringslasten i 5.1 en høy verdi. Verdiene ble derfor ikke tatt med i grunnlaget for fastsettelse av påkjøringslast, da verdien er nesten 7x høyere, enn den oppgitt i teknisk regelverk.

## **7.3 Kraft vinkelrett med spor: 120 - 160 km/t**

Anbefalt dimensjonerende påkjøringslast er satt til 3500N. Data fra simulering 3 og 6 viser maks påkjøringslast på 2833 og 2461 kN, som gir en gjennomsnittsverdi på 2647 kN. Med sikkerhetsfaktoren blir påkjøringslasten 3500 kN.

## **7.4 Kraft parallelt med spor: 160 - 200 km/t**

Anbefalt dimensjonerende påkjøringslast er satt til 20 000 kN. På grunn av høye påkjøringslaster i simulering 1 og 2, og ukjent masse i simulering 10 og 11, er det ikke gjort tilsvarende simuleringer for 200 km/t. Påkjøringslast for 200 km/t parallelt med spor, kan dermed ikke baseres på simuleringer. Anbefalt påkjøringslast er derfor basert på påkjøringslast gitt i tabell 6 for 200 km/t. Oppgitt kraft fra tabellen er 15 213 kN. Med sikkerhetsfaktor blir påkjøringslasten 20 000 kN.

### **7.5 Kraft vinkelrett på spor: 160 - 200 km/t**

Anbefalt påkjøringslast er satt til 5000 kN. Anbefalingen er basert på gjennomsnittslasten fra simulering 4 og 7, og studien gjort av Hyun-Ung Bae, Kyung-Min Yun, Jiho Moon, og Nam-Hyoung Lim som fant maks slagbelastning 4064 kN på *containment wall* for 300 km/t (Bae, Yun, Moon, & Lim, 2018).

### **7.6 Kraft parallelt med spor: 200 - 250 km/t**

Anbefalt dimensjonerende påkjøringslast er satt til 25 000 kN. I likhet med 160- og 200 km/t, kraft parallelt med spor, er anbefalingen basert på tabell 6, fra kapittel 5.3. Fra tabell 6 er kraften 19017 kN. Med sikkerhetsfaktoren blir kraften 25 000 kN

### **7.7 Kraft vinkelrett på spor: 200 - 250 km/t**

Anbefalt dimensjonerende påkjøringslast er satt til 7500 kN. Anbefalingen er basert på gjennomsnittslasten fra simulering 5 og 8.

## 8 Dataprogrammer

Følgende dataprogrammer ble benyttet i denne oppgaven:

- Ansys Workbench
- SpaceClaim
- MATLAB

### 8.1 Ansys Workbench

Ansys Workbench er et dataprogram med flere verktøy som kan brukes innfor maskin, aerodynamikk og konstruksjon. I denne oppgaven brukes verktøyet *Explicit dynamics*, som kan simulere den mekaniske atferden til objekter under dynamiske belastninger.

### 8.2 SpaceClaim

SpaceClaim et dataprogram brukt for modellering og 3D CAD-modellering, hvor modellene kan importeres til Ansys Workbench for simulering. SpaceClaim er et frittstående dataprogram, integrert i Ansys Workbench.

### 8.2 MATLAB

MATLAB er et programmeringsprogram med et eget scriptspråk, og kan brukes til en rekke ulike oppgaver, blant annet til numeriske utregninger. MATLAB har også en rekke apps innen maskinlæring og kodegenerering.

## 9 Diskusjon

### 9.1 Simulering

Under arbeidet med Ansys Workbench, oppsto det problemer med simuleringene, hovedsakelig var dette feilmeldinger. Det største problemet derimot, var å finne en løsning på den lave deformasjonen til togmodellene under simuleringene, som ga høye påkjøringslaster. Det ble forsøkt å løse dette problemet med togmodell 2 versjon 2, men til lite suksess. I et nytt forsøk på å oppnå mer deformasjon, ble tykkelse på togets sidevegger og snute gjort tynnere. Dette resulterte i at *Explicit dynamics* oppfattet togets sidevegger og snute som linjer. For å fikse dette, måtte tykkelse istedenfor oppgis i *geometry*, hvor tykkelse vanligvis blir importert fra SpaceClaim. Mer deformasjon ble oppnådd, men det resulterte at simulering 10 og 11 ga irrelevant data, hvor togets volum og masse ikke lengre var kjent.

Opprinnelig plan var å simulere flere ulike togkollisjoner, men på grunn av lang simuleringstid, ble det utført færre simuleringer. Hadde flere simuleringer blitt gjennomført med ulike togmodeller, kunne påkjøringslastene vært basert på flere datapunkter, og dermed ha gitt et bedre grunnlag for dimensjonering av påkjøringslaster.

### 9.2 Feilkilder

I 6.2.3 avsporingfrekvens, ble data hentet fra SHT og SJT. Fra disse dataene, ble det oppdaget motstridene tall på antall avsporinger, hvor det ble funnet ut at SHT ikke har rapportert alle avsporinger. SHT har inkludert alle alvorlige avsporinger, og av den grunn blir tall om antall avsporinger tatt med.

Det ble valgt å bruke UIC 777-2 sine anbefalte avsporingfrekvenser for persontog, for å finne årlig avsporingfrekvens. Det ble gjort på hensyn av sikkerhet, da UIC har oppgitt noe høyere verdier.

### 9.3 UIC Code 777-2 R

Vi deler Terje Andersen bekymring med at «påkjøringslastene spesifisert av UIC, avtar for raskt med økende avstand fra spormidtt uavhengig av nærliggende sporveksler og retning på sporene. Samt at de forsvinner helt hvis bærende konstruksjon settes på en plattform med 550

eller 760 mm byggehøyde over skinneoverkant». Fra tidligere ulykker der tog avsporer, viser det seg at et tog kan bevege seg relativt langt i sideveis retning til sporet, uten at toget mister mye av sin kinetiske energi (Andersen, 525 2014 Endringsartikkel 793, 2014). Fra bildet kan en se at vognene til toget har beveget seg langt fra sporet.



Figur 43: Togavsporing i kurve (Padgett, 2018)

Som nevnt tidligere i kapittel 6.2.5, trengs det en alfaverdi for å regne ut sannsynligheten,  $p_3$ . I 6.2.5 nevnes det at UIC spesifiserer  $\alpha = 1$ , og antar at alle kollisjoner over 60 km/t vil ende med kollaps. I praksis vil ikke alle kollisjoner ende med kollaps. Dette er fordi broer enten er dimensjonert til å tåle en påkjørsel av tog med hastighet 60 km/t og høyere, eller har tiltak som beskytter broen mot påkjørsel. En mer relevant alfaverdi til den nye antagelsen om at alle kollisjoner, faktisk ikke vil ende med kollaps, ga en konservativ alfaverdi på  $\alpha = 0,8$ .

## 9.4 Påkjøringslast

Dimensjonerende påkjøringslaster er basert på utregninger gjort i kapittel 5, og eller to av simuleringene i Ansys Workbench. Et bedre grunnlag for påkjøringslaster bør baseres på flere ulike simuleringer med samme kollisjonshastighet. I tillegg vil det også være en fordel med håndkalkulasjoner for sammenligning med simuleringene.



## 10 Konklusjon og videre arbeid

### 10.1 konklusjon

Basert på arbeidet gjort i denne oppgaven, kan det konkluderes at:

- Det vises fra simuleringene og håndkalkulasjoner at bærende konstruksjoner på toglinjer med høyere hastigheter (opptil 250 km/t), må dimensjoneres for høyere påkjøringslaster.
- Kortere avstand fra spormidt til overbygg, vil resultere i en høyere sannsynlighet for at et tog kolliderer med bro.
- Kortere avstand fra spormidt til overbygg, vil resultere i en høyere sannsynlighet for at bro kollapser av en kollisjon.
- Tog som ferdes på jernbanen i Norge med høyere hastighet har en lav risiko for å avspore.

### 10.2 Videre arbeid

Forslag til videre arbeid for dimensjonering av påkjøringslaster:

- Simulere flere togkollisjoner med mer realistisk togmodell.
- Utlede forslag for utregning av ulykkeslaster fra tog på overbygg.
- Dimensjonere mer effektive tiltak for forhindring av nye togavsporinger.
- Utlede en  $k$  – verdi for tog.
- Undersøke deformingene til et tog under påkjørsel.
- Utføre kvalitativ- og kvantitativ risikoanalyse for klasse A-konstruksjoner,  $V > 120\text{km/t}$ .
- Fastsette dimensjonerende påkjøringslaster for klasse A-konstruksjoner over jernbanen for toghastigheter,  $V > 120\text{ km/t}$ .

## Referanser

(n.d.).

Al-Thairy, H., & Wang, Y. (2014, Juni 4). *An assessment of the current Eurocode 1 design methods for building structure steel columns under vehicle impact*. Hentet fra Sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X13001429>

Andersen, T. (2014, Januar 31). *525 2014 Endringsartikkel 793*. Hentet fra Bane NOR Teknisk regelverk: [https://trv.banenor.no/wiki/525\\_2014\\_Endringsartikkel\\_793](https://trv.banenor.no/wiki/525_2014_Endringsartikkel_793)

Andersen, T. (Trondheim). *Leangerlokket - Dimensjonerende laster for brann og påkjørsel*. Det Norske Veritas: 2013.

Bae, H.-U., Yun, K.-M., Moon, J., & Lim, N.-H. (2018, Januar 14). *Impact Force Evaluation of the Derailment Containment Wall for High-Speed Train through a Collision Simulation*. Hentet fra Hindawi: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2018/2626905/>

Bane NOR. (2021, oktober 25). *Sandkasse/konstruksjoner over jernbanen*. Hentet fra Bane NOR Tekniske regelverk: [https://trv.banenor.no/wiki/Sandkasse/konstruksjoner\\_over\\_jernbanen](https://trv.banenor.no/wiki/Sandkasse/konstruksjoner_over_jernbanen)

Bane NOR. (2022, Februar 14). Hentet fra Bane NOR Teknisk regelverk: <https://trv.banenor.no/wiki/Forside>

Bane NOR. (2023, Mars 5). *Folk vil ha mer jernbane – gjerne høyhastighetstog*. Hentet fra Bane NOR: <https://www.banenor.no/nyheter-og-aktuelt/nyheter/2021/folk-vil-ha-mer-jernbane--gjerne-hoyhastighetstog/>

Bane NOR. (u.d.). *Alle våre prosjekter*. Hentet fra Bane NOR: <https://www.banenor.no/prosjekter/alle-prosjekter/>

Bane NOR. (u.d.). *Bane NOR Teknisk regelverk*. Hentet fra Overbygning/Prosjektering/Plattformer og spor på stasjoner: [https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Plattformer\\_og\\_spor\\_pa\\_stasjoner](https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Plattformer_og_spor_pa_stasjoner)

Bane NOR. (u.d.). *Historien vår*. Hentet fra BANE NOR: <https://www.banenor.no/om-banenor/historien-var/>

Chen, L., Wu, H., & Liu, T. (2020, September 9). *Vehicle collision with bridge piers: A state-of-the-art review*. Hentet fra SAGE journals: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1369433220953510>

*E217series*. (u.d.). Hentet fra <http://jrrollingstock.travel.coocan.jp/Urban/217~en.html>

- International Union of Railways. (2002, September). *UIC Code 777-2 R - Structures built over railway lines - Construction requirements in the track zone*. Hentet fra UIC.
- Jernbane.net. (u.d.). *Type 78 --> Flytoget (CAF Oaris)*. Hentet fra Jernbane.net:  
<https://jernbane.net/bo/subpage.php?s=3&t=16973>
- Jernbanedirektoratet. (2022, August 19). *Jernbanen i Norge i tall*. Hentet fra Jernbanedirektoratet:  
<https://www.jernbanedirektoratet.no/no/jernbanesektoren/jernbanenettet-i-norge/jernbanen-i-norge-i-tall/>
- lokalhistoriewiki.no. (2023, April 1). *Bruer i Oslo kommune*. Hentet fra lokalhistorie.no:  
[https://lokalhistoriewiki.no/index.php?title=Bruer\\_i\\_Oslo\\_kommune&mobileaction=toggle\\_view\\_desktop](https://lokalhistoriewiki.no/index.php?title=Bruer_i_Oslo_kommune&mobileaction=toggle_view_desktop)
- McDonough, F. (2021, Juni 3). Hentet fra Twitter:  
<https://twitter.com/FXMC1957/status/1400366659559473155>
- Norsketog. (2023, Februar 13). *Norsketog*. Hentet fra Type 76:  
<https://www.norsketog.no/tog/type-76>
- Padgett, K. (2018, Oktober 30). *3 important things to know about train derailment response*. Hentet fra FireRescue1: <https://www.firerescue1.com/fire-products/rescue-equipment/articles/3-important-things-to-know-about-train-derailment-response-COyYawfGXXI1UGKe/>
- Schive, C. (u.d.). *Overbygging av jernbanespor*.
- Schive, C. (n.d.). *Overbygging av jernbanespor - Jernbaneverkets krav til konstruksjonen*.
- Standard Norge. (2008). *Eurocode 1: NS-EN 1991:2006+NA:2008 - Laster på konstruksjoner Del 1-7: Allmenne laster ulykkeslaster*. Hentet fra Standard Norge.
- Statens havarikommisjon. (2013, Februar). *Rapport om togavsporing ved Nykirke stasjon, Vestfoldbanen, 15. februar 2012 tog 12926*. Hentet fra Statens havarikommisjon.
- Statens havarikommisjon. (u.d.). *Avgitte rapporter*. Hentet fra Statens havarikommisjon:  
<https://havarikommisjonen.no/Bane/Avgitte-rapporter/Avansert-sok?ic=158&sortby=name&sortorder=desc&page=1&lcid=1044>
- Statens jernbanetilsyn. (n.d.). *Sikkerhetsrapport for jernbane 2021*. Retrieved from Statens jernbanetilsyn: <https://www.sjt.no/jernbane/statistikk-jernbane/sikkerhetsrapporter-jernbane/sikkerhetsrapport-for-jernbane-2021/>
- Texas Transportation Institute. (2010, Mai). Hentet fra  
<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/9-4973-1.pdf>

- Thue, J. V. (2019, Juli 16). *armeringsstål*. Hentet fra Store norske leksikon:  
<https://snl.no/armeringsst%C3%A5l>
- Thue, J. V. (2022, September 21). *armert betong*. Hentet fra Store norske leksikon:  
[https://snl.no/armert\\_betong](https://snl.no/armert_betong)
- UIC. (2002). *Structures buil over railways lines*. UIC.
- V.DO, T., Pham, T. M., & Hao, H. (2018, Februar 1). *Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision*. Hentet fra ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617336775#b0005>
- V.DO, T., Pham, T. M., & Hao, H. (2019, Mars 15). *Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact*. Hentet fra ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618331055#b0025>
- Wikipedia. (2022, Oktober 4). *Crumple zone*. Retrieved from Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Crumple\\_zone](https://en.wikipedia.org/wiki/Crumple_zone)
- Wikipedia. (2022, Desember 12). *Høyhastighetsbane i Norge*. Hentet fra Wikipedia:  
[https://no.wikipedia.org/wiki/H%C3%B8yhastighetsbane\\_i\\_Norge](https://no.wikipedia.org/wiki/H%C3%B8yhastighetsbane_i_Norge)
- Wikipedia. (2023, April 12). *Ansys*. Retrieved from Wikipedia:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
- Wikipedia. (2023, April 1). *Armering*. Hentet fra Wikipedia:  
<https://no.wikipedia.org/wiki/Armering>
- Wikipedia. (2023, April 22). *Eschede train disaster*. Hentet fra Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Eschede\\_train\\_disaster](https://en.wikipedia.org/wiki/Eschede_train_disaster)
- Wikipedia. (2023, April 29). *Liste over togulykker*. Hentet fra Wikipedia:  
[https://no.wikipedia.org/wiki/Liste\\_over\\_togulykker](https://no.wikipedia.org/wiki/Liste_over_togulykker)
- Wikipedia. (2023, Mars 2). *Wikipedia*. Hentet fra Jernbane i Norge:  
[https://no.wikipedia.org/wiki/Jernbane\\_i\\_Norge#cite\\_note-7](https://no.wikipedia.org/wiki/Jernbane_i_Norge#cite_note-7)
- wikiwand. (n.d.). *Crumple zone*. Retrieved from wikiwand:  
[https://www.wikiwand.com/en/Crumple\\_zone#References](https://www.wikiwand.com/en/Crumple_zone#References)
- Zhang, C., Gholipour, G., & Mousavi, A. A. (2020, Juli 14). *State-of-the-Art Review on Responses of RC Structures Subjected to Lateral Impact Load*. Hentet fra ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/342702751\\_State-of-the-Art\\_Review\\_on\\_Responses\\_of\\_RC\\_Structures\\_Subjected\\_to\\_Lateral\\_Impact\\_Loads](https://www.researchgate.net/publication/342702751_State-of-the-Art_Review_on_Responses_of_RC_Structures_Subjected_to_Lateral_Impact_Loads)

# Vedlegg

## 1 Kode for utregninger i 5.1

```
Handutregninger53.mlx x fineresannsynlighetskalkulasjon.m x Deformasjon51.mlx x +
1   m =250000; % Massen i kg
2   v = 69,44; % Farten i m/s
3   s = 2.5; % Avstanden i m
4
5   % Beregning av F
6   F = (0.5 * m * v^2) / s;
7   delt_t=(m*v)/F;
8   f=F/1000
9
10  % Skriver ut resultatet
11  disp(['Kraften F er lik ', num2str(F), ' N.']);
12  disp(['Tidsrommet t er lik ', num2str(delt_t), 's'])
13  |
```

## 2 Kode for utregninger for støtdynamikk

```
Handutregninger53.mlx x fineresannsynlighetskalkulasjon.m x Deformasjon51.mlx x +
1   % Inndata
2   vr = 33.33; % Objektets hastighet ved støtet i m/s
3   k = 3e5; % Ekvivalent elastisk stivhet for objektet i N/m
4   m = 250000; % Massen til den kolliderende gjenstanden i kg
5
6   % Beregne den største resulterende dynamiske interaksjonskraften (F)
7   F = (vr * sqrt(k * m));
8
9   % Beregne varigheten av pulsen (Δt)
10  delta_t = sqrt(m / k)
11  delta_t2 = (m*vr)/F
12  f=F/1000
13  % Vis resultatene
14  fprintf('Den største resulterende dynamiske interaksjonskraften (F) er %.2f KN.\n', F);
15  fprintf('Varigheten av pulsen (Δt) er %.2f s.\n', delta_t);
16
```

### 3 Kode for utregning av sannsynlighet

```
Handutregninger53.mlx x fineresannsynlighetskalkulasjon.m x Deformasjon51.mlx x +
1 | % Definer variabler
2 - a = 10; %Avstand mellom spormidt og støttekonstruksjoner%
3 - V = 250; %fart i km/t%
4
5 % Beregn d, b og c
6 - d = (V^2) / 80;
7 - b = V^0.55;
8 - c = (d / b) * (b - a);
9
10 % Beregn P2_a og P2_b
11 - P2_a = (((b - a) / b)^2) * 0.5 * (c / d);
12 - P2_b = (((b - a) / b)^2) + ((b - (a + 4.2)) / b)^2 * 0.25 * (c / d);
13
14 % Definer alpha, dl og t
15 - alpha = 0.8;
16 - dl = 45;
17 - t = (a * dl) / (d - dl);
18
19 % Beregn P3
20 - P3 = (1 - (2 / 3) * ((t * (2 * b - 2 * a - t)) / (b - a)^2)) * alpha;
21
```