

Sikkerhetsvurdering mot velting for godstog ved kjøring i 120 km/t mellom Oslo-Trondheim.

Assessment of Rollover Safety for Freight Trains Driving 120 km/h between Oslo-Trondheim.

Trondheim Mai 2022

Stine Haalien

Intern veileder:
Albert Lau

Ekstern veileder:
Christopher Schive

Prosjektnr:
2022 -03

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål

For å nå målene i nasjonal transportplan 2022-2033 om et trygt, effektivt og miljøvennlig transportsystem, er det et overordnet politisk mål å overføre mer gods fra vei til bane. For å lykkes med dette må kapasiteten i jernbanenettet utnyttes effektivt. Økte hastigheter vil føre til økt kapasitet, men også økt fare for at godstog kan velte og avspore. Oppgaven går i hovedsak ut på å analysere kurver mellom Oslo og Trondheim for å vurdere sikkerhet mot velting dersom godstog kjører i 120 km/t på strekningen.

Målene til prosjektet er å:

- Vurdere sikkerhet mot velting ved kjøring av godstog i 120 km/t.
- Vurdere maksimale opptredende tyngdepunkt for aktuelle toglaste og se dette mot eksisterende sporgeometri.
- Vurdere risiko ved at hastighetsskilt overses.

Stikkord fra prosjektet:

Jernbane, godstog, hastighet, tyngdepunkt, sporgeometri.

Forord

Denne bacheloroppgaven markerer avslutningen på den treårige ingeniørutdanningen innen bygg ved NTNU i Trondheim. Oppgaven er skrevet våren 2022 og utgjør 20 studiepoeng. Oppgaven er hentet fra Bane NOR, og valgt på bakgrunn av min interesse for jernbane og de fordelene effektiv godstransport på jernbane fører med seg.

Målet med oppgaven er å vurdere sikkerhet mot velting for godstog som kjører i 120 km/t mellom Oslo og Trondheim. Analyseområdet bestod av alle horisontalkurvene fra Eidsvoll til Trondheim. Det ble gjennomført en kvantitativ analysemetode ved hjelp av data fra Bane NOR og Microsoft Excel.

Jeg ønsker å takke mine veiledere, Albert Lau og Christopher Schive, for god hjelp, støtte og innspill med arbeidet. I tillegg vil jeg takke familie, samboer og medstudenter for tilbakemeldinger og støtte gjennom våren 2022.



Oslo, 20.05.2022

Sammendrag

I nasjonal transportplan 2022-2033 er det et overordnet mål at transportsystemet skal være trygt, effektivt og miljøvennlig. I takt med at befolkningstallene stiger og økonomien blir sterkere, øker også transportbehovet for gods. I dag fraktes 48 % av godsvolumet med lastebil, 47 % med skip og kun 5 % med jernbane (malmtransport på Ofotbanen er ikke inkludert i disse beregningene) (Jernbanedirektoratet, 2020a). Bærekraftige transportløsninger etterspørres i større grad enn tidligere og det er et politisk mål å overføre mer gods fra vei til bane. Innen 2050 har EU ambisjoner om å overføre 50% av gods (langdistanse) som fraktes på veg over på bane (Jernbanedirektoratet, 2020a). Dette kan bidra til færre ulykker og mindre klimautslipp, i tillegg til at samfunnsøkonomiske kostnader reduseres (Meld.St.20, 2020-2021, Mjøsund, 2019).

Dovrebanen (korridoren mellom Oslo og Trondheim) er en av de viktigste godsrelasjonene i Norge. På Dovrebanen er transport med jernbane i sterk konkurranse med lastebilen. For å tilrettelegge for en godsoverføring fra veg til bane kreves det blant annet at kapasiteten på jernbanenettet utnyttes mer effektivt (Miljødirektoratet, 2020). Økte hastigheter vil føre til økt kapasitet, men også økt risiko for at tog kan velte og avspore. Hensikten med denne oppgaven er å vurdere sikkerhet mot velting for godstog ved kjøring i 120 km/t i korridoren mellom Oslo og Trondheim.

I oppgaven er det brukt data levert fra Bane NOR for å analysere kurver med tilhørende overhøyder og overgangskurver. For alle kurvene er det undersøkt velte hastigheter ved ulike tyngdepunkt, maksimalt tyngdepunkt ved forskyvning opp til 5 cm, samt rykk og rampestigningshastighet for å bestemme nødvendig lengde for overgangskurver. Det er også undersøkt skiltet hastighet på stedet og antall barrierer som reduserer sannsynligheten for at ulykkessituasjoner inntreffer.

Resultatene avdekket at parameterne kurveradius, overgangskurvens lengde og togets tyngdepunkt har mest innvirkning på velte hastigheten. Dovrebanen har 174 kurver med liten radius (≤ 300 m) og flere korte overgangskurver. Disse kurvene og overgangskurvene setter begrensninger for at godstog med tyngdepunkt på 1,75 og 2 meter kan kjøre i 120 km/t på strekningen. Kurver med radius ≤ 262 m tillot ikke kjøring i 120 km/t for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter. For godstog med høyde på 2 meter var kurver med radius ≤ 301 meter den minste kurveradien som tillot kjøring i 120 km/t. Overhøyden viser mindre tendens til å påvirke velte hastigheten.

Abstract

In the national transport plan 2022-2033, key objectives are transport system should be safe, efficient and environmental-friendly. As the population rises and the economy grows, the need for transport for goods also increases. Today in Norway, 48 % of the freight volume is transported by truck, 47 % by ship and only 5 % by rail (ore transport on the Ofot line is not included in these calculations)(Jernbanedirektoratet, 2020a). The demand for sustainable transport solutions is significant and likely to rise, and it is a political goal to transfer more goods from road to rail. By 2050, the EU has ambitions to transfer 50% of goods (long distance) that are transported by road to rail (Jernbanedirektoratet, 2020a). This can contribute to fewer accidents and less climate emissions, in addition to reducing socio-economic costs (Meld.St.20, 2020-2021, Mjøsund, 2019).

Dovrebanen (corridor between Oslo and Trondheim) is one of the most important corridors in Norway. On Dovrebanen, transport by rail is in strong competition with the truck. In order to facilitate a freight transfer from road to rail, it is required, among other things, that capacity on the rail network is utilized more efficiently (Miljødirektoratet, 2020). One way to increase the capacity is to increase freight train driving speed. However, speed increase means also a greater risk that trains may overturn and derail. The objective of this bachelor thesis is to assess rollover safety for freight trains when driving in 120 km/h in the corridor between Oslo and Trondheim.

The assessment is done by using data provided by Bane NOR, e.g., track geometry characteristics, track geometry parameters, etc. Analysis has been performed on all the curves within Dovrebanen. Maximum rollover velocity at different centers of gravity and maximum center of gravity at displacement up to 5 cm have been investigated. In addition, rate of change of cant and rate of change of lateral acceleration have been analyzed to examine of the required length of the transition curve is enough when the freight train is travelling at 120 km/h. The sign speed at the site and the number of barriers that reduce the likelihood of accidents occurring have also been investigated.

The results revealed that the parameters curve radius and the center of gravity of the train have the most impact on rollover speed. The length of the transition curve also sets limits on speed. The Dovre line has 174 curves with a radius ≤ 300 m which sets limits for speeds up to 120 km/h. Curves with a radius of ≤ 262 m did not allow driving at 120 km/h for freight trains with a centre of gravity of 1,75 meters. For freight trains with a center of gravity of 2 meters, curves with a

radius of ≤ 301 meters were the smallest curve radius that allowed driving at 120 km/h. The cant showed little tendency to affect rollover-speed.

Innholdsfortegnelse

1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling.....	1
2 Teori	2
2.1. Største tillatte hastighet på grunn av sporets geometri.....	2
2.1.1 Horisontalgeometri	2
2.1.2 Overhøyde.....	3
2.1.3 Kurveradius	4
2.1.4 Overgangskurve.....	4
2.1.5 Vertikalkurvatur	5
2.1.6 Største tillatte hastighet på grunn av overbygningsklassen	6
2.1.7 Dimensjonerende parametere for eksisterende baner – konvensjonelt materiell.....	7
2.2 Veltefare.....	8
2.2.1 Indre skinne.....	8
2.2.2 Ytre skinne	8
2.2.3 Formel for å finne et togs veltefastighet i en kurve	10
2.3 Barrierer på jernbanen.....	11
2.3.1 Hastighetsovervåkning	11
2.3.2 Skilt	12
2.4 Godstog.....	12
2.4.1 Krav til bremses	13
2.4.2 Boggier i godsvogner	14
2.4.3 Tyngdepunkt for godsvogner	14
2.4.4 Transportformer for gods	14
3 Metode	16
3.1 Analyseområdet: Dovrebanen.....	16
3.1.1 Stigninger og fall på Dovrebanen	16
3.1.2 Overbygningsklasse, aksellast og maksimal hastighet på Dovrebanen	16
3.2 Data	17
3.2.1 Horisontal sporgeometri.....	17
3.2.2 Hastighetsprofil	18
3.3 Databehandling.....	18
3.3.1 Veltefastigheter	18
3.3.2 Rampestigningshastighet og rykk.....	19
3.3.3 Tyngdepunkt ved forskyvning	20
3.3.4 Skiltet hastighet.....	20
4 Resultater	21
4.1 Kurver hvor maksimal hastighet er ≤ 120 km/t, når $H = 1,75$ meter.....	21
4.2 Kurver hvor maksimal hastighet er ≤ 120 km/t, når $H = 2$ meter.....	22
4.3 Overgangskurver som ikke tillater 120 km/t.....	26
4.4 Minste tyngdepunkt ved forskyvning.....	26
4.5 Skiltet hastighet og antall barrierer mot at velteulykker skal inntreffe.....	27
5 Diskusjon	29
5.1 Risiko ved at skilt oversees.....	31
5.2 Andre begrensninger	32
6 Konklusjon	33
Kilder	34

Vedlegg 1 37

Figurliste

Figur 1: Vognkassens tyngdepunkt forskyves utover i kurve med stor hastighet. Hentet fra Jernbanekompetanse (2021).	9
Figur 2: Hastighetsovervåkning (BaneNOR, 2020b).....	11
Figur 3: Hastighetsovervåkning (BaneNOR, 2020b).....	12
Figur 4: Godstransport på jernbane – ledd i intermodal transport eller selvstendig transportkjede (OsloEconomics, 2018).	15
Figur 5: Sammenstilling av ulike profiler (BaneNOR, 2018b).	19

Tabelliste

Tabell 1: Minste lengde for avsnitt med konstant krumning (BaneNOR, 2021b).....	2
Tabell 2: Minste vertikalkurveradier gjengitt fra Teknisk regelverk (BaneNOR, 2021b).....	5
Tabell 3: Største bestemmende og absolutte stigning/fall (BaneNOR, 2021b).....	6
Tabell 4: Tillatt hastighet og maksimal aksellast for overbygningsklasser gjengitt fra Teknisk regelverk (BaneNOR, 2021c).	6
Tabell 5: Dimensjonerende parametere for eksisterende baner – konvensjonelt materiell (Jernbanekompetanse, 2020b).	7
Tabell 6: Sammenheng mellom lengde av godstog og bremsegruppe (Nielsen, 2017).....	13
Tabell 7: De viktigste parameterne for boggier av typen Y25 (Railteco, 2018)	14
Tabell 8: Oversikt over måledata levert av Bane NOR.....	17
Tabell 9: Kurver hvor maksimal hastighet er ≤ 120 km/t, når $H=1,75$ meter.....	21
Tabell 10: Kurver hvor maksimal hastighet er < 120 km/t, når $H= 2$ meter.....	22
Tabell 11: Overgangskurver uten tilstrekkelig lengde for å kjøre i 120 km/t.	26
Tabell 12: Laveste maksimale tyngdepunkt, ved forskyvning $e= 50$ mm.	26
Tabell 13: Skiltet hastighet og barrierer mot at ulykker skal inntreffe for godstog med tyngdepunkt på 2 meter.	27
Tabell 14: Skiltet hastighet og barrierer mot at ulykker skal inntreffe for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter.	28
Tabell 15: Oversikt over minste tyngdepunkt som tillater hastighet større eller lik 130 km/t i kristiske kurver.	29
Tabell 16: Illustrasjon av overhøydens betydning for maksimal veltehastighet.	30

Formelliste

Formel 1: Formel for beregning av veltehastighet i kurver.....	18
Formel 2: Minste lengde på overgangskurve mtp. rampestigningshastighet.	19
Formel 3: Minste lengde på overgangskurve mtp. rykk.....	19
Formel 4: Formel for beregning av tyngdepunkt ved forskyvning.....	20

Notasjoner

<u>Symbol</u>	<u>Enhet</u>	<u>Forklaring</u>
R	m	Kurveradius
g	9,81 m/s ²	Tyngdens akselerasjon
h	mm	Overhøyde
s	mm	Sporvidde
L	m	Overgangskurven lengde
v	m/s	Hastighet
V	km/t	Hastighet
j_u	mm/s ²	Ukompensert sideakselerasjon
I	mm	Manglende overhøyde
E	mm	Overskuddshøyde
H	mm	Høyden til tyngdepunktet til vognen
ψ_{maks}	m/s ³	Rykk – endring av ukompensert sideakselerasjon per tidsenhet

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I Jernbanedirektoratets perspektivanalyse fra 2020 kan man lese at «bærekraftige løsninger vil være en forutsetning for hele transportsektoren i 2050» (Jernbanedirektoratet, 2020a). Videre er det overordnede målet i Nasjonal transportplan 2022-2033 at transportsystemet i 2050 skal være effektivt, trygt og miljøvennlig (Meld.St.20, 2020-2021).

Befolkningsvekst, sterkere økonomi og en høyere kjøpekraft i befolkningen medfører at etterspørselen etter forbruksvarer stiger, som igjen fører til et økende transportbehov av gods (Jernbanedirektoratet, 2020b). Fra 1990 og frem til i dag har godstransporten økt med 2,5 % i året, og i fremtiden antas det at årlig vekst vil reduseres til litt over én prosent frem mot 2050 (Jernbanedirektoratet, 2020a). De vanligste transportmetodene for gods i dag er med skip, lastebil eller jernbane, hvor lastebil og jernbane er de største konkurrentene (Handstanger, 2015). Godstransport på jernbane har en rekke fordeler sammenlignet med godstransport på vei. Det er færre ulykker, klimautslipp og støy, samtidig som godstrafikk på jernbane er mer energieffektivt (Meld.St.20, 2020-2021, Liu, 2017). Likevel viser undersøkelser at 48 % av godsvolumet i dag fraktes av lastebil, 47 % med skip og kun 5 % med jernbane (malmtransport på Ofotbanen er ikke inkludert i disse beregningene) (Jernbanedirektoratet, 2020a).

For at godstransport på jernbanen i større grad skal benyttes, må jernbanen i tillegg til å være miljøvennlig, ha tilstrekkelig kapasitet og effektivitet i fremføringen, være punktlig og pålitelig (Zhang, 2018), samtidig som de er konkurransedyktige på pris (Jernbanedirektoratet, 2020a, Jernbaneverket, 2016, Scheel, 2021). For at dette skal lykkes må det legges til rette for lengre og flere godstog med redusert reisetid og økt punktlighet (Jernbaneverket, 2016, Scheel, 2021).

På ruten mellom Oslo og Trondheim bruker lastebiler i dag drøyt seks timer, mens det med tog tar ni timer (Scheel, 2021). Høyere hastigheter vil føre til økt kapasitet, men også økt fare for at godstog kan avspore og velte.

1.2 Problemstilling

Det er flere parametere som kan påvirke risikoen for at godstog velter. For å undersøke noen av disse nærmere er det utarbeidet to forskningsspørsmål for oppgaven:

1. I hvor mange kurver mellom Oslo og Trondheim er det risiko for at godstog kan velte ved kjøring i 120 km/t?

2. I hvilken grad påvirker tyngdepunktet til godstog risikoen for velting?

2 Teori

2.1. Største tillatte hastighet på grunn av sporets geometri

2.1.1 Horisontalgeometri

Geometrisk sett er det ingen hastighetsbegrensninger på rettlinje. Under forutsetning om at sporet er riktig justert og nøytralisert, vil materiellets maksimale hastighet, eller andre deler av infrastrukturen som kontaktledningsnett og overbygningsklasse være dimensjonerende (Jernbanekompetanse, 2021a). Det er også noen begrensninger i regelverket for minste lengde for avsnitt med konstant krumning. Rette avsnitt på linjen skal ha lengde i henhold til tabell 1 (BaneNOR, 2021b).

Tabell 1: Minste lengde for avsnitt med konstant krumning (BaneNOR, 2021b).

Normale krav (m)	Minste krav (m)
0,5 V	0,25 V

Maksimal hastighet i sirkelkurver er mer komplisert. Gjennom sirkelkurver virker det en sideakselerasjon som er gitt av hastigheten og radien i sirkelkurven. Denne sideakselerasjonen legger begrensninger for maksimal hastighet. I sirkelkurver er det derfor vanlig at ytterstrengen bygges opp med en overhøyde (h) som er med på å motvirke sideakselerasjonen (Jernbanekompetanse, 2021a, Jernbaneverket, 2012). Likevel fremføres normalt tog med en hastighet som er så høy at det fortsatt virker en sideakselerasjon, en såkalt ukompensert sideakselerasjon (J_u):

$$J_u = \frac{v^2}{R} - g \frac{h}{s}$$

Det er den som er den dimensjonerende parameteren for hastighet i horisontalkurver. En annen definisjon på ukompensert sideakselerasjon er manglende overhøyde (I) (Jernbaneverket, 2012).

På Jernbanekompetanse sine sider finner man at den maksimale hastigheten i en sirkelkurve er gitt av sporgeometrien ved:

$$v \leq \sqrt{R \left(g * \frac{h}{s} + j u_{maks} \right)} = \sqrt{R \frac{g}{s} (h + I_{maks})}$$

Innsatt de faste verdiene, og uttrykt ved km/h får vi:

$$V = 0,291 * \sqrt{R(h + I_{maks})}$$

2.1.2 Overhøyde

I henhold til Teknisk regelverk er den maksimale overhøyden i Norge satt til $h_{maks} = 150 \text{ mm}$. For rene persontrafikkbaner gjelder $h_{maks} = 160 \text{ mm}$ (normale krav) og $h_{maks} = 180 \text{ mm}$ (minste krav). Høyere verdi tillater større hastighet for de raskeste togene, men er uheldig for saktegående tog (Jernbanekompetanse, 2021b). Ved lave hastigheter vil for stor overhøyde medføre ubehag for passasjerer, og for godstog vil det være fare for avsporing og forflytning av lasten i vognene (Lindahl, 2001). I henholdt til Teknisk regelverk (TRV) er maksimal grense for overhøyde pga. avsporingfare ved lave hastigheter satt til:

$$h_{avsp} = \frac{R - 50}{1,5} \text{ mm}$$

Den overhøyden som gir likevektshastighet, $j_u = 0$, kalles teoretisk overhøyde og finnes ved formelen (Jernbanekompetanse, 2021b):

$$h_{teor} = \frac{s * v^2}{g * R}$$

Manglende overhøyde og overskuddshøyde

Et annen betegnelse som kan brukes om ukompensert sideakselerasjon er manglende overhøyde og overskuddshøyde. Om overhøyden ikke er stor nok for den aktuelle hastigheten har vi manglende overhøyde, I. Manglende overhøyde defineres som $I = h_{teor} - h$, og kan uttrykkes ved formelen (Jernbanekompetanse, 2021b):

$$I = \frac{s * v^2}{g * R} - h$$

Dersom hastigheten er mindre enn likeveksthastigheten, har vi det som kalles overskuddshøyde, E (Jernbanekompetanse, 2021a).

2.1.3 Kurveradius

Når man bygger jernbane er det ønskelig å bruke så store radier som mulig. Ettersom det krever mye areal og Norge er et land med mye fjell og utfordrende terreng er det ofte vanskelig å løse i praksis. Kurveradien setter begrensninger for hvor fort togene kan kjøre, og store kurveradier tillater større hastigheter enn små kurveradier (Jernbanekompetanse, 2021a). Teknisk regelverk setter krav til minste kurveradius: $R_{min} = 190 \text{ m}$ (BaneNOR, 2021b).

2.1.4 Overgangskurve

Overgangskurver brukes mellom rettlinjer og sirkelkurver, eller mellom to tilstøtende kurver med ulik radius (Lindahl, 2001, Jernbanekompetanse, 2021b). Hensikten er å få en gradvis endring i sideakselerasjonen. Dette gjøres av hensyn til passasjerkomfort, og med tanke på sikkerhet og slitasje på spor og materiell (Lindahl, 2001, Jernbanekompetanse, 2021b). Det er vanlig at overgangskurven sammenfaller med en overhøyderampe. Denne brukes til å bygge opp overhøyden før sirkelkurven (Jernbanekompetanse, 2021b).

I overgangskurven virker både statiske og dynamiske parametere. Overhøyden h og rampestigningen $\Delta h / L_{maks}$, satt til 2.5 ‰, er fastlagte størrelser. Mens rampestigningshastigheten dh/dt (beskriver hvordan overhøyden endrer seg med tid) og rykket dI/dt (endring av ukompensert sideakselerasjon per tidsenhet) vil variere med hvilken hastighet materiellet har gjennom kurven. Overgangskurvens lengde L , vil på grunn av parameterne som tidligere er nevnt avgjøre hvor høy hastighet vi kan holde gjennom kurven (Jernbanekompetanse, 2020).

Lengde utfra rampestigningen alene er gitt ved:

$$L \geq \frac{h}{2,5}$$

Maksimal rampestigningshastighet av hensyn til komfort og sikkerhet mot avsporing:

$$V_{maks} = \frac{\frac{dh}{dt} \text{ maks } (3,6 * L)}{h_2 - h_1}$$

Maksimal hastighet for rykk av hensyn til komfort:

$$V_{maks} = \frac{\frac{dI}{dt} \text{ maks } (3,6 * L)}{I_2 - I_1}$$

Dersom man betrakter en kurvekombinasjon med bare én sirkelkurve, faller h_1 og I_1 bort. Differansen gjelder for kurvekombinasjoner (Jernbanekompetanse, 2020).

2.1.5 Vertikalkurvatur

I vertikaltraséen har vi stigninger/ fall og stigningskurver (Jernbanekompetanse, 2021b). Stigning og fall oppgis i promille, og i likhet med horisontalkurvaturen så stilles det også krav til vertikalkurvaturen.

Det finnes krav om minste radius ut ifra hastighet, og i tabellen på teknisk regelverk sine sider finnes det normale- og minstekrav.

Tabell 2: Minste vertikalkurveradier gjengitt fra Teknisk regelverk (BaneNOR, 2021b).

Krav til vertikalkurvatur for nye baner		Krav til vertikalkurvatur for eksisterende baner	
Normale krav	Minste krav	$V \leq 130$ km/t	$V > 130$ km/t
$R_v = V^{2/2,6}$ (m)	$R_v = V^{2/3,9}$ (m)	$R_v = 20 V + 500$ (m)	$R_v = 100 V - 10000$ (m)
Minste $R_v = 4000$ m	Minste $R_v = 2500$ m		

Dessuten stilles det krav til bestemmende stigning og fall, samt største absolutte stigning og fall (BaneNOR, 2021b). Bestemmende stigning/fall har betydning for fremføring av tog (BaneNOR, 2021b). Store stigninger vil føre til økte energikostnader og bremselengder (aktuelt ved fall). Dette er særlig uheldig for tunge godstog (Lindahl, 2001).

Tabell 3: Største bestemmende og absolutte stigning/fall (BaneNOR, 2021b).

	Største bestemmende stigning/fall (‰)		Største absolutte stigning/fall (‰)	
	Baner med blandet trafikk	Persontrafikkbaner	Baner med blandet trafikk	Persontrafikkbaner
Normale krav	12,5	20	20	25
Minste krav	20 ¹⁾	25	30 ²⁾	35

1) Tillates i en lengde opp til 3 km etter en inngående vurdering av stigningsforholdene på vedkommende banestrekning.

2) For å hindre at godstog blir stående i maksimal stigning tillates ikke stigning over 20 ‰ i sammenhengende lengde på mer enn 300 meter.

2.1.6 Største tillatte hastighet på grunn av overbygningsklassen

I henhold til TRV er overbygningsklassen en av flere faktorer som er bestemmende for hvilken trafikk som kan tillates på sporet. Tabellen under viser tillatt hastighet og maksimal aksellast for de ulike overbygningsklassene (BaneNOR, 2021c).

Tabell 4: Tillatt hastighet og maksimal aksellast for overbygningsklasser gjengitt fra Teknisk regelverk (BaneNOR, 2021c).

Overbygningsklasse	Vogner i persontog		Motorvognsett		Godstog/arbeidsmaskiner		
	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/t)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/t)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/t)	Maks hastighet boggier godkjent iht EN 14363 (km/t)
a	16	90	16	90	22,5	30	30
					16,5	70	70
b	18	100	18	100	22,5	30	30
					20,5	70	70
					18	80	80

c	18	160	20,5	130	22,5	80	90
			18	160	20,5	90	100
					18	100	110
c+	18	160	20,5	160	24 ¹	50	50
					22,5	90	100
					20,5	100	110
					18	110	120
d	18	230	20,5	160	25	70	70
			20	200	22,5	100	120
			18	250	18	110	120
			17	300			
Ofofbanen	18	130	20,5	130	31	50	50
					22,5	70 ²	70 ²
Ofofbanen 35t	18	130	20,5	130	35	50	50
					22,5	70 ²	70 ²

1. Gjelder bare Nordlandsbanen mellom Guldsmedvik (km 499,517) og Ørtfjell (km 543,630)
2. Maksimal hastighet for tomme malmvogner er 60 km/h

2.1.7 Dimensjonerende parametere for eksisterende baner – konvensjonelt materiell

Under følger en oversikt over de dimensjonerende parametere for eksisterende baner. Disse er gjengitt fra Teknisk regelverk.

Tabell 5: Dimensjonerende parametere for eksisterende baner – konvensjonelt materiell (Jernbanekompetanse, 2020b).

Symbol	Definisjon	1A	1B	2
h_{maks}	Maksimal overhøyde	150 mm	130 mm	150 mm
h_{avsp}	Grenseverdi for overhøyde pga. avsporing ved lave hastigheter	$\frac{R-50}{1,5}$ mm		
(Δh/L) maks	Grenseverdi for rampestigning	1:400		
I_{maks}	Grenseverdi for manglende overhøyde	100 mm for R < 290	130 mm for 290 ≤ R ≤ 600	100 mm for R ≤ 350

		150 mm for $R > 600$	130 mm for $R > 350$
(dI/dt) maks	Grenseverdi for variasjon av den manglende overhøyde	80 mm/s	
(dh/dt) maks	Grenseverdi for rampestigningshastighet	55 mm/s (tilsv. 1:5 V)	
E_{maks}	Grenseverdi for overskuddshøyde	90 mm for $R \leq 600$	110 mm for $R > 600$
V_g	Hastighet for de langsomtgående tog	80 km/t	

2.2 Veltefare

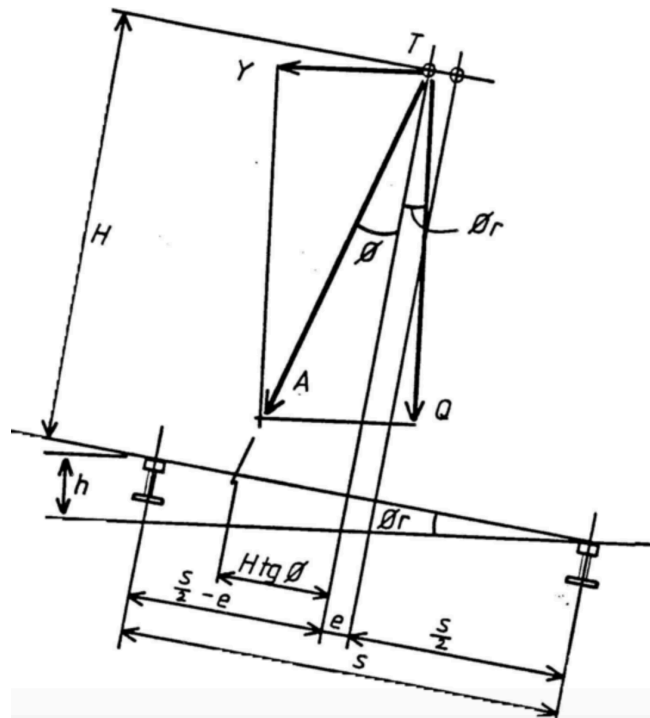
2.2.1 Indre skinne

Tog kan velte om indre skinne dersom det kjører med lav hastighet gjennom en kurve med liten radius, og vindkraften samtidig er stor (Peng, 2011). I tillegg må det være stor overhøyde i sporet og et høyt tyngdepunkt på vognen (Jernbanekompetanse, 2021c).

2.2.2 Ytre skinne

Dersom hastigheten inn i en kurve er alt for stor vil vognens samlede tyngdepunkt forskyves utover i en avstand e fra sporets senterlinje (vist i figur 1) og toget velter om ytre skinne (Peng, 2011, Jernbanekompetanse, 2021c). For lastede godsvogner kan tyngdepunktet variere fra 1,0 – 3,0 m (bunntømmingsvogner) og veltefarens størrelse jo høyere tyngdepunktet ligger.

Tyngdepunktets forskyvning e kan bli ca. 5 cm for godsvogner (Jernbanekompetanse, 2021c).



Figur 1: Vognkassens tyngdepunkt forskyves utover i kurve med stor hastighet. Hentet fra Jernbanekompetanse (2021).

I figur 1. er det angitt dimensjonerende parametere. Under forutsetning om at man kan se bort ifra vindkraft, er det er veltende og et stabiliserende moment.

$$\text{Veltende moment} = A * \sin\varphi * H$$

$$\text{Stabiliserende moment} = A * \cos\varphi * \left(\frac{S}{2} - e\right)$$

Det kan defineres en sikkerhetsgrad n mot velting som forholdet mellom stabiliserende moment mot veltende moment:

$$n = \frac{\left(\frac{S}{2} - e\right)}{H * \tan\varphi}$$

Her er:

$$\varphi = \text{Arctan} \left(\frac{Y}{Q} \right) - \varphi_R$$

$$\varphi = \text{Arctan} \left(\frac{V^2}{g * R} \right) \varphi_R$$

Vanligvis kreves en sikkerhetsgrad lik 4,5 (Jernbanekompetanse, 2021c).

2.2.3 Formel for å finne et togs velte hastighet i en kurve

Fra teorien i kapittel 2.2 kan man ved noen omregninger finne en formel for et togs velte hastighet i en kurve.

Veltende moment kan skrives som:

$$\left(m * \frac{v^2}{R} * \cos\alpha - mg * \sin\alpha\right) * H$$

og stabiliserende moment som:

$$m * g * \cos\alpha * \frac{s}{2}$$

Hvor:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h}{s}\right).$$

En kan videre sette veltende moment lik stabiliserende moment:

$$\left(m * \frac{v^2}{R} * \cos\alpha - mg * \sin\alpha\right) * H = m * g * \cos\alpha * \frac{s}{2},$$

Stryke m, og gange opp med H:

$$\frac{v^2}{R} * \cos\alpha - g * \sin\alpha = \frac{g * s}{2 * H} * \cos\alpha$$

Flytte over andre ledd på venstre side og løse for v^2 :

$$v^2 = \left(\frac{gs}{2H} * \cos\alpha + g * \sin\alpha\right) * \frac{R}{\cos\alpha} = \left(\frac{s}{2H} + \tan\alpha\right) * gR,$$

Og så finne hastigheten v , ved å ta kvadratroten:

$$v = \sqrt{\left(\frac{s}{2H} + \tan\alpha\right) * gR}.$$

2.3 Barrierer på jernbanen

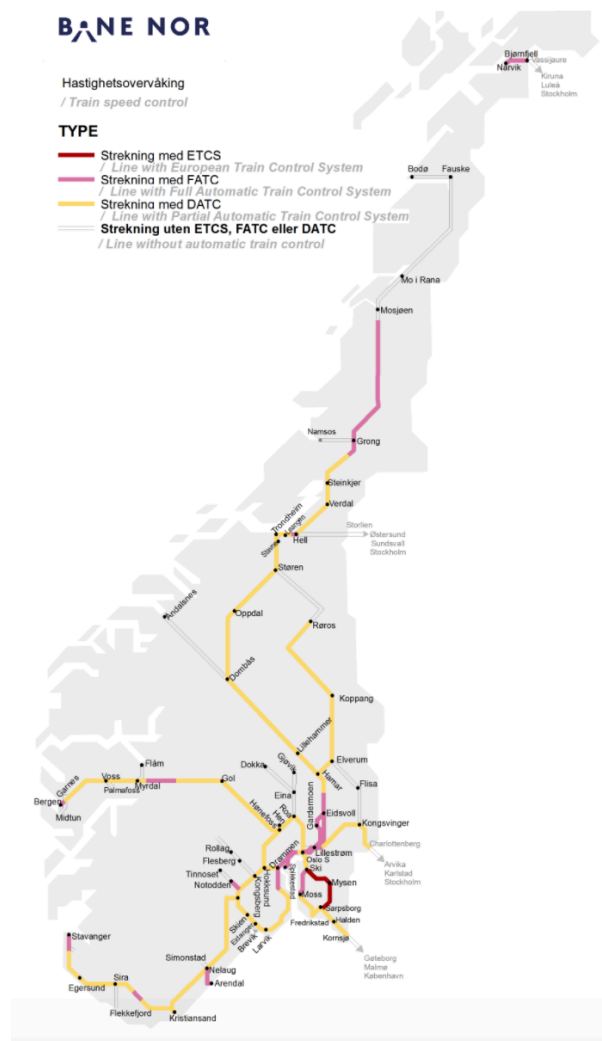
Jernbanesektoren forholder seg til sikkerhetsstyringsforskriften. Formålet med forskriften er å hindre at jernbaneulykker og alvorlige jernbanehendelser skal skje. (Sikkerhetsstyringsforskriften, 2014) sier at:

«Virksomheten skal planlegges, organiseres og utføres med henblikk på at en enkeltfeil ikke skal føre til en jernbaneulykke» videre står det «Jernbanevirksomheten skal ha barrierer som reduserer sannsynligheten for at feil, fare- eller ulykkessituasjoner utvikler seg. Barrierer skal begrense mulige skader og ulemper» (Sikkerhetsstyringsforskriften, 2014).

I sikkerhetsstyringsforskriften defineres barrierer som «Tekniske, operasjonelle, organisatoriske eller andre planlagte iverksatte tiltak som har til hensikt å bryte en identifisert uønsket hendelseskjede» (Sikkerhetsstyringsforskriften, 2014). Barrier kan videre klassifiseres som passive eller aktive. Fysiske barrierer er eksempel på en passiv barriere, mens funksjonsbarrierer, varslende barrierer og lovgivende og kontrollerende barrierer er eksempler på aktive barrierer. De aktive barrierene vil alltid fungere i et samspill med føreren (Alteren, 2005).

2.3.1 Hastighetsovervåkning

Automatisk togkontroll er et eksempel på en funksjonsbarriere som er aktiv, uten at den krever inngripen av fører (Andersen, 2020). Automatisk togkontroll (ATC) er et teknisk system for sikker fremføring av tog (Wisting, 2021). Det skilles mellom DATC (delvis hastighetsovervåkning), FATC (fullstendig hastighetsovervåkning) og strekninger uten hastighetsovervåkning (BaneNOR, 2020a). Dovrebanen er i likhet med den største delen av det norske jernbanenettet utstyrt med DATC. Det vil si at systemet overvåker at tog ikke passerer stoppsignaler (rødt lys) (BaneNOR, 2020a, BaneNOR, 2020b). Ved passering av rødt lys aktiveres togets nødbrems (Wisting, 2021). FATC overvåker i tillegg at maksimalhastigheten for strekningen ikke overskrides (BaneNOR, 2020a).



Figur 3: Hastighetsovervåking (BaneNOR, 2020b).

2.3.2. Skilt

Fartsgrenseskilt langs jernbanetraseen er eksempel på en varslende barriere. En varslende barriere krever at føreren gjør en fortolkning slik at barrieren fungerer etter hensikten (Alteren, 2005). Uten en tolkning, eller dersom en skiltet hastighetsnedsettelse overses vil ikke barrieren ha noen funksjon. Det kan bl. annet kunne føre til at tog velter. Det er derfor innført trinnvis reduksjon ved store hastighetsreduksjoner på jernbanen, for å senke risikoen for at et tog kjører inn i en kurve med for stor hastighet (BaneNOR, 2016).

2.4 Godstog

Den europeiske standarden for lengden på godstog er 740 meter. Dagens maksimal lengde på alminnelige, rutegående godstog på Dovrebanen er 480 meter (Bårdstu, 2015), men i godsstrategien 2022-2033 anbefales det at standardtoglengden økes til minimum 600 m (Jernbanedirektoratet, 2019).

De lokomotivene som i hovedsak brukes på Dovrebanen i dag er single EI 14, og disse begrenser togvektene (last inkludert vogner) til mellom 700 og 900 tonn avhengig av banens stigninger (Jernbaneverket, u.å). For et lokomotiv ligger tyngdepunktet omtrent 2 meter over sporplanet (Jernbanekompetanse, 2021c).

2.4.1 Krav til bremseser

I Trykk 705, utgitt av Norges Statsbaner (1993) finner en at togbremser deles inn i ulike bremsegrupper på bakgrunn av deres reaksjonstid og avbremsings-karakteristikk i forhold til hastigheten:

- Meget hurtigvirkende, bremsegruppe R.
- Hurtigvirkende, bremsegruppe P.
- Langsomtvirkende, bremsegruppe G

For godstog benyttes bremsegruppe G og bremsegruppe P. Det er spesifisert i reglene fra Jernbaneverket at lokomotiv i godstog alltid skal framføres i bremsegruppe G, uavhengig av togets lengde og vekt (NOU2001:09, 2001a)

Tabell 6 viser at det en sammenheng mellom bremsegruppe, lengde av godstog og maks kjørehastighet, og en kan se at største tillatte hastighet for godstog er 100 km/t (Nielsen, 2017).

Tabell 6: Sammenheng mellom lengde av godstog og bremsegruppe (Nielsen, 2017).

Bremsegruppe	Toglengde (m)	Hastighet (Km/h)
P	500	100
P	600	90
P	700	80
G	850	80

BREMSEPROSENT

Innenfor jernbane beregnes en bremseprosent, som lokomotivfører får oppgitt når de tar ut tog. Bremseprosent et mål på togets bremseevne. Denne er viktig for sikker togframføring og påvirker et togs tillatte hastighet. En høyere bremseprosent tillater en høyere hastighet. Bremseprosent kan enkelt forklares som «*bremset vekt (bremsekraft) dividert med bruttovekt multiplisert med 100. Bremseprosent angir altså togets bremseevne i forhold til togets vekt*» (NOU2001:09, 2001b).

2.4.2 Boggier i godsvogner

I Europa er det vanlig å bruke boggier av typen Y25 på godsvogner. Disse finnes i flere varianter og kjennetegnes ved stiv akselføring og relativ enkel utførelse (Jernbanekompetanse, 2015, Zhou, 2014). Boggien består av et hjulsett, akselboks, opphengsanordning, boggieramme, grunnleggende bremserrigging og en lastproporsjonal innretning (Railteco, 2018). De viktigste tekniske parameterne er vist i tabell 7.

Tabell 7: De viktigste parameterne for boggier av typen Y25 (Railteco, 2018)

De viktigste parameterne for boggier av typen Y25	
Mål	1435 mm
Aksellast	22,5t
Akselavstand	1800 mm
Maksimal kjørehastighet	120 km/t
Diameter på hjul	920 mm

2.4.3 Tyngdepunkt for godsvogner

Som tidligere nevnt kan tyngdepunktet for lastede godsvogner variere fra 1,0 – 3,0 m, og veltefaren er større jo høyere tyngdepunktet ligger (Jernbanekompetanse, 2021c). China's Regulations on Loading and Securing of Railway Goods fastsetter maksimal høyde for tyngdepunktet til 2000 mm innenfor normal driftshastighet (Peng, 2011, Zhang, 2018), mens Association og American Railroads (AAR) har fastsatt maksimal høyde for tyngdepunktet til 2489 mm over toppen av skinnen (Zhang, 2018). (Peng, 2011) undersøkte ugunstige lastkombinasjoner, samt ugunstige kombinasjoner av fart og sporgeometriske forhold og fant at maksimal høyde for tyngdepunktet for en godsvogn av typen C_{64K} var 2,5622m (Peng, 2011). I Norge er det ikke fastsatt noen maksimal høyde for tyngdepunktet til godsvogner.

2.4.4 Transportformer for gods

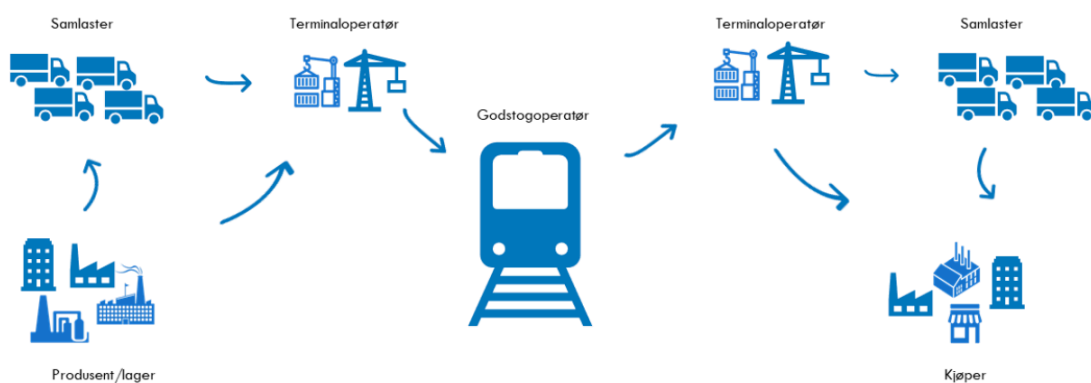
Det tilbys det forskjellige typer transport for gods; kombilast, vognlast og systemlast.

2.4.4.1 KOMBILAST

Kombilast, også kaldt intermodal transport utgjør ca. 85% andel av den totale godstransporten på det norske jernbanenettet (målt i tonn), og prognosene viser at etterspørselen etter kombitransport på bane vil øke de neste årene (Jernbaneverket, u.å). I intermodal godstransport, kombinerer man

minst to ulike transportformer i en transportkjede. Transporten kan foregå med lastebil, fly, tog eller båt. Det fraktes ofte store volumer og godset lastes opp på standardiserte lastbærere (containere, vekselflak eller semihengere) som flyttes mellom ulike transportmidler. Overflytningen skjer på terminaler, som er et viktig knutepunkt mellom de ulike transportmidlene (Spurkeland, 2021).

Figur 4 viser en intermodal transportkjede hvor gods lastes på og fraktes med jernbane, og losses av i andre enden (OsloEconomics, 2018).



Figur 4: Godstransport på jernbane – ledd i intermodal transport eller selvstendig transportkjede (OsloEconomics, 2018).

2.4.4.2 VOGNLAST OG SYSTEMLAST

Vognlast og systemlast utgjør en mindre andel av den totale godstransporten på bane, med henholdsvis 5% - 8% (Jernbaneverket, u.å). Vognlast er den tradisjonelle jernbanetransporten hvor den minste sendingen er én godsvogn (Jernbanedirektoratet, 2021). I dag kjøres faste togstammer med vognlast mellom terminaler (Jernbaneverket, u.å). For systemtog er minste sending et helt tog og disse fraktes vanligvis kun én varegruppe, for eksempel malm, flis, tømmer eller industrigods. Systemtog kjøres normalt fra terminal på startstasjon til terminal på endestasjon uten stopp underveis (Jernbanedirektoratet, 2021). Ettersom det fraktes store volumer av én vare, og sendingene ofte er forutsigbare, er det vanlig at kunder får et spesialtilpasset togtilbud for denne typen transporter (Jernbanedirektoratet, 2021).

3 Metode

I denne oppgaven benyttes en kvantitativ forskningsmetode i form av analyse av utvalgte kurver på Dovrebanen i Microsoft Excel for å besvare forskningsspørsmålene:

- 1. I hvor mange kurver mellom Oslo og Trondheim er det risiko for at godstog kan velte ved kjøring i 120 km/t?*
- 2. I hvilken grad påvirker tyngdepunktet til godstog risikoen for velting?*

3.1 Analyseområdet: Dovrebanen

Dovrebanen er 485 kilometer lang, og hovedforbindelsen mellom Østlandet og Trøndelag. Banen går fra Eidsvoll, nordover gjennom Gudbrandsdalen, over Dovrefjell til Hjerløy, ned Drivdalen til Oppdal og videre til Trondheim (BaneNOR, u.å). I tillegg forbinder banen Møre og Romsdal til resten av landet med sidebanen Raumabanen, som går mellom Dombås og Åndalsnes (Bergqvist, u.å). Trafikken på Dovrebanen består av regiontog, fjerntog og godstog (BaneNOR, u.å). De to aktørene som i hovedsak frakter gods på strekningen er Cargonet AS og Green Cargo AS (Bergqvist, u.å).

3.1.1 Stigninger og fall på Dovrebanen

Som tidligere nevnt har stigninger og fall på jernbanen stor betydning for togframføringen, og spesielt tunge godstog kan ha problemer med å kjøre opp store stigninger. I tillegg øker bremselengden ved fall. Dovrebanen går gjennom et kupert landskap og banestrekningen er preget av mye stigning/fall (Bergqvist, u.å). På Network Statement kan en finne at Dovrebanens største fall (fra Oslo) er på strekningene Kongsvoll-Drivstua, Garli-Støren og Heimdal- Trondheim M. På disse strekningene er fallet 18 ‰. Største stigning på strekningen er 19 ‰ på strekningen Nypan-Heimdal (BaneNOR, 2021a).

3.1.2 Overbygningsklasse, aksellast og maksimal hastighet på Dovrebanen

Aksellast og hastighetsverdier er basert på hva overbygningen er dimensjonert for. Dovrebanen har overbygningsklasse C, og som vist i tabell 4 varierer største tillatte hastighet for godstog for denne overbygningsklassen mellom 80 km/t (nominell aksellast 22,5 tonn) og 100 km/t (nominell aksellast 18 tonn). Det vil likevel ikke alltid være samsvar mellom tillatt aksellast/hastighet på en aktuell strekning og hvilken aksellast/hastighet overbygningsklassen på strekningen tillater, da denne stedvis vil kunne være begrenset av banens underbygning og sporgeometri (BaneNOR,

2022). I tillegg kan togets lengde, kontaktledningsanlegg og signalanlegg være begrensende for hastigheten (Jernbaneverket, 2012).

3.2 Data

3.2.1 Horisontal sporgeometri

Analyseområdet inkluderer alle kurvene på Dovrebanen nord for Eidsvoll i retning Trondheim. Datasettet ble levert av Bane NOR og inneholdt informasjon om alle kurvene fra km 70,7547 til km 553,633. Datasettet bestod totalt av 3777 linjer.

Tabell 8: Oversikt over måledata levert av Bane NOR.

Variabel	Beskrivelse
Banestrekning	En definert strekning av et jernbanespor
Km	Distanse fra Oslo S
Trasépunkt	OB, Overgangskurvens begynnelsepunkt OE, Overgangskurvens endepunkt FOB, Felles overgangskurve begynnelsepunkt KP, Kurvepunkt FKP, Felles kurvepunkt HBP, Høybrekk punkt LBP, Lavbrekk punkt SE, Stigningskurvenes endepunkt
Kurveradius	mm
Overhøyde	mm
Overgangskurvens lengde	m
Sporstype	Hovedspor Venstre hovedspor Høyre hovedspor
Sporvidde	1500 mm

3.2.2 Hastighetsprofil

Hastighetsprofilen ble levert av Bane NOR. Hastighetsprofilen omfattet skiltet hastighet, pluss hastighet og krengetogshastighet, i tillegg til skilting av redusert hastighet.

3.3 Databehandling

3.3.1 Veltefastigheter

For å gjennomføre analysen i Microsoft Excel benyttes formelen for veltefastighet i kurver beskrevet i kapittel 2.3.1. Formelen er vist under i formel 1.

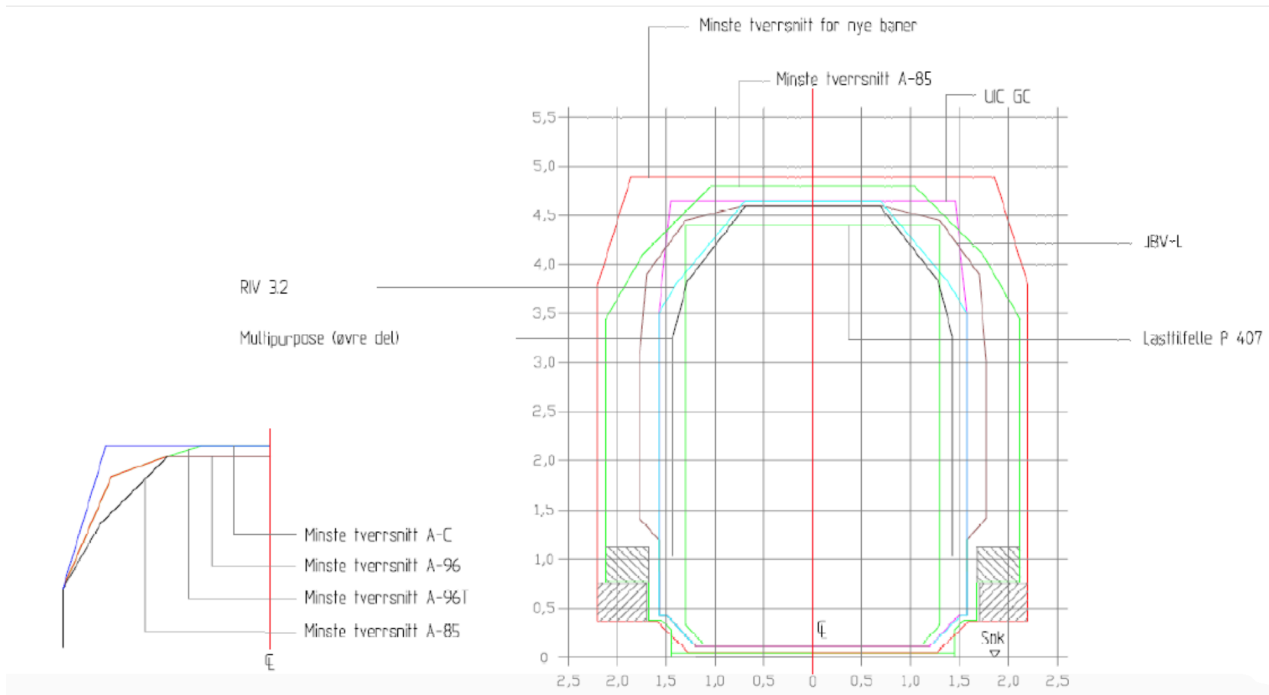
Formel 1: Formel for beregning av veltefastighet i kurver.

$$v = \sqrt{\left(\frac{s}{2H} + \tan\alpha\right) * gR}$$

For å avgjøre hvilke kurver som tillot en hastighet større eller lik 120 km/t ble det benyttet IF-setning for å sortere resultatene.

Tyngdepunkt

Det ble undersøkt veltefastigheter for tyngdepunkt 1,75 og 2 meter. Vurderingen av tyngdepunktet er gjort på bakgrunn av tog som kjører Y25 boggier. Det er tatt utgangspunkt i vognprofil A 96T, som kan frakte tømmer som utgjør en stor andel av godstransporten på Dovrebanen. Som vist i figuren under vil vogner av typen A 96T ha en lasthøyde på ca. 4 meter, mens stakehøyde vil være på ca. 3.8 meter. Ettersom tømmer som fraktes er en homogen masse med massetetthet mindre enn understellet på vognen, vil aldri tyngdepunktet komme høyere enn midt på vognen. Det er derfor valgt et konservativt tyngdepunkt på 2 meter i beregningene for å ha en sikkerhetsmargin.



Figur 5: Sammenstilling av ulike profiler (BaneNOR, 2018b).

3.3.2 Rampestigningshastighet og rykk

Det ble videre sjekket om overgangskurvene hadde en tilstrekkelig lengde for å kjøre i 120 km/t. I Microsoft Excel ble formlene for rykk og rampestigningshastighet, beskrevet i kapittel 2.1.5, løst for L som vist i formel 2 og 3, og brukt for å finne minimal lengde av overgangskurvene.

Formel 2: Minste lengde på overgangskurve mtp. rampestigningshastighet.

$$L_2 \leq v * \frac{h}{\left(\frac{dh}{dt}\right)_{maks}}$$

Formel 3: Minste lengde på overgangskurve mtp. rykk.

$$L_3 \leq v * \frac{j_u}{\psi_{maks}}$$

Hvor J_u finnes som beskrevet i kapittel 2.1.1, og ψ_{maks} er $0,52\text{m/s}^3$.

Det ble sjekket om overgangskurvene lengde var tilfredsstillende eller ikke, ved å sortere alle resultatene med IF-setninger.

3.3.3 Tyngdepunkt ved forskyvning

I tillegg til å undersøke velte hastigheter ved ulike tyngdepunkt, ble det undersøkt for hvilket tyngdepunkt det tillates kjøring i 120 km/t for de ulike kurvene når forskyvningen er 5 cm. Formelen for maksimalt tyngdepunkt kan utledes fra formelen i kapittel 2.3, ved å sette veltende moment lik stabiliserende moment, løse for H og en får:

Formel 4: Formel for beregning av tyngdepunkt ved forskyvning.

$$H = \frac{\frac{s}{2} - e}{\tan\varphi},$$

Hvor $e = 50$ mm og $\varphi = \arctan\left(\frac{v^2}{gR}\right)$.

Resultatene ble sortert med IF-setninger.

3.3.4 Skiltet hastighet

Skiltet hastighet på strekningen varierer fra 30 km/t til 200 km/t. Skiltet hastighet med retningskode «Med km-retning» ble analysert og sammenlignet med maks velte hastighet funnet ved tyngdepunkt lik 2 m. Kritiske kurver ble undersøkt videre, og sammenlignet med velte hastighet funnet ved tyngdepunkt lik 1,75 m. Dette ble brukt til å bestemme antall barrierer som reduserer sannsynligheten for at en ulykkessituasjon kan inntreffe dersom godstog kjører i 120 km /t. Avslutningsvis ble det undersøkt hvilket tyngdepunkt som tillot kjøring i lik hastighet som skiltet hastighet, uten fare for at barrierer skulle oversees.

4 Resultater

4.1 Kurver hvor maksimal hastighet er ≤ 120 km/t, når $H = 1,75$ meter.

44 av kurvene som ble undersøkt tillot ikke en hastighet ≥ 120 km/t uten fare for at tog med tyngdepunkt på 1,75 m kan velte. 4 av de tilhørende overgangskurvene (uthevet skrift) hadde ikke tilstrekkelig lengde for kjøring i 120 km/t, undersøkt for rykk og rampestigningshastighet.

Av kurvene hvor veltehastigheten var ≤ 120 km/t var 20 av kurvene mellom Hamar-Lillehammer, 8 mellom Lillehammer-Dombås, 11 mellom Dombås-Oppland og 5 av kurvene var mellom Oppland-Trondheim.

Tabell 9: Kurver hvor maksimal hastighet er ≤ 120 km/t, når $H=1,75$ meter.

Km	R	h	Maks veltehastighet
<i>126,5706-126,6201</i>	260	90	119 km/t
<i>126,7748-126,8157</i>	254	120	118 km/t
<i>131,192-131,3845</i>	240	150	115 km/t
<i>131,5045-131,7507</i>	243	150	115 km/t
<i>152,2821-153,4734</i>	247	150	116 km/t
<i>153,6049-153,7123</i>	241	150	115 km/t
<i>153,8323-154,1737</i>	249	150	117 km/t
<i>154,9848-155,0983</i>	249	150	117 km/t
<i>155,1133</i>	228	150	112 km/t
<i>170,75-171,0512</i>	249	150	117 km/t
<i>171,944-172,0273</i>	243	150	115 km/t
<i>172,1513-172,4434</i>	248	150	116 km/t
<i>172,5704-172,8286</i>	249	150	117 km/t
<i>173,083-173,2841</i>	249	150	117 km/t
<i>174,0645</i>	243	150	115 km/t
<i>174,1473</i>	255	150	118 km/t
<i>174,2202-174,406</i>	250	150	117 km/t
<i>176,7533-176,8186</i>	241	150	115 km/t
<i>177,1398-177,1883</i>	236	150	114 km/t
<i>182,7495-182,8122</i>	238	150	114 km/t
<i>189,8244-190,1179</i>	248	150	116 km/t
<i>197,0245-197,133</i>	262	130	120 km /t
<i>217,047-217,2731</i>	249	135	117 km/t
220,3356-220,5175	248	120	116 km/t
<i>221,2046-221,3621</i>	251	125	117 km/t
<i>221,5041-221,6139</i>	249	125	117 km/t
<i>221,8056-221,8702</i>	251	125	117 km/t
233,1315-233,2829	244	125	115 km/t
<i>267,56-267,627</i>	241	135	115 km/t
<i>268,859-269,14</i>	248	135	116 km/t

269,27-269,452	246	135	116 km/t
269,875-269,972	234	135	113 km/t
285,9242-286,1244	250	130	117 km/t
309,388-309,691	250	150	117 km/t
312,28-312,41	240	135	115 km/t
312,43-312,521	250	135	117 km/t
312,541-312,7	245	135	116 km/t
314,251-314,513	250	150	117 km/t
315,5333-315,6618	246	150	116 km/t
464,522-465,092	250	150	117 km/t
483,012-483,115	259	130	119 km/t
489,691-489,784	256	135	118 km/t
499,437-499,48	259	125	119 km/t
532,1658-532,2523	252	40	117 km/t

4.2 Kurver hvor maksimal hastighet er ≤ 120 km/t, når H = 2 meter.

Av kurvene som ble undersøkt, var det totalt 175 kurvekombinasjoner som ikke tillot hastigheter større eller lik 120 km/t, uten at det er fare for at tog med tyngdepunkt på 2 meter kan velte.

Mellom Eidsvoll-Hamar var det 3 kurver, mellom Hamar-Lillehammer og Lillehammer – Dombås var det for begge strekninger 44 kurver. Mellom Dombås-Oppdal var det 20 kurver, mens det mellom Oppdal-Heimdal og Heimdal-Trondheim var henholdsvis 50 og 14 kurver.

Når tilhørende overgangskurver ble sjekket for rykk og rampestigningshastighet var 38 av disse (uthevet skrift) for korte til å tillate kjøring i 120 km/t.

Tabell 10: Kurver hvor maksimal hastighet er < 120 km/t, når H= 2 meter.

Km	R	h	Maks velte hastighet
72,7093 - 72,7464	300	125	120 km/t
102,1039	270	150	114 km/t
102,1327-102,1731	295	150	119 km/t
126,5706-126,6201	260	90	111 km/t
126,6401-126,7378	293	90	118 km/t
126,7748-126,8157	254	120	110 km/t
131,1280-121,1920	240	150	107 km/t
131,5045-131,7505	243	150	108 km/t
133,7497-133,9786	297	150	119 km/t
134,1616-134,4546	296	140	119 km/t
135,0843-135,1322	271	150	114 km/t
142,3358- 142,4368	291	150	118 km/t
143,4512-143,5446	296	125	119 km/t
143,6566-143,7653	300	150	120 km/t

151,2653	298	150	119 km/t
151,5102-151,5791	300	150	120 km/t
153,1046-153,1561	294	150	119 km/t
153,2821-153,4734	247	150	109 km/t
153,6049-153,7123	241	150	107 km/t
153,8323-154,1737	249	150	109 km/t
154,7203-154,8607	288	150	117 km/t
154,9848-155,0983	249	150	109 km/t
155,1133	228	150	105 km/t
155,1813-155,2151	265	150	113 km/t
160,1524-160,3276	296	150	119 km/t
160,5196-160,6251	282	150	116 km/t
162,4146- 162,5494	300	150	120 km/t
165,6938-165,8947	296	150	119 km/t
170,7500-171,0512	249	150	109 km/t
171,1722	298	150	119 km/t
171,3083	290	150	118 km/t
171,944-172,0273	243	150	108 km/t
172,1513-172,4434	248	150	109 km/t
172,5704-172,8286	259	150	109 km/t
173,0306	269	150	114 km/t
173,083-173,2841	249	150	109 km/t
174,0646	243	150	108 km/t
174,1473	255	150	111 km/t
174,2202-174,406	250	150	109 km/t
175,108-175,1803	300	150	120 km/t
176,3945-176,4778	299	120	120 km/t
176,5998-176,6363	275	120	115 km/t
176,7533-176,8186	241	150	107 km/t
177,1398-177,1883	236	150	106 km/t
182,3006-182,33	296	125	119 km/t
182,7495-182,8122	238	150	107 km/t
183,2866-183,3276	288	120	117 km/t
184,5981-184,631	290	110	118 km/t
189,3384-189,4962	295,5	150	119 km/t
189,8244-190,1179	248	150	109 km/t
190,2459-190,3177	283	150	116 km/t
190,4467-190,5158	275	150	115 km/t
197,0245-197,133	262	130	112 km/t
209,835-209,888	296	135	119 km/t
217,047-217,2731	249	135	109 km/t
220,3356-220,5175	248	120	109 km/t
221,2046-221,3621	251	125	110 km/t
221,5041-221,6139	249	125	109 km/t
221,8056-221,8702	251	125	110 km/t
222,1489-222,2055	287	70	117 km/t
233,1315-233,2829	244	125	108 km/t
241,6814-241,7387	292	115	118 km/t

241,7627	299	115	120 km/t
254,6204-254,6204	297	110	119 km/t
254,8975-254,8975	297	110	119 km/t
267,56-267,627	241	135	107 km/t
268,859-269,14	248	135	109 km/t
269,27-269,452	246	135	109 km/t
269,875-269,972	234	135	106 km/t
285,5105-285,6079	294	75	119 km/t
285,7309-285,8012	290	75	118 km/t
286,9242-286,1244	250	130	109 km/t
309,388-309,691	250	150	109 km/t
309,821-309,957	290	150	118 km/t
310,26-310,371	290	150	118 km/t
310,873-311,086	295	150	119 km/t
312,095-312,155	280	110	116 km/t
312,28-312,41	240	135	107 km/t
312,43-312,521	250	135	109 km/t
312,541-312,7	245	135	108 km/t
314,251- 314,513	250	150	109 km/t
314,933-314,973	300	150	120 km/t
315,5333-315,6618	246	150	109 km/t
315,892-315,957	270	150	114 km/t
327,711-327,807	280	140	116 km/t
335,3829-335,4814	297	150	119 km/t
340,3174-340,4723	294	150	119 km/t
341,0117-341,064	285	150	117 km/t
341,7712- 341,9017	288	150	117 km/t
342,101-342,2619	290	40	118 km/t
342,367-342,543	300	80	120 km/t
345,204-345,63	300	150	120 km/t
349,484-350,618	275	140	115 km/t
350,74-350,876	268	140	117 km/t
350,97-351,064	299	140	120 km/t
354,193-354,495	300	150	120 km/t
380,286-380,748	300	150	120 km/t
391,246-391,323	300	150	120 km/t
392,412-392,617	300	150	120 km/t
392,754-392,848	295	150	119 km/t
397,089-397,165	295	150	119 km/t
397,293-397,763	300	150	120 km/t
397,899-398,008	300	150	120 km/t
401,282-401,39	290	150	118 km/t
401,526-401,678	285	150	117 km/t
402,947-403,055	290	150	118 km/t
403,187-403,283	290	150	118 km/t
404,234-404,408	290	150	118 km/t
420,717-420,97	300	150	120 km/t
421,105-421,289	295	150	119 km/t

421,43-421,549	290	150	118 km/t
450,557-450,801	291	150	118 km/t
451,277-451,426	289	150	118 km/t
451,872-452,187	278	150	115 km/t
452,445-452,663	300	150	120 km/t
455,446-455,762	290	150	118 km/t
455,904-456,357	290	150	118 km/t
457,824-457,911	280	150	116 km/t
458,045-458,118	290	150	118 km/t
458,254-458,38	285	150	117 km/t
458,512-458,59	290	150	118 km/t
458,759-458,895	294	150	119 km/t
460,082-460,194	300	150	120 km/t
460,336-460,613	300	150	120 km/t
460,765-460,882	300	150	120 km/t
461,014-461,218	295	150	119 km/t
461,345-461,905	300	150	120 km/t
462,04-462,532	295	150	119 km/t
462,663-462,733	294	150	119 km/t
464,522-465,092	250	150	109 km/t
465,228-465,661	294	150	119 km/t
466,563-466,883	295	150	119 km/t
482,322-482,703	270	120	114 km/t
483,012-483,115	259	130	111 km/t
489,426-489,572	269	125	113 km/t
489,691-489,784	256	135	111 km/t
489,957-490,03	298	80	119 km/t
499,205-499,383	265	120	113 km/t
499,437-499,48	259	125	111 km/t
500,273- 500,507	270	115	114 km/t
503,046-503,238	283	150	116 km/t
504,846-504,921	300	150	120 km/t
509,846-509,964	290	150	118 km/t
511,16-511,265	300	150	120 km/t
514,86-514,899	300	50	120 km/t
515,022- 515,14	296	50	119 km/t
522,257-522,434	300	150	120 km/t
522,723-522,957	284	150	117 km/t
523,142-523,235	300	150	120 km/t
524,059-524,19	295	150	119 km/t
525,647-525,679	295	130	119 km/t
525,803-525,921	295	150	119 km/t
526,044-526,292	300	125	120 km/t
526,901-527,105	300	150	120 km/t
531,828- 531,9271	301	85	120 km/t
532,165-532,2523	252	40	110 km/t
532,418- 532,4635	282	95	116 km/t
536,217-536,2675	300	150	120 km/t

536,382-536,4515	294	125	119 km/t
536,570-536,7472	298	150	119 km/t
539,15-539,396	300	150	120 km/t
543,65-543,95	300	150	120 km/t
544,94-545,08	291	150	118 km/t
545,23-545,329	291	150	118 km/t
545,46-545,503	296	150	119 km/t
545,533-545,703	289	150	118 km/t
545,85-546,05	291	150	118 km/t
546,192-546,245	279	150	116 km/t
546,899- 546,948	280	140	116 km/t
547,289-547,359	290	150	118 km/t
547,498-547,542	285	150	117 km/t
547,686-547,762	285	150	117 km/t
548,089-548,207	295	150	119 km/t
548,346-548,369	290	150	118 km/t
550,927-551,019	296	150	119 km/t

4.3 Overgangskurver som ikke tillater 120 km/t

Rampestigningshastigheten var begrensende for 471 av overgangskurvene når hastigheten var 120km/h. Rykk var ikke begrensende for noen av kurvene.

Tabell 11: Overgangskurver uten tilstrekkelig lengde for å kjøre i 120 km/t.

	Antall overgangskurver som ikke har tilstrekkelig lengde
Rampestigningshastighet	471
Rykk	-

4.4 Minste tyngdepunkt ved forskyvning

Ved å benytte formelen for maksimal høyde for tyngdepunkt med forskyvning 5 cm og kjøring i 120 km/h, viste resultatene at 9 kurver hadde maksimal høyde til tyngdepunktet under 1,5 meter. Det laveste tyngdepunktet var for km 155,1133, med radius R=228, der var maksimalt tyngdepunkt 1,4143m.

Laveste maksimale tyngdepunkt, ved forskyvning e= 50 mm.

Tabell 12: Laveste maksimale tyngdepunkt, ved forskyvning e= 50 mm.

Km	R (mm)	e (mm)	$H = \frac{s-e}{2 \tan \phi}$ (m)
131,192-131,3845	240	50	1,4878

153,6049-153,7123	241	50	1,4939
155,1133	228	50	1,4143
176,7533-176,8186	241	50	1,4939
177,1398-177,1883	236	50	1,4633
182,7495-182,8122	238	50	1,4755
267,56.267,627	241	50	1,4939
269,875-269,972	234	50	1,4510
312,28-312,41	240	50	1,4878

4.5 Skiltet hastighet og antall barrierer mot at velteulykker skal inntreffe

For godstog med tyngdepunkt på 2 meter viste to av kurvene skiltet hastighet høyere hastighet enn maks velte hastighet uten noen barrierer. Fire av kurvene en barriere og ti av kurvene to barrierer.

Tabell 13. viser en oversikt hvor skiltet hastighet gjelder fra og kilometermerket der kurven starter med tilhørende maksimal velte hastighet. Det er også vist antall skilt før kurven, ved hvilket kilometermerke disse gjelder fra og med hvilken hastighet (skiltavstand er oppgitt i parentes).

Tabell 13: Skiltet hastighet og barrierer mot at ulykker skal inntreffe for godstog med tyngdepunkt på 2 meter.

Km	Skiltet hastighet	Km	Maks velte hastighet	Barrierer		
				Antall	km	Skiltet hastighet
69,63	130 km/t	72,7093	120 km/t	0	-	-
117,27	120 km/t	126,5706	111 km/t	2	122,42 (906)	100 km/h
					124,525 (915)	50 km/h
237,693	120 km/t	241,6814	118 km/t	2	238,624 (800)	100 km/h
					241,088 (655)	80 km/h
262,995	130 km/t	267,56	107 km/t	2	265,128 (1050)	80 km/h
					266,999 (524)	70 km/h
277,15	130 km/t	285,5105	119 km/t	2	280,545 (850)	100 km/h
					284,895 (575)	70 km/h
307,81		309,388		2	308,305 (1050)	70 km/h

	120 km/t		109 km/t		309,727 (0)	80 km/h
323,653	130 km/t	327,711	116 km/t	2	325,968 (0)	100 km/h
					326,785 (0)	70 km/h
					332,528 (910)	90 km/h
330,958	120 km/t	335,382 9	119 km/t	2	334,706 (625)	80 km/h
335,842	130 km/t	340,317 4	119 km/t	1	338,617 (1050)	80 km/h
343,401	120 km/t	345,204	120 km/t	0	-	-
351,135	120 km/t	354,193	120 km/t	1	353,243 (875)	80 km/h
372,965	130 km/t	380,286	120 km/t	1	379,16 (1050)	80 km/h
					387,005 (917)	100 km/h
382,083	130 km/t	391,246	120 km/t	2	390,271 (966)	80km/h
398,885	120 km/t	401,282	118 km/t	1	400,109 (1100)	70 km/h
					512,5 (960)	90 km/h
511,748	120 km/t	514,86	120 km/t	2	513,56 (661)	50 km/h
					533,73 (910)	90 km/h
532,63	120 km/t	536,217	120 km/t	2	535,535 (615)	80 km/h

Kurvene på km 72,7093 - 72,7464, 340,3174-340,4723, 345,204-345,63, 354,193-354,495, 380,286-380,748 og 401,282-401,39 peker seg ut som kritiske for godstog med tyngdepunkt på 2 meter. Kurvne ble derfor undersøkt videre. For godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter var 3 av kurvne kritiske. Kurvne på km 72,7093 - 72,7464 hadde 0 barrierer, mens kurvne på km 340,3174-340,4723 og 380,286-380,748 hadde 1 barriere.

Tabell 14: Skiltet hastighet og barrierer mot at ulykker skal inntreffe for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter.

Km	Skiltet hastighet	Km	Maks velte hastighet	Barrierer		
				Antall	Km	Skiltet hastighet
69,63	130 km/t	72,709	128 km/t	0	-	-

335,842	130 km/t	340,3174	127 km/t	1	338,617 (1050)	80 km/h
372,965	130 km/t	380,286	128 km/t	1	379,16 (966)	80 km/h

Oversikt over minste tyngdepunkt som tillater ≥ 130 km/t i kurveradier som anses som kritiske. Der skiltet hastighet er høy, kurveradiusen er liten og barrierene få.

Tabell 15: Oversikt over minste tyngdepunkt som tillater hastighet større eller lik 130 km/t i kritiske kurver.

Km	Skiltet hastighet (antall barrierer)	Km	Radius	Overhøyde	Maks tyngdepunkt som tillater ≥ 130 km/h.
69,63	130 km/t	72,7093 - 72,7464	300 m	125 mm	1,711 m
335,842	130 km/t (1)	340,3174- 340,4723	294 m	150 mm	1,678 m
372,965	130 km/t (1)	380,286- 380,748	300 m	150 mm	1,712 m

5 Diskusjon

I dette kapittelet vil det basert på gjennomgått teori og resultatene som fremkommer av beregningene i Microsoft Excel forsøkes å besvare forskningsspørsmålene til oppgaven. Avslutningsvis vil andre begrensninger for å øke hastigheten til 120 km/t på strekningen bli drøftet.

Forskningsspørsmål 1. I hvor mange kurver mellom Oslo og Trondheim er det risiko for at godstog kan velte ved kjøring i 120 km/t?

Kurveradius og overhøyde

Kurveradien setter begrensninger for hvor fort togene kan kjøre. Når man bygger jernbane er det ønskelig å bruke så store radier som mulig, da disse tillater større hastigheter enn små kurveradier

(Jernbanekompetanse, 2021a). Dovrebanen har flere kurver med liten radius, det er totalt 174 kurver med radius < 300 m. I samsvar med teorien viser resultatene at tog ikke kan kjøre i 120 km/t i disse kurvene uten at det er fare for at det kan velte.

Resultatene viser at kurver med radius ≤ 262 m ikke tillater kjøring i 120 km/t for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter. Kurver med radius ≤ 300 m tillater ikke at godstog med tyngdepunkt på 2 meter kjører i 120 km/t. For kurver med radius lik 301 m tillates ikke 120 km/t dersom tilhørende overhøyde er < 115 mm. For at godstog skal kunne øke hastigheten på disse strekningene vil det være nødvendig med slakere kurver, eller å legge om traséen til tunneler hvor toget kan kjøre på rettlinje. Disse tiltakene vil være kostbare og nærmere undersøkelser vil være nødvendig for å bestemme om dette er hensiktsmessig.

Det er først og fremst kurveradiusen som setter begrensning for hvor fort togene kan kjøre uten å velte. Overhøyden har mindre betydning. Kurver med samme overhøyde og tilnærmet lik radius tillater forskjellig hastighet. Mens kurver med lik radius og forskjellig overhøyde tillater samme hastighet. Tabell 15 illustrer tilfellet for km 514,86-514,899 og km 522,257-522,434 som tillater samme veltehastighet hvor radiusen er lik, mens overhøyden er forskjellig.

Tabell 16: Illustrasjon av overhøydens betydning for maksimal veltehastighet.

<i>Km</i>	<i>R</i>	<i>h</i>	<i>Maks veltehastighet</i>
514,86-514,899	300	50	120 km/h
522,257-522,434	300	150	120 km/h

Overgangskurve

Overgangskurvens lengde vil også være med på å bestemme hvilken hastighet toget kan holde gjennom kurven. For korte overgangskurver vil maksimalverdiene for rampestigningshastighet og rykk kunne gjøre at den dimensjonerende overgangskurven ikke kan trafikkeres med så høy hastighet som sirkelelementet (Jernbanekompetanse, 2020).

Undersøkelsene viste at 471 av overgangskurvene ikke hadde tilstrekkelig lengde for hastigheter opp mot 120 km/h. En mulig løsning på problemet er kurvekorrigeringer for å forlenge overgangskurvene, men dette vil være svært omfattende og medføre store kostnader (Jernbanekompetanse, 2021b).

Forskningsspørsmål 2. I hvilken grad påvirker tyngdepunktet til godstog risikoen for velting?

Som nevnt i teorien kan tyngdepunktet for lastede godsvogner variere fra 1,0 – 3,0 m, og veltefaren er større jo høyere tyngdepunktet ligger (Jernbanekompetanse, 2021c). Resultatene viste at ved økende tyngdepunkt var det flere kurver som ikke tillot kjøring i 120 km/t. For godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter var det 44 kurver som ikke tillot kjøring i 120 km/t, mens for godstog med tyngdepunkt på 2 meter var det 175 kurver som ikke tillot kjøring i 120 km/t.

Det laveste tillatte tyngdepunktet ved 5 cm forskyvning var for km 155,1133, med radius $R = 228$, der var maksimalt tyngdepunkt 1,4143 m.

5.1 Risiko ved at skilt oversees

Det er normalt store sikkerhetsmarginer mot at ulykker på jernbanenettet skal skje. Ved skiltet hastighet lik 120 km/t vil ikke en hastighet på 120 km/t med godstog medføre noen risiko for at toget velter.

Undersøkelsene viste at for godstog med tyngdepunkt på 2 meter, var det 175 kurvekombinasjoner som ikke tillot en hastighet på 120 km/t. Maksimal veltehastighet ble vurdert opp mot skiltet hastighet på stedet, og for to av kurvene var skiltet hastighet høyere eller lik veltehastigheten. For godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter viste en av kurvene skiltet hastighet høyere enn maks veltehastighet. I henhold til sikkerhetsforskriften bør det etableres varslende barrierer ved disse kurvene. Fire av kurvene hadde kun en barriere for godstog med tyngdepunkt på 2 meter, mens for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter var det to kurver som kun hadde en barriere. For å unngå at lokfører overser varselet og barrieren brytes bør det på disse stedene innføres flere barrierer for å hindre at ulykker inntreffer.

De kurvene som hadde liten kurveradius og høy skiltet hastighet med null eller en barriere ble ansett som kritiske. Minste tyngdepunkt som tillot kjøring i 130 km/t (lik skiltet hastighet), i kurver med 1 barriere var $H = 1,678$ m. I kurver med null barrierer var minste tyngdepunkt som tillot kjøring i 130 km/h, $H = 1,711$ m.

5.2 Andre begrensninger

Det er en forutsetning at alle enheter i toget må være godkjent for kjøring i 120 km/t. Utover dette ligger det også begrensninger i om toget har tilstrekkelig bremskapasitet og ytelse til å kjøre i 120 km/h. Ved nedbremsinger og akselerasjoner vil energibehovet øke. Den største stigningen på strekningen er 19 ‰. Hastighet i stigninger avhenger av ytelse og vekt, og for store godstog vil det være utfordrende å holde høy hastighet i slike områder. (Handstanger, 2015). Det økte energibehovet stiller videre krav til kontaktledningsanlegget som må sikre god strømovertføring (Jernbaneverket, 2012).

På Dovrebanen er det 315 planoverganger. Usikrete planoverganger stiller strenge krav til sikt og hastighet. Nedleggelse av planoverganger vil bidra til at godstogene kan passere med høyere hastighet. Videre er det behov for at underbygningen forsterkes og bruer oppgraderes (BaneNOR, 2018).

6 Konklusjon

I oppgaven er det ved hjelp av Microsoft Excel undersøkt «*Sikkerhet mot velting for godstog ved kjøring i 120 km/t i korridoren mellom Oslo-Trondheim*». Horisontalgeometrien er blitt undersøkt for å finne hvor mange kurver som ikke tillater kjøring i 120 km/h. Det er også undersøkt om overgangskurvenes lengde er tilfredsstillende for høyere hastighet. Videre har velte hastigheter for godstog med tyngdepunkt 2 meter blitt sammenlignet med skiltet hastighet på stedet. Kritiske kurver ble undersøkt videre. Dette for å bestemme antall barrierer som kan være med på å redusere sannsynligheten for at ulykkessituasjoner utvikler seg. Avslutningsvis ble det undersøkt hvilket tyngdepunkt som tillot kjøring lik skiltet hastighet i kritiske kurver.

Dovrebanen går gjennom kupert terreng med store stigninger og krappe kurver. På strekningen som er undersøkt er det 174 kurver med radius under 300 m. Resultatene viser at kurver med radius ≤ 262 m ikke tillater kjøring i 120 km/t for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter. Kurver med radius ≤ 300 m tillater ikke at godstog med tyngdepunkt på 2 meter kjører i 120 km/h. For kurver med radius lik 301 m tillates ikke 120 km/h dersom tilhørende overhøyde er < 115 mm. Mange steder er også overgangskurvene for korte til å øke hastighetene. Det er totalt 471 overgangskurver som ikke har tilstrekkelig lengde for kjøring i 120 km/t og forlengelser av disse vil være kostbart.

Videre kommer det frem at risikoen for å velte øker med høyere tyngdepunkt. For godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter vil 44 av kurvene sette begrensninger for kjøring i 120 km/t. For godstog med tyngdepunkt opp mot 2 meter vil det i 175 av kurvene ikke være forsvarlig å kjøre i 120 km/h, uten at det er fare for at toget velter. For 2 av kurvene som ble undersøkt er skiltet hastighet større enn maksimal velte hastighet for tog med tyngdepunkt på 2 meter. Det er således ingen barrierer mot at toget skal unngå å velte ved en slik hastighet. Tre av kurvene som er undersøkt ble ansett som kritiske, grunnet små kurveradier og skiltet hastighet på 130 km/h. Av disse var minste kurveradius på 294 m med tilhørende overhøyde på 150 mm. I denne kurven var største tyngdepunkt som kunne tillates uten fare for at tog kan velte dersom hastighetsskilt oversees $H = 1,678$ m.

Andre deler av infrastrukturen som ikke har vært undersøkt vil også kunne påvirke tillatt hastighet på strekningen. Både underbygningen, signalanlegget, planoverganger og stigninger/fall er eksempler på områder som burde undersøkes nærmere for å avgjøre om hastigheten kan økes.

Kilder

- ALTEREN, B., HOKSTAD, P., MOE, D. & SAKSHAUG, K. 2005. Møte- og utforkjøringsulykker i et barrierепerspektiv. . *SINTEF*. Trondheim.
- ANDERSEN, E. K. 2020. *Barrierestyring på jernbanen. En casestudie av berrierenes ytelse på Gjøvikbanen.* . Masteroppgave, Universitet i Stavanger.
- BANENOR. 2016. *Teknisk regelverk - 515 2012 Endringsartikkel 287* [Online]. Available: https://trv.banenor.no/wiki/515_2012_Endringsartikkel_287 [Accessed 12. april 2022].
- BANENOR. 2018. *Bane NORs innspill til jernbanesektorens Handlingsprogram for 2018-2029* [Online]. Available: <https://www.banenor.no/contentassets/3a02ae99cbe74505a59a6abb38aed223/bane-nors-innspill-til-handlingsprogram-15-02-2018.pdf> [Accessed].
- BANENOR. 2020a. *Bane NOR forklarer: ATC - Automatisk togkontroll.* [Online]. Available: <https://www.banenor.no/Nyheter/aktuelt/ATC--Automatisk-togkontroll/> [Accessed 08. februar 2022].
- BANENOR. 2020b. *System for automatisk hastighetsovervåkning / Automatic Train Control Systems* [Online]. Available: https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=vedlegg:system_for_automatisk_hastighetsovervaking [Accessed 2022 08. februar].
- BANENOR. 2021a. *Linjestigninger og fall/ Line Gradients* [Online]. Available: https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=vedlegg:linjestigninger_og_fall [Accessed 28. januar 2022].
- BANENOR. 2021b. *Teknisk regelverk - Overbygning/Prosjektering/Sporets trasé* [Online]. Available: https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporets_tras%C3%A9#Hastighet_i_stigning_2Fall_og_vertikalkurver [Accessed 13. desember 2021].
- BANENOR. 2021c. *Teknisk regelverk- Overbygning/Prosjektering/Generelle tekniske krav* [Online]. Available: https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Generelle_tekniske_krav [Accessed 12. januar 2022].
- BANENOR. 2022. *Aksellast/ Axle Load* [Online]. Available: <https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=vedlegg:aksellast> [Accessed 03. februar 2022].
- BANENOR. u.å. *Dovrebanen* [Online]. Available: <https://www.banenor.no/reisende/Banene/Dovrebanen/> [Accessed 28.januar 2022].
- BÅRDSTU, A. 2015. *På høygir for mer gods* [Online]. Available: <https://www.banenor.no/Om-oss/arkiv-jernbaneverket/Jernbanemagasinet-arkiv/Nyheter/mars-2015/Tettere-samarbeid-om-gods/> [Accessed 08. februar 2022].
- BERGQVIST, L., BRYNE, B., SALICATH, C-F. & WIGER, M. u.å. *Mulighetsstudie Dovre- og Raumabanen.*
- HANDSTANGER, A. C. T., ERIKSSON, B., FAGERJORD, M., MARTINSEN, O.J. & NORCONSULT AS. 2015. *Godstrafikk på jernbane* [Online]. Available: <https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/7ab4526560254e83990e80e0db59a64f/oslo-navet-godstrafikk-pa-jernbane-vedlegg-10a.pdf> [Accessed 13.desember 2021].
- JERNBANEDIREKTORATET. 2019. *Godsstrategi - NTP 2022-2033* [Online]. Jernbanedirektoratet. Available: <https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/strategier-og-utredninger/godsstrategi/godsstrategi---hovedrapport.pdf> [Accessed 28. januar 2022].

- JERNBANEDIREKTORATET. 2020a. *Jernbanen mot 2050* [Online]. Oslo: Jernbanedirektoratet. Available: https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/strategier-og-utredninger/perspektivanalyse_jernbanen_mot_2050-2020.pdf [Accessed 14. januar 2021].
- JERNBANEDIREKTORATET. 2021. *Jernbanedirektoratets begrepskatalog* [Online]. Oslo: Jernbanedirektoratet. Available: <https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/documenter/handboker/kapasitet-og-begrepskatalog/jernbanedirektoratets-begrepskatalog-2020-3-utgave.pdf> [Accessed 7. februar 2022].
- JERNBANEDIREKTORATET, B. N. 2020b. *Prioriteringer i jernbanesektoren* [Online]. Available: <https://www.regjeringen.no/contentassets/13a80858d58a47e1a23e944b7144ee9b/j-jernbanedirektoratet-og-bane-nor---prioriteringer-i-jernbanesektoren.pdf> [Accessed 13. desember 2021].
- JERNBANEKOMPETANSE. 2015. *Enkel innføring i boggikonstruksjon*. [Online]. Jernbaneverket. Available: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Enkel_innf%C3%B8ring_i_boggikonstruksjon [Accessed 11. januar 2022].
- JERNBANEKOMPETANSE. 2020. *Sporets trasé/Hastighetsberegninger* [Online]. Jernbanekompetanse. Available: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Sporets_tras%C3%A9/Hastighetsberegninger [Accessed 25. februar 2022].
- JERNBANEKOMPETANSE. 2021a. *Forelesningsvideoer for jernbanetekniske fag - Hastighetsberegning i kurver*. [Online]. Available: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Forelesningsvideoer_for_jernbanetekniske_fag [Accessed 12. januar 2022].
- JERNBANEKOMPETANSE. 2021b. *Sporets trasé/Sporgeometri* [Online]. Available: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Sporets_tras%C3%A9/Sporgeometri [Accessed 21. desember 2021].
- JERNBANEKOMPETANSE. 2021c. *Teknisk linjeføring* [Online]. Available: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Teknisk_linjef%C3%B8ring#Velting [Accessed 21. Desember 2021].
- JERNBANEVERKET. 2012. *Slik fungerer jernbanen* [Online]. Oslo: Jernbaneverket. Available: <https://www.banenor.no/contentassets/b9ade1303f42474eabf16099c7dd2182/slik-fungerer-jernbanen-versjon-191213.pdf> [Accessed 11. januar 2022].
- JERNBANEVERKET. 2016. *Godsstrategi for jernbanen 2016-2029* [Online]. Available: https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/strategier-og-utredninger/godsstrategi/jbv_godsstrategi_2016_trykk-1.pdf [Accessed 12. desember 2021].
- JERNBANEVERKET. u.å. *Godstransport på bane* [Online]. Available: https://www.banenor.no/contentassets/1953704ebb8a4ff380d2e0873ed0312a/godstransport_p_b_1720617a.pdf [Accessed 07. februar 2022].
- LINDAHL, M. 2001. Track geometry for high-speed railways: A literature survey and simulation of dynamic vehicle response.
- LIU, C., LIN, B., WANG, J., XIAO, J., LIU, S., WU, J. & LI, J. 2017. Flow assignment model for quantitative analysis of diverting bulk freight from road to railway. *PLOS ONE*.
- MELD.ST.20 2020-2021. Nasjonal transportplan 2022-2033. In: SAMFERDSELSDEPARTEMENT, D. K. (ed.).
- MILJØDIREKTORATET, E., STATENS VEGVESEN, KYSTVERKET, LANDBRUKSDIREKTORATET, NVE. 2020. *Klimakur 2030* [Online]. Available:

- <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1625/m1625.pdf> [Accessed 25. mars 2022].
- MJØSUND, C. S., PINCHASIK, D. R., GRØNLAND, S.E & HOVI, I. B. 2019. Nordiske virkemidler for overføring av godstransport fra veg til sjø og bane. Transportøkonomisk institutt.
- NIELSEN, K. 2017. *Standarder for kapasitetsplanlegging*. [Online]. Jernbanedirektoratet. Available: <https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/documenter/handboker/kapasitet-og-begrepskatalog/jernbanedirektoratets-standarder-for-kapasitetsplanlegging.pdf> [Accessed 27. januar 2022].
- NOU2001:09 2001a. 3 Bremsler i godstog. Spesifikasjoner, bruk og vedlikehold. In: BEREDSKAPSDEPARTEMENTET, J.-O. (ed.).
- NOU2001:09 2001b. 5 Bremsler. . In: BEREDSKAPSDEPARTEMENTET, J.-O. (ed.). Oslo.
- OSLOECONOMICS. 2018. *Konkurransanalyse av markedet for godstransport på jernbane* [Online]. Available: <https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/10bd4fb3ab4d45f2af36323e89d62487/konkurransanalyse-av-markedet-for-godstransport.pdf> [Accessed 03. februar 2022].
- PENG, Y. L., M. 2011. Calculation of Height Limit og Gravity Center of Loaded Wagon Based on Vertical Dynamic Load Coefficient.
- RAILTECO. 2018. *Y25 Bogie* [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/products/y25-bogie/> [Accessed 11. januar 2022].
- SCHEEL, H. 2021. *En storsatsing må til for å få mer gods på bane* [Online]. Available: <https://www.banenor.no/Nyheter/Nyhetsarkiv/2021/en-storsatsing-ma-til-for-a-fa-mer-gods-pa-bane/> [Accessed 21. desember 2021].
- SIKKERHETSSTYRINGSFORSKRIFTEN. 2014. *Forskrift om krav til sporvei, tunnelbane, forstadsbane m.m (kravforskriften)* [Online]. Available: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2014-12-10-1572/KAPITTEL_2#KAPITTEL_2 [Accessed 30. mars 2022].
- SPURKELAND, E. 2021. Intermodal transport. Store Norske Leksikon.
- WISTING, T. 2021. ATC. Store Norske Leksikon.
- ZHANG, D., CLARKE, D.B., PENG, Q., CAO, H & DONG, C. 2018. Effect of the combined centre of gravity on the running safety of freight wagons. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 57.
- ZHOU, H., ZHANG, J. & HECHT, M. 2014. Three-dimensional derailment analysis of crashed freight trains. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 51.

Vedlegg 1

Sikkerhetsvurdering mot velting for godstog ved kjøring i 120 km/t mellom Oslo-Trondheim.

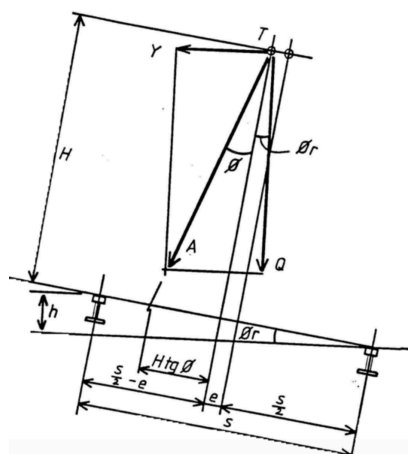
Dovrebanen går gjennom kupert terreng med store stigninger og krappe kurver. På strekningen som er undersøkt er det 174 kurver med radius under 300 m. Disse setter begrensninger for at godstog med høye tyngdepunkt kan kjøre i 120 km/. Mange steder er også overgangskurvene for korte til å øke hastighetene. Det er totalt 471 overgangskurver som ikke har tilstrekkelig lengde for kjøring i 120 km/t.

Innledning

Det er et overordnet politisk mål å danne en smart, bærekraftig og sikker transportsektor der utslippene er lave og mobiliteten høy. Jernbane regnes som en av de mest miljøvennlige trafikformene og derfor er det et mål å overføre mer gods fra vei til bane (1). For å lykkes med dette må kapasiteten i jernbanenettet utnyttes effektivt. Økte hastigheter vil føre til økt kapasitet, men også økt fare for at godstog kan velte og avspore.

Teori

Dersom hastigheten inn i en kurve er alt for stor vil vognens samlede tyngdepunkt forskyves utover i en avstand e fra sporets senterlinje (vist i figur 1) og toget velter om ytre skinne. For lastede godsvogner kan tyngdepunktet variere fra 1,0 – 3,0 m og veltefaren er større jo høyere tyngdepunktet ligger (2).



Figur 1: Vognkassens tyngdepunkt forskyves utover i kurve med stor hastighet. Hentet fra Jernbanekompetanse (2021).

Jernbanesektoren forholder seg til sikkerhetsstyringsforskriften. Denne sier at:

«Jernbanevirksomheten skal ha barrierer som reduserer sannsynligheten for at feil, fare- eller ulykkessituasjoner utvikler seg. Barrierer skal begrense mulige skader og ulemper (3)».

Automatisk togkontroll (ATC) er et eksempel på en funksjonsbarriere som er aktiv, uten at den krever inngripen av fører. Fartsgrenseskilt langs jernbanetraseen er eksempel på en varslende barriere. Disse krever at føreren gjør en fortolkning slik at barrieren fungerer etter hensikten.

Metode

Det er brukt Microsoft Excel for å analysere alle kurvene på Dovrebanen nord for Eidsvoll i retning Trondheim. Det er undersøkt hvilke kurver som hadde velte hastighet større eller lik 120 km/h for godstog med tyngdepunkt på 1,75 og 2 meter, og om overgangskurvene hadde tilstrekkelig lengde for å kjøre i 120 km/h. Avslutningsvis ble det undersøkt hvilke kurver som var mest kritiske og hvor mange barrierer det fantes i disse områdene.

Resultat

For godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter vil 44 av kurvene sette begrensninger for kjøring i 120 km/t. For godstog med tyngdepunkt opp mot 2 meter vil det i 175 av kurvene ikke være forsvarlig å kjøre i 120 km/h, uten at det er fare for at toget velter. Resultatene viser at kurver med radius ≤ 262 m ikke tillater kjøring i 120 km/t for godstog med tyngdepunkt på 1,75 meter. Kurver med radius ≤ 300 m tillater ikke at godstog med tyngdepunkt på 2 meter kjører i 120 km/h. For kurver med radius lik 301 m tillates ikke 120 km/h dersom tilhørende overhøyde er < 115 mm. For 2 av kurvene som ble undersøkt er skiltet hastighet større enn maksimal velte hastighet for tog med tyngdepunkt på 2 meter. Tre av kurvene som er undersøkt ble ansett som kritiske, grunnet små kurveradier og skiltet hastighet på 130 km/h. Av disse var minste kurveradius på 294 m med tilhørende overhøyde på 150 mm. I denne kurven var minste tyngdepunkt som kunne tillates uten fare for at tog kan velte dersom hastighetsskilt oversees $H = 1,678$ m.

Kilder:

- (1) JERNBANEDIREKTORATET. 2020a. *Jernbanen mot 2050* [Online]. Oslo: Jernbanedirektoratet. Tilgjengelig fra: https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/strategier-og-utredninger/perspektivanalyse_jernbanen_mot_2050-2020.pdf [Hentet 14. januar 2021].
- (2) JERNBANEKOMPETANSE. 2021. *Teknisk linjeføring* [Online]. Tilgjengelig fra: https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Teknisk_linjef%C3%B8ring#Velting [Hentet 29. April 2021].
- (3) SIKKERHETSSTYRINGSFORSKRIFTEN. 2014. *Forskrift om krav til sporvei, tunnelbane, forstadsbane m.m (kravforskriften)* [Online]. Tilgjengelig fra: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2014-12-10-1572/KAPITTEL_2#KAPITTEL_2 [Hentet 30. mars 2022].