

Effekten av stigningsgrad på jernbanekapasitet

En parameterstudie

Dina Sofie Hanninen Eggum

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Elias Kassa, IBM

Medveileder: Anne Christine Torp Handstanger, IBM
Alf Helge Løhren, Bane NOR

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Effekten av stigningsgrad på jernbanekapasitet: En parameterstudie	Dato: 10.06.2017 Antall sider (inkl. bilag): 178
	Masteroppgave <input checked="" type="checkbox"/> Prosjektoppgave <input type="checkbox"/>
Navn: Dina Sofie Hänninen Eggum	
Faglærer/veileder: Elias Kassa	
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Anne Christine Torp Handstanger og Alf Helge Løhren	

Ekstrakt:

Stigningsgraden på en jernbanestrekning påvirker akselerasjons- og bremseegenskapene til et tog. Denne oppgaven studerer en økt stigningsgrad i form av avvik fra normalkravene på 12,5‰ gitt i Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» og konsekvensen av dette for kapasiteten på strekningen.

Det er utført et litteraturstudie for å identifisere kapasitetspåvirkende parametere. Syv av de identifiserte parametere er valgt ut for kapasitetsstudier, og stigningsgraden er inkludert som en aktuell parameter. For å fastsette midlere minste togfølgetid og den teoretiske kapasiteten på strekningen er det bygget en infrastrukturmodell av en dummy-strekning i et mikroskopisk dataverktøy (LUKS). De syv utvalgte analyseparametere er implementert i infrastrukturmodellen, der unike kombinasjoner av parametere er studert. For å identifisere hvilke av de syv analyseparametere som har størst påvirkning på kapasiteten, og for å analysere om det eksisterer betydelige interaksjonseffekter mellom parametere, er det gjennomført et parameterstudie. Det statistiske forskningsdesignet *two level full factorial design* med midlere minste togfølgetid som responsverdi er benyttet for å identifisere de dominerende parametere.

Parametere togmiks og strekningslengde, samt interaksjonen mellom togmiks og strekningslengde er identifisert som dominerende. Stigningsgraden har ingen synlig effekt på kapasiteten, verken alene eller i kombinasjon med øvrige analyseparametere. De teoretiske sammenhengene fra infrastrukturmodellen og parameterstudiet er studert ved et casestudie med en jernbanestrekning i konstant stigning. Det oppstår et kapasitetstap på ett tog per time sammenliknet med en referansestrekning fra de gjennomførte analysene, og et konstant kjøretidstap for godstog på strekningen. Det konkluderes med at stigningsgraden på analysestrekningen har en relativt liten påvirkning på kapasiteten på strekningen, men påvirker andre elementer.

Stikkord:

1. Jernbanekapasitet
2. Minste togfølgetid
3. Stigningsgrad
4. Parameterstudie
5. Full factorial design

(sign.)

Forord

Denne avsluttende masteroppgaven er skrevet av Dina Sofie Hänninen Eggum ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven er skrevet i løpet av vårsemesteret 2017, og tilsvarer 30 studiepoeng.

Masteroppgaven er todelt og består av en prosessrapport og en vitenskapelig artikkel. Temaet for oppgaven er sammenhengen mellom vertikal linjeføring for en jernbanestrekning og kapasiteten på strekningen. Oppgavens formål er å avgjøre om stigningsgraden på en jernbanestrekning har en dominerende påvirkning på kapasiteten på strekningen.

Prosessrapporten utgjør første del av oppgaven, og vil fungere som en «teoretisk overbygning» for den vitenskapelige artikkelen. Prosessrapporten redegjør for arbeidet i forbindelse med masteroppgaven. I samråd med veiledere for oppgaven ble det bestemt at oppsettet på prosessrapporten skal gjenspeile hva som er lagt til grunn for analysene og dermed resultatene som presenteres i den vitenskapelige artikkelen. Den vitenskapelige artikkelen utgjør andre del av oppgaven, og er planlagt å sendes inn til «1st International Railway Symposium Aachen» i november 2017. Artikkelen er basert på arbeidet som er presentert i prosessrapporten.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder Elias Kassa ved Institutt for bygg- og miljøteknikk (NTNU) for veiledning og utarbeidelse av et metodisk opplegg for denne masteroppgaven, samt gode innspill og tilbakemeldinger i arbeidet med den vitenskapelige artikkelen.

En stor takk til medveileder Anne Christine Torp Handstanger ved Norconsult/NTNU for hjelp med arbeidet i LUKS og faglig støtte og diskusjoner gjennom hele prosessen, samt gode innspill ved ferdigstillelse av oppgaven.

Videre vil jeg takke medveileder Alf Helge Løhren ved Bane NOR for faglige diskusjoner, gode innspill og kontakt med Bane NOR gjennom hele arbeidsprosessen.

Til slutt ønsker jeg å rette en stor takk til familie og venner for støtte og hjelp, og ikke minst kontor 2-276 for oppmuntring, dans og diskusjoner underveis.

Trondheim, juni 2017



Dina Sofie Hänninen Eggum

Sammendrag

Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» setter føringer for maksimal tillat stigningsgrad på en jernbanestrekning. Normalkrav for vertikal stigningsgrad på en strekning med blandet trafikk er 12,5%, mens ved bruk av minstekrav kan det tillates en stigningsgrad på 20% dersom lengden begrenses til 3 km. Kravene er satt for å unngå flaskehals på strekningen, der stigningsgraden påvirker både akselerasjonsegenskapene og bremseegenskapene til toget. Denne oppgaven studerer en økt stigningsgrad i form av avvik fra normalkravene fra «*Tekniske Regelverk*» og konsekvensen av dette for kapasiteten på strekningen.

Det er utført et litteraturstudie for å identifisere kapasitetspåvirkende parametere. Syv parametere er valgt ut for videre studier, og stigningsgraden er inkludert som en aktuell parameter. For å fastsette midlere minste togfølgetid og den teoretiske kapasiteten på strekningen er det bygget en infrastrukturmodell av en dummy-strekning i et mikroskopisk dataverktøy (LUKS). Dummy-strekningen representerer en dobbeltsporet jernbanestrekning med grunnleggende infrastrukturelementer, og strekningen er trafikkert med to ulike togslag. De utvalgte analyseparameterne er implementert i infrastrukturmodellen, der unike kombinasjoner av parameterne er studert. Det er benyttet en deterministisk prosess for å undersøke den faktiske påvirkningen av parameterne på kapasiteten, der kapasitet defineres som antall tog som kan passere en strekning per time. Kapasiteten bestemmes ved togfølgetider.

For å identifisere hvilke av de syv analyseparameterne som har størst påvirkning på kapasiteten, og for å analysere om det eksisterer betydelige interaksjonseffekter mellom parameterne, er det gjennomført et parameterstudie. Det statistiske forskningsdesignet *two level full factorial design* er benyttet for å identifisere de dominerende parameterne. Hver av de syv utvalgte analyseparameterne er studert på to nivåer. Dette resulterte i $2^7=128$ analysevarianter. Outputverdien fra infrastrukturmodellen i LUKS er minste togfølgetid, som blir lest ut fra blokktrappene ved hver modellkjøring. Siden modellstrekningen trafikkeres med ulike togslag er minste togfølgetid beregnet om til midlere minste togfølgetid. Det er benyttet en rutetabelluavhengig beregningsmetode. Midlere minste togfølgetid er benyttet som responsverdi i forskningsdesignet.

Parameterstudiet avdekket hovedeffektene til parameterne strekningslengde, togmiks og til en viss grad hastighetsprofil og togtype til å ha mest påvirkning på kapasiteten på analysestrekningen. Stigningsgraden har ingen synlig effekt, verken alene eller i kombinasjon med øvrige parametere. Resultatene er sensitive for valg av nivåer i forskningsdesignet. Det er derfor gjennomført en sensitivitetsanalyse for analyseparameteren togmiks, som identifiserte parameterne togmiks og strekningslengde, samt interaksjonen mellom togmiks og strekningslengde som dominerende. De teoretiske sammenhengene fra infrastrukturmodellen og parameterstudiet er studert ved et casestudie med en jernbanestrekning i konstant stigning. Det oppstår et kapasitetstap på ett tog per time sammenliknet med en referansestrekning fra de gjennomførte analysene, og et konstant kjøretidstap for godstogene som følge av at de ikke når sin maksimale hastighet på strekningen. Det konkluderes med at stigningsgraden på analysestrekningen har relativt liten påvirkning på kapasiteten, men påvirker andre elementer.

Summary

The Norwegian national railway regulations states that the standard requirements for the vertical gradient on a railway line with mixed traffic is 12,5‰. The maximum allowed gradient on such a line is 20‰. For the 20‰ gradient, the length of the gradient is restricted to a maximum 3 km. These requirements are set to avoid bottlenecks on the line, where the gradient affects the accelerating and breaking characteristics of the trains. This study investigates the consequences of deviating from the standard requirements of 12,5‰ in terms of capacity.

Parameters that are expected to have an impact on the rail line capacity have been identified through a literature review. Seven parameters are selected for parameter investigation, where the gradient is included as a parameter of interest. An infrastructure model of a dummy section of a rail line is built in a microscopic software tool (LUKS) to calculate the mean minimum headway time and the theoretical capacity of the section. The dummy section represents a double track line with basic infrastructure elements, and is operated with two different train types. The selected parameters have been implemented in the infrastructure model, where different combinations of the parameters are studied. A deterministic process is used to investigate the actual influence of multiple parameter on the capacity. In this study, capacity is regarded as number of trains passing a rail stretch per hour and is measured by headway times.

In order to identify the parameters with the highest influence on capacity, and to analyze if there exist significant interaction effects of multiple parameters, a parameter study has been conducted. Design of Experiment methodology with full factorial design at two levels has been used to study these relationships and to identify the dominant parameters. Each of the seven analysis parameters have been studied at two levels, which resulted in $2^7=128$ analysis scenarios. Minimum headway time from the infrastructure model is measured from the blocking time stairways for each scenario. The mean minimum headway time is calculated based on timetable independent approach and used as a response in the full factorial design.

The full factorial analysis identified the main effects of the parameters section length, train mix and to some extent speed profile and train type to have the most significant impact on the capacity of the studied section. The main effect of the gradient does not have a distinct effect on the capacity of the railway section, neither as single parameter nor in combination with the other studied parameters. The results are sensitive to the chosen levels of each parameter in the full factorial design. Based on this, a sensitivity analysis has been conducted, concerning the analysis parameter train mix. The sensitivity analysis identified the train mix and section length and the two-factor interaction effect between the train mix and the section length as the most dominant parameters. To investigate the theoretical relationships found from the infrastructure model and the parameter study, a case study has been conducted. The case study considered a railway section in constant incline. A capacity loss of one train per hour was observed compared to a reference scenario from the existing analysis, and there is a constant driving time loss for freight trains due to the fact that they don't reach their maximum speed. Thus, the gradient on the line does not have a distinct impact on the capacity on the section, but may influence on other aspects.

Innholdsfortegnelse

FORORD	I
SAMMENDRAG	III
SUMMARY	V
DEFINISJONER OG FORKORTELSER	XIII
DEL I: PROSESSRAPPORT	1
1. INNLEDNING	3
1.1 BAKGRUNN.....	3
1.2 STATE OF THE ART	6
1.3 FORMÅL OG PROBLEMSTILLING.....	7
1.4 OPPGAVENS OPPBYGNING	8
2. LITTERATURGJENNOMGANG	1
2.1 TEORETISK RAMMEVERK.....	1
2.2 STATE OF THE ART – EKSISTERENDE FORSKNING	24
3. METODE	29
3.1 LITTERATURSTUDIE	29
3.2 INFRASTRUKTURMODELL OG ANALYSEVARIANTER	30
3.3 ANALYSE OG PARAMETERSTUDIE.....	31
3.4 CASESTUDIE FOR Å UNDERSØKE FUNN FRA LUKS	34
3.5 VURDERING AV METODE	35
4. PLANLEGGING OG GJENNOMFØRING	37
4.1 IDENTIFISERTE PARAMETERE	37
4.2 OPPBYGGING AV INFRASTRUKTURMODELLEN.....	45
4.3 ANALYSE OG PARAMETERSTUDIE.....	58
4.4 CASESTUDIE.....	71
5. RESULTATER	76
5.1 PARAMETERSTUDIE.....	76
5.2 DRØFTING OG UTDYPING AV RESULTATENE	78
5.3 SENSITIVITETSANALYSER.....	80
5.4 CASESTUDIE.....	85
5.5 OPPSUMMERING AV RESULTATER	86
6. DISKUSJON	87
6.1 VURDERING AV RESULTATER.....	87
6.2 FORVENTINGER TIL RESULTATER I FORHOLD TIL KJENT TEORI.....	90
6.3 SAMMENLIKNING MED EKSISTERENDE FORSKNING.....	93
6.4 SVAKHETER OG BEGRENSNINGER.....	95
7. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID	97
7.1 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON.....	97
7.2 VIDERE ARBEID.....	98
8. AVSLUTNING	100
9. KILDER	102

DEL II: VITENSKAPELIG ARTIKKEL	1
1 INTRODUCTION.....	3
2 LITERATURE REVIEW.....	5
3 MODEL DESCRIPTION.....	6
4 PARAMETER STUDY.....	9
4.1 PARAMETERS TO BE STUDIED.....	9
4.2 ANALYSES OF PARAMETERS.....	11
5 RESULTS AND DISCUSSION.....	11
6 CASE STUDY	14
7 CONCLUSION	16
ACKNOWLEDGMENT	16
AUTHORS.....	16
REFERENCES:	17
VEDLEGG.....	A

Figurliste for prosessrapport

Figur 1: Kraftoverføring mellom drivhjul og skinne.....	3
Figur 2: Prinsipp for en trekkraftkurve.....	4
Figur 3: Prinsippskisse av stigningsmotstand.....	6
Figur 4: Prinsippskisse for forholdet mellom spesifikk trekkraft (f) og spesifikk grunnmotstand (w_0) for gods- og persontog	8
Figur 5: Parametere som påvirker kapasiteten på en jernbanestrekning.....	10
Figur 6: Sammenheng mellom teoretisk og praktisk kapasitet.....	12
Figur 7: Sammenheng kapasitet og ventetid illustrert i et ventetidsdiagram	13
Figur 8: Sammenheng mellom punktlighet og kapasitetsutnyttelse	14
Figur 9: Blandet trafikk på en jernbanestrekning	15
Figur 10: Prinsippskisse av 3-aspekts signalering.....	17
Figur 11:Elementer som inngår i BT	19
Figur 12: Blokktrapper og MT for etterfølgende tog i og j.....	20
Figur 13: Elementer i en togbevegelse.....	21
Figur 14: Tilnærming av hastighetskurve for kjøretidsberegninger ved Δv eller Δs ..	22
Figur 15: Sammenhengen mellom MT og hastighet på en strekning.....	23
Figur 16: Prosess for gjennomføring av metode.....	29
Figur 17: Nivåer og linearitet for 2^n FFD	36
Figur 18: Oppbygging av infrastrukturmodellen	46
Figur 19: Modellstrekning i LUKS (stasjonsgrenser, profilnumre (km) og signaler) ..	48
Figur 20: Oversikt over maler fra LUKS og stasjonsgrenser.....	49
Figur 21: Blokkklengder for ulike hastigheter og fall	50
Figur 22: Flying start for persontog BM74. Innstillinger fra LUKS	52
Figur 23: Hastighetsdiagram for flying start for persontog BM74.....	53
Figur 24: Analysestrekningen fra hoved utkjøringssignal til hoved innkjøringssignal	56
Figur 25: Avlesning av minste togfølgetid fra blokktrapper i LUKS	57
Figur 26: Gjennomføring av analysene.....	59
Figur 27: Hastighetsdiagram for persontoget (ICE) fra analysevariant S58.....	65
Figur 28: Hastighetsdiagram for godstoget fra analysevariant S58	65
Figur 29: Tangerende blokktrapper for persontog etterfulgt av godstog	66
Figur 30: Tangerende blokktrapper for godstog etterfulgt av persontog	66
Figur 31: Tangerende blokktrapper for godstog etterfulgt av godstog	68
Figur 32: Tangerende blokktrapper for persontog etterfulgt av persontog.....	68

Figur 33: Eksisterende trasé mellom Lågheller og Mjølfjell, Bergensbanen	71
Figur 34: Alternativ trasé mellom Lågheller og Mjølfjell (prinsippskisse).	72
Figur 35: Prinsippskisse for høydeutvikling for casestrekningen	73
Figur 36: Hastighetsdiagram for godstog på referansestrekningen	75
Figur 37: NPP for hoved- og samspillseffekter	77
Figur 38: Stolpediagram for hoved- og samspillseffekter.....	77
Figur 39: NPP og stolpediagram for Sens. 1	81
Figur 40: NPP og stolpediagram for Sens. 2	82
Figur 41: NPP og stolpediagram for Sens. 3	83
Figur 42: Hastighetsdiagram godstog i kontinuerlig stigning på casestrekningen.....	85
Figur 43: Hastighetsdiagram persontog i kontinuerlig stigning på casestrekningen .	85

Tabelliste for prosessrapport

Tabell 1: Største bestemmende stigning/fall (‰).....	4
Tabell 2: Største absolutte stigning/fall (‰).	5
Tabell 3: Total kjøremotstand	5
Tabell 4: Utnyttelsesgrader praktisk kapasitet.	12
Tabell 5: Elementer som inngår i BT	18
Tabell 6: Nivåinndeling for analyseparametere.....	32
Tabell 7: Designmatrise (DM)	32
Tabell 8: TCC (Table of contrast coefficient)	33
Tabell 9: Beregning av hoved- og samspillseffekter	34
Tabell 10: Redegjørelse for parametere som ikke er inkludert i parameterstudiet....	44
Tabell 11: Egenskaper for tog som trafikkerer strekningen i infrastrukturmodellen ..	55
Tabell 12: Analyseparametere med tilhørende to nivåer	60
Tabell 13: Beskrivelse av analyseparameterens nivåer, nivå 1 (+1).....	61
Tabell 14: Beskrivelse av analyseparameterens nivåer, nivå 2 (-1).....	61
Tabell 15: Designmatrise (DM) med analyseparametere og interaksjoner	62
Tabell 16: Karakteristikker for analysevariant S58.....	64
Tabell 17: Nivåer for parameter X1 – togmiks	70
Tabell 18: Karakteristikker for referansestrekning til casestudiet.....	74
Tabell 19: Sammenlikning av stigningsgradens effekt med de dominerende parametere	78

Tabell 20: Absolutt lavest og høyest kapasitet for samtlige 128 analysevarianter med tilhørende MMT	78
Tabell 21: Karakteristikker for analysevariant med lavest kapasitet	78
Tabell 22: Karakteristikker for analysevariant med høyest kapasitet	79
Tabell 23: Lavest og høyest kapasitet og antall forekomster for samtlige analysevarianter	79
Tabell 24: Kapasitetstall for sensitivitetsanalysene og basistilfellet	84
Tabell 25: Utvikling av samspillseffekten mellom X1X2X3.....	84
Tabell 26: Kapasitetstall, MMT og kjøretid for casestudiet sammenliknet med referansetrekingen.....	86

Figurliste for vitenskapelig artikkel

Figure 1: A sketch of the infrastructure model. Screenshot from LUKS.....	8
Figure 2 Principle of blocking time model and minimum headway time.....	8
Figure 3: A normal probability plot of the estimated main- and interaction effects....	12
Figure 4: A bar chart of the estimated main- and interaction effects.....	12
Figure 5: Development in block sections from speeds and gradients	14
Figure 6: Velocity diagram for the freight train in the case study	15

Tabelliste for vitenskapelig artikkel

Table 1: Train characteristics.....	7
Table 2: Analysis parameters at two levels.....	10
Table 3: Principled design of a 2^7 - design matrix with interactions of parameters ...	11
Table 4: Characteristics of the reference scenario from the parameter study.....	15
Table 5: Results from the case study	15

Definisjoner og forkortelser

I dette kapitlet defineres begrep og forkortelser for oppgaven. Først presenteres teoretiske begrep som er vesentlige for denne oppgaven. De teoretiske begrepene utdypes i den teoretiske gjennomgangen i kapittel 2. Videre presenteres begrep i forbindelse med infrastrukturmodellen. Modellen er bygget i LUKS, som har engelsk språk som oppbygning. Det er derfor brukt de engelske begrepene skrevet i kursiv for de ulike innstillingene som er gjort. Betydningen defineres her. Til slutt presenteres forkortelser som vil benyttes gjennom oppgaven. Øvrige forkortelser og parametere beskrives der de opptrer.

Stigningsgrad: Samlebetegnelse for vertikale tangenter og klassifiseres ut fra stigning eller fall. En positiv stigningsgrad betegnes som stigning, og en negativ stigningsgrad som fall

Bane NORs «Tekniske Regelverk» (TR): Samlebetegnelse for normaler innenfor de ulike jernbanetekniske fagområder, og er et viktig styringsverktøy og hjelpemiddel ved utforming, bygging og dimensjonering av jernbaneanlegg (Bane NOR, 2017b).

LUKS: *Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken – analysis of lines and junctions.* Dataverktøy som benyttes for å bygge infrastrukturmodellen i oppgaven.

Strekning: Del av en linje der trafikk sammensetningen og antall tog, samt infrastrukturen og signaleringen ikke varierer fundamentalt.

Kjøretid: Tiden et tog bruker på å kjøre gjennom analysestrekningen som er definert mellom hoved utkjøringssignal og hoved innkjøringssignal.

Kapasitet: Den teoretiske kapasiteten på en jernbanelinje, definert som antall tog som kan passere en strekning per time. Angitt som tog/time.

Kapasitetstall: Tog/time

Minste togfølgetid (MT): Den minste tidsavstanden som kan opprettholdes mellom to tog slik at det andre toget på en betryggende måte kan kjøre med maksimal hastighet (Skartsæterhagen, 1993). Forkortelsen MT benyttes i teksten.

Midlere minste togfølgetid (MMT): Togfølgetiden når flere ulike togslag trafikkerer strekningen. Vektet MT med sannsynligheten for at tog i følger tog j . Forkortelsen MMT benyttes i teksten.

Kjøremotstand: Krefter som virker på toget mot bevegelsesretningen.

Stigningsmotstand: Tyngdekomponent mot bevegelsesretningen. Komponenten er positiv for stigning og negativ for fall.

Blokkstrekning og blokk lengde: Strekningen mellom to hovedsignaler.

Blocking time (BT): Tidsintervallet en del av en strekning er utelukkende tildelt én togbevegelse, og derfor blokkert for alle andre togbevegelser.

Blokktrapp: (*Blocking time stairway*). En graf i et tid-distanse-diagram som viser BT for alle blokkstrekninger et tog passerer.

Supplement: Differansen mellom planlagt kjøretid og den minste kjøretiden på strekningen.

Full factorial design (FFD): Statistisk forsøksdesign.

Designmatrise (DM): En designmatrise viser en oversikt over alle mulige kombinasjoner av høyt og lavt nivå for hver analyseparameter.

Route/signal liberation quipment: (*RLE/SLE*). Et infrastrukturelement som refererer til det punktet toget må ha passert før togveien eller signalet frigis i bakkant.

Ascending: Retning for å representere stigning på strekningen.

Descening: Retning for å representere fall på strekningen.

ETCS: *European Train Control System*. ETCS er en del av ERTMS (European Rail Traffic Management System), som er et felles, europeisk signalanlegg for jernbanen. ETCS er hastighetsovervåkning og signalering.

Flying start: Togene entrer og forlater analysestrekningen i sin maksimale hastighet.

LDFT og LDPT: *Long distant freight train* (Fjerntog – gods) og *Long distant passenger train* (Fjerntog – person)

Forkortelser

TR	Bane NORs « <i>Teknisk Regelverk</i> »
MT	Minste togfølgetid
MMT	Midlere minste togfølgetid
BT	Blocking time
BTM	Blocking time model
FD	Factorial design
FFD	Full factorial design
2ⁿ FFD	Two level full factorial design
DM	Designmatrise
NPP	Normal probability plot
Sens. X	Sensitivitetsanalyse
TSI	<i>Technical specifications for interoperability</i>
UIC	<i>Union International Chemins de Fer</i> (international union of railways)

**Del I:
PROSESSRAPPORT**

1. Innledning

Innledningen presenterer først bakgrunnen for masteroppgaven. Videre presenteres et sammendrag av eksisterende forskning i kapitlet *State of the Art*, etterfulgt av formålet med masteroppgaven med problemstilling og forskningsspørsmål. Neste del omhandler hvilke avgrensninger som er gjort for å besvare problemstillingen. Til slutt i kapitlet beskrives oppgavens videre oppbygning, med en oversikt over vedlagte dokumenter.

1.1 Bakgrunn

Befolkningsvekst og økonomisk vekst medfører økt transportbehov. Total transportvekst for persontransport er ventet å øke med 40% fram mot 2050, og tilsvarende 80% for godstransport (Jernbaneverket, 2015a).

God mobilitet og effektiv transport påvirker samfunnsutviklingen, og er viktige bidrag til økonomisk vekst og velferd (Meld. St. 33 (2016–2017)). Videre står transportsektoren for en stor andel av klimagassutslippene, og sektoren har følgelig et stort miljøansvar. Grunnlagsdokumentet for Nasjonal Transportplan 2018-2029 (Meld. St. 33 (2016–2017)) legger til grunn at god mobilitet skal opprettholdes, men forutsetter at mobiliteten skal være klimavennlig. Strategier for å redusere klimagassutslipp fra transportsektoren er blant annet satsing på kollektivtrafikk og overføring av gods fra veg til bane. I følge Jernbaneverkets perspektivanalyse *Jernbanen mot 2050* (Jernbaneverket, 2015a) er det forventet en vekst i persontransport med jernbane på om lag 170% i byområdene Oslo, Trondheim, Bergen og Stavanger fram mot 2050. For godstransport er det anslått en vekst på nær 90%. Videre vil Stortingets nullvekstmål for biltrafikken i storbyområdene være premissgivende for utviklingen av jernbanen. For godstransporten stilles det krav til økt pålitelighet og redusert kjøretid for at jernbanetransporten skal styrkes i årene framover. Grunnlagsdokumentet for Nasjonal Transportplan 2018-2029 (Meld. St. 33 (2016–2017)) sier at transportetatene vil videreutvikle et effektivt og framtidsrettet jernbanenett. I disse dager er det derfor stor aktivitet tilknyttet prosjektering og planlegging av jernbane i Norge.

Utforming, dimensjonering og bygging av nye jernbanelinjer, samt ombygging av eksisterende jernbanelinjer utføres i tråd med spesifikasjoner gitt i Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» (TR). TR er et styringsverktøy, og samler normaler innenfor de ulike jernbanetekniske fagområdene (Bane NOR, 2017b).

Ved prosjektering, bygging og vedlikehold av jernbanelinjer følges en rekke regler som klassifiseres som myndighetskrav, krav, anbefalinger og mulighet/alternative løsninger. Hver klasse har sitt modale hjelpeverb som skal bistå til å tolke hvordan reglen skal brukes. Det vises til TR for tolkning av regler (Bane NOR, 2017a).

TR baserer seg på krav om samtrafikkevne (interoperabilitet). Dette er internasjonale krav fra *European Union Agency for Railways*, og kalles for *Technical specifications for interoperability* (TSI). TSI-kravene skal sikre interoperabilitet på det Europeiske jernbanenettet, både for høyhastighetslinjer og konvensjonelle linjer (European Union Agency for Railways, 2017). Ved prosjektering, bygging og vedlikehold etter krav gitt i TR er også relevante TSI-krav oppfylt.

Videre har prosjekteringstabellene i TR normalkrav og minstekrav. Ved prosjektering av nye jernbanelinjer er det normalkravene som betegner Bane NORs standardkrav. Unntaksvis kan det likevel tillate en lavere traséstandard for å unngå uforholdsmessig store investeringer. Det er da mulighet for å benytte minstekrav (Bane NOR, 2017c).

Tabell 1 og Tabell 2 viser prosjekteringstabeller for vertikalgeometri fra TR (Bane NOR, 2017c). Tabellene viser normal- og minstekrav for største bestemmende og største absolutte stigning/fall, der stigning og fall refererer til henholdsvis positiv og negativ stigningsgrad i traséen (Chandra og Agarwal, 2013, s. 203-206). Stigning og fall betegnes som bestemmende eller absolutt. TR definerer bestemmende stigning/fall slik:

Bestemmende stigning/fall er det fall i promille som beregnes ved å forbinde to punkter i strekningens lengdeprofil med innbyrdes avstand lik 1000 m med en rett linje. For en lengre strekning er det bestemmende fall/stigning den største verdien som fremkommer på en vilkårlig kilometer langs strekningen med denne beregningen.

(Bane NOR, 2017c)

Ved store stigninger eller fall over en kort strekning kan man angi sporets absolutte stigning/fall istedenfor det bestemmende. Absolutt stigning eller fall kan betegnes som den *reelle* stigningsgraden i sporet.

Tabell 1: Største bestemmende stigning/fall (%). Gjengitt fra Bane NOR (2017c)

	Baner med blandet trafikk	Persontrafikkbaner
Normale krav	12,5	20
Minstekrav	20 ¹	25

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

Tabell 2: Største absolutte stigning/fall (%). Gjengitt fra Bane NOR (2017c)

	Baner med blandet trafikk	Persontrafikkbaner	Sidespor
Normale krav	20	25	30
Minstekrav	30 ¹	35	35

¹ For å hindre at et helt godstog blir stående i maksimal stigning tillates ikke stigning over 20% i sammenhengende lengde på mer enn 300 meter

Tabell 1 og Tabell 2 danner grunnlaget for masteroppgaven, da det i forbindelse med prosjektering av jernbanelinjens vertikalgeometri er stilt spørsmål ved formuleringer i TR som omhandler bruk av minstekravet for stigningsgrad. Spørsmål har blitt stilt om hva konsekvensen av avvik fra normalkravene vil medføre, særlig med tanke på kapasiteten på strekningen, robusthet og kjøretid, men også i forbindelse med kostnader for operatører og infrastrukturforvalter (Bane NOR). Ved prosjektering av vertikalgeometrien ser man av Tabell 1 at det ved bruk av minstekravet for baner med blandet trafikk må gjøres en inngående vurdering. Det er imidlertid ikke utarbeidet retningslinjer for hva denne vurderingen skal inneholde. Det er viktig at vurderingen tar hensyn til at godstog vil ha vanskeligheter med å overvinne en stor stigning, og at bremselengdene til togene øker ved fall (Lindahl, 2001). Ved avvik fra normalkravene må det planlegges slik at det ikke oppstår en flaskehals på strekningen ved at for eksempel godstog blokkerer strekningen lenge som følge av økt stigning.

Norge er et kupert land med høye fjell og bratte daler. Det er derfor sannsynlig at normalkravene i TR må avvikes. Det kan for eksempel være en økonomisk besparelse for infrastrukturforvalter å følge terrenget i størst mulig grad, da tunneller og fyllinger kan unngås. En større stigningsgrad på strekningen kan også føre til en innkorting av strekningen. I Norge trafikkeres jernbanestrekningene med blandet trafikk. Dette vil ifølge Lindahl (2001) være et kapasitetsproblem på grunn av ulike gjennomsnittshastigheter og kjøretider. Ved å planlegge en brattere strekning kan resultatet bli større forskjeller, og kreve større tidsluker mellom etterfølgende tog.

Denne oppgaven tar for seg hva konsekvensen av økt stigningsgrad og avvik fra normalkravene er for kapasiteten på strekningen. Kapasitet på en jernbanestrekning kan betraktes som et generelt mål på ytelsen til jernbanen, og en god utnyttelse av infrastrukturen er ifølge Abril et al. (2008) viktig for å kunne tilby et transportsystem med høy kvalitet. Utbygging av jernbane er en svært kostnadskreven prosess, og det er derfor viktig å utnytte tilgjengelig infrastruktur på en mest mulig effektiv måte. Ved planlegging av nye linjer bør man også ta hensyn til fremtidig transportbehov, ved å planlegge for økt trafikk og kapasitetsbehov. En nøye vurdering av stigningsgraden på strekningen er derfor nødvendig for en helhetlig planlegging av jernbanelinjen.

1.2 State of the Art

Dette kapitlet presenterer et utdrag av teori og eksisterende forskning fra kapittel 2. Utdraget inkluderes i innledningen for å gi en bakgrunn for problemstillingen og formålet med oppgaven som presenteres i kapittel 1.3.

Det er grunn til å tro at den vertikale stigningsgraden til en jernbanestrekning og kapasiteten på strekningen har en sammenheng. Det er imidlertid gjort lite forskning med hensyn å belyse dette temaet. Andre studier har tatt for seg ulike parametere som påvirker kapasiteten, men stigningsgraden er ikke inkludert som en aktuell parameter (Abril et al., 2008, Krueger et al., 1999). Vertikal linjeføring har blitt studert med hensyn på energiforbruk (Kim et al., 2013), og det er forventet at stigningsgraden vil ha betydning for bygge- og driftskostnadene i tilknytning til jernbanestrekningen. En uheldig stigningsgrad kan medføre fremtidige driftsproblemer, som begrensninger i godstransporten og gi kapasitetstap (Bababeik og Monajjem, 2012). En stor positiv stigningsgrad kan resultere i treg akselerasjon for godstog, slik at de blokkerer strekningen lenge, noe som kan påvirke kapasiteten negativt. En negativ stigningsgrad kan resultere i større avstand mellom signalene på grunn av økt bremselengde i fall, noe som påvirker togfølgetidene til togene og dermed kapasiteten på strekningen (Lindahl, 2001).

Flere studier belyser metoder for beregning av kapasitet, forsinkelser sett i sammenheng med kapasitet, og effekten av en enkelt parameter på kapasiteten. Denne studien tar for seg parametere som påvirker kapasiteten når jernbanestrekningen er i stigning eller fall. Studien ser også på eventuelle interaksjoner mellom parametere. En grundig litteraturgjennomgang og aktuell forskning på området blir presentert i kapittel 2.

1.3 Formål og problemstilling

Formålet med masteroppgaven er å studere hva konsekvensene av bruk av minstekravet gitt i Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» for stigning og fall på en jernbanestrekning er for kapasiteten på strekningen.

På bakgrunn av dette er det definert følgende problemstilling:

Hva er sammenhengen mellom stigningsgraden på en jernbanestrekning og kapasiteten på strekningen?

For å løse denne problemstillingen skal følgende forskningsspørsmål besvares:

- Hvilke parametere kan ha en påvirkning på kapasiteten på en dobbeltsporet jernbanestrekning med blandet trafikk?
- Hvilke sammenhenger viser et utvalg av de identifiserte parameterne når de modelleres i dataprogrammet LUKS og inkluderes i et parameterstudie?
- Hva er konsekvensen av de teoretiske funnene fra LUKS og parameterstudiet for kapasiteten og kjøretiden på en planlagt jernbanestrekning?

Målsettingen for masteroppgaven er å si noe om hvilke av parameterne som er identifisert og analysert som vil ha stor påvirkning på kapasiteten på analysestrekningen når stigningsgraden inkluderes som en parameter. Resultatene fås ved hjelp av en infrastrukturmodell som bygges i programmet LUKS. LUKS gir hastighets- og tid-distanse-diagram. Fra diagrammene kan man finne togfølgetider, og på denne måten beregne kapasiteten på strekningen. Ved å gjennomføre et parameterstudie kan man si noe om hvilke parametere som har en dominerende påvirkning på kapasiteten, og avgjøre om stigningsgraden er dominerende.

For å besvare det siste forskningsspørsmålet skal det gjennomføres et casestudie. Casestudiet tar for seg en strekning som er planlagt i konstant stigning. På denne måten kan man studere om de teoretiske sammenhengene funnet fra infrastrukturmodellen og parameterstudiet er overførbare til en mindre idealisert strekning. Siden strekningen fortsatt er i planstadiet kan teorien fra denne oppgaven benyttes til å si noe om muligheter og begrensninger ved strekningen som planlegges.

Masteroppgaven ser på kapasitet og kjøretid på strekningen. Analyser vedrørende kostnader, energiforbruk og robusthet inkluderes ikke.

Videre forutsettes det situasjoner som omhandler nybygging og ombygging av jernbanestrekninger med dobbeltspor og blandet trafikk. Horisontalgeometrien til jernbanelinjen er rettstrekninger, og togglengde og motorkraft tilsvarende dagens nivå der ikke annet er oppgitt.

1.4 Oppgavens oppbygning

Masteroppgaven består av de to hoveddelene prosessrapport og vitenskapelig artikkel.

Prosessrapporten presenteres i første del av masteroppgaven. Prosessrapporten går i dybden på metodene som er benyttet for å besvare den definerte problemstillingen, og gjør rede for fremgangsmåter, valg og avveininger for det utførte arbeidet. Rapporten er utarbeidet med inspirasjon i dokumentet *Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjekt- og masteroppgaver* (Institutt for bygg anlegg og transport, 2013). Prosessrapporten er skrevet parallelt med arbeidet, slik at den reflekterer prosessen slik den er gjennomført.

Prosessrapporten presenterer først en litteraturgjennomgang i kapittel 2. Det påpekes at den teoretiske bakgrunnen presentert i denne oppgaven ikke gir en fullstendig innføring i fagfeltet. Kapittel 3 presenteres metodene som er benyttet for å svare på problemstillingen, samt en evaluering av metodevalget.

Kapittel 4 dokumenterer planleggingen og gjennomføringen av arbeidet med masteroppgaven, og det redegjøres for valg og alternative gjennomføring. Kapitlet er inndelt etter metodene fra kapittel 3, og hvert delkapittel består av en planleggingsfase og en gjennomføringsfase. Dette kapitlet utgjør en stor del av prosessrapporten, siden det er her gjennomføringen av arbeidet presenteres. Der det er naturlig presenteres delresultater som er benyttet for å komme frem til resultatene som svarer på problemstillingen.

Resultatene fra parameterstudiet og casestudiet presenteres i kapittel 5. I kapittel 6 diskuteres resultatene og drøftes opp mot forventninger og kjent litteratur, samt metodene som er benyttet. Til slutt konkluderes det og anbefales videre arbeid i kapittel 7. Resultatene og diskusjonen i prosessrapporten er større enn i den vitenskapelige artikkelen, og inkluderer blant annet resultater som ikke er presentert i den vitenskapelige artikkelen. Kapittel 8 inneholder en avslutning og personlig evaluering som oppsummerer arbeidet med masteroppgaven.

Den vitenskapelige artikkelen er presentert i del 2 av masteroppgaven. Artikkelen presenterer forskningen som er gjennomført i arbeidet med masteroppgaven. Artikkelen er i sin helhet skrevet av kandidaten, med god oppfølging og støtte av veiledere for denne masteroppgaven. Artikkelen er basert på arbeidet som er presentert i prosessrapporten, men er mer tilspisset og vitenskapelig formulert.

Følgende dokumenter er vedlagt på slutten av oppgaven:

- 1 Oppgavetekst
- 2 Fremgangsmåte for beregning av midlere minste togfølgetid (MMT)
- 3 Blokk lengder – beregningsbakgrunn og beregnede blokk lengder
- 4 Hoved- og samspillseffekter – beregningsbakgrunn og beregnede effekter
- 5 Valg av sporveksel og utforming av forbikjøringsspor
- 6 Plassering av stigningsgraden i infrastrukturmodellen
- 7 MATLAB-script og designmatrise for parameterstudiet

2. Litteraturgjennomgang

I dette kapitlet presenteres teori som er benyttet i arbeidet med denne masteroppgaven, sammen med eksisterende forskning på fagfeltet (*State of the Art*). Kapitlet bygger videre på et litteraturstudie som ble utført høsten 2016, som ble gjennomført som en del av en avsluttende rapport i faget TBA 4590 – Jernbane Fordypningsprosjekt (Eggum, 2016).

2.1 Teoretisk rammeverk

Videre presenteres det teoretiske grunnlaget for denne oppgaven. Først presenteres teori som omhandler geometri og linjeføring for en jernbanelinje. Videre presenteres togdynamikk, før aspekter knyttet til kapasiteten på en jernbanelinje presenteres. Det presiseres at dette kapitlet ikke dekker all teori innenfor de ulike feltene, og det forutsettes at leseren har grunnleggende kunnskaper.

2.1.1 Geometri og design

En linjeføring (*alignment*) kan betegnes som traséen der sporet bygges og toget kjører i horisontal og vertikalplanet (American Railway Engineering Maintenance of Way Association, 2003, s. 217-229 og Chandra og Agarwal, 2013, s. 44.51). For å beskrive traséen skiller man mellom horisontal- og vertikalgeometri. Horisontalgeometrien beskrives som orienteringen til sporet og defineres matematisk i XY-planet. Rettstrekninger (tangenter) og kurver sporet følger, samt overgangskurver inkluderes i horisontal linjeføring. Den vertikale linjeføringen defineres matematisk som Z-komponenten i planet, og refererer til sporets orientering i vertikalplanet. Vertikalgeometrien definerer stigningsgraden, og består av rettlinjier (stigning og fall) og stigningskurver (sirkelkurver) (American Railway Engineering Maintenance of Way Association, 2003, s. 217-229 og Chandra og Agarwal, 2013, s. 44-51). Denne oppgaven fokuserer kun på jernbanelinjens vertikalgeometri i form av stigningsgrad.

Stigningsgrad kan omtales som vertikale tangenter, og klassifiseres ut fra stigning eller fall. En positiv stigningsgrad i traséen betegnes som stigning. På tilsvarende måte betegnes en negativ stigningsgrad som fall (Chandra og Agarwal, 2013, s. 203-206). Stigning og fall betegnes i Norge i promille (%), og det stilles krav til maksimalt stigning/fall for å ivareta togenes fremføringsevne og mulighet til å opprettholde hastighet. Dette skyldes at toget kan miste hastighet ved framføring i stigning, siden toget må benytte mer trekraft for å overvinne stigningsmotstanden. Stigningsmotstanden er en viktig del av togets totale kjøremotstand, og vil omtales ytterligere i neste delkapittel. Ved togframføring i fall øker bremselengden til toget, eller så må toget redusere hastigheten for å kunne bremse innenfor en gitt strekning (Lindahl, 2001).

Stigningsgraden for en jernbanestrekning er mer begrenset enn stigningsgraden for en bilvei. Jernbanen er et såkalt *stål-mot-stål*-system, grunnet kontakten mellom hjul og skinne.

Adhesjonskoeffisienten i et slikt system er i gjennomsnitt åtte ganger mindre enn den man finner i vegtrafikken (Pachl, 2015, s. 49-65). På grunn av dette vil friksjonskraften som er tilgjengelig i kontaktflaten mellom hjul og skinne være vesentlig lavere enn mellom overflaten på en veg og bilene som trafikkerer den. Adhesjonsforholdet påvirker bremskraften som overføres mellom hjul og skinne, og vil føre til svært lange bremselengder på jernbanen (American Railway Engineering Maintenance of Way Association, 2003, s. 217-229 og Pachl, 2015, s. 49-65). Dette påvirker igjen togseparasjonen, da sikker togseparasjon skjer ved såkalte blokkstrekninger som igjen er avhengige av bremselengde til toget. Dette utdypes senere.

I denne oppgaven blir kravene for største tillatte *bestemmende* stigning/fall for baner med blandet trafikk studert (Tabell 1, s. 4). Fra tabellen er normalkravet til største bestemmende stigning/fall for baner med blandet trafikk 12,5%. Kravet på 12,5% stammer fra tysk regelverk¹.

Kravene for maksimal stigningsgrad for vegtrafikken er bestemt av krav til framkommelighet, kjørekomfort, kapasitet og sikkerhet, og vil variere mellom 5-8% avhengig av veiklassen (Statens Vegvesen, 2014). Tungtransport på veg har større vanskeligheter med å overvinne stigning enn personbiler. Fwa et al. (2002) sier at begrensinger for lengde på stigningen er styrt av hastighetsdifferansen mellom personbiler og tunge kjøretøy for å oppnå en jevn trafikkflyt og sikker drift. Hastighetsdifferansen skyldes at hastigheten til tunge kjøretøy reduseres når de kjører oppover. Dette vil også være tilfellet for en jernbanestrekning.

Fastsettelse av linjeføringen i jernbanesammenheng er et svært viktig område, da feilaktig vertikalkurvatur kan føre til unødvendige bygge- og driftskostnader (Bababeik og Monajjem, 2012 og Chandra og Agarwal, 2013). Bababeik og Monajjem (2012) trekker også fram problemer knyttet til drift av jernbanen, som for eksempel begrensinger i godstrafikken og tap av kapasitet på jernbanestrekningen som følge av en uheldig stigningsgrad.

2.1.2 Togdynamikk

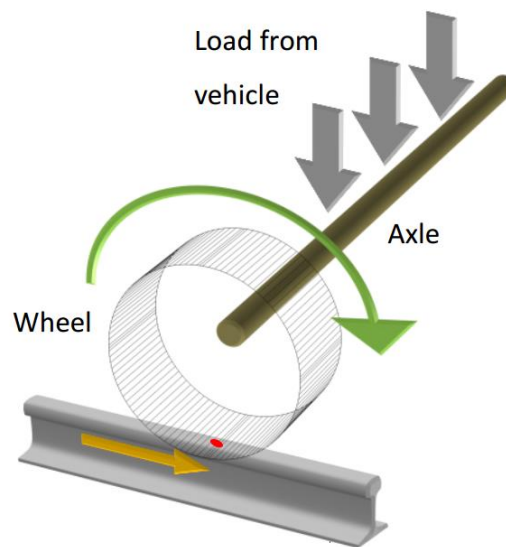
Trekraft

Trekraften til et lokomotiv eller motorvognsett betegner den kraften togene kan generere for å trekke en last, og bør være stor nok til å framføre toget i den tillatte maksimalhastigheten (Chandra og Agarwal, 2013, s. 415-463). Et lokomotivtrukket tog har hele trekraften samlet i lokomotivet, og togets hastighet og akselerasjonsevne vil være avhengig av antall tilkoblede vogner og lasten. Et motorvognsett har drivmaskineri på hver vogn eller for hvert vognsett, og hastighet, akselerasjon og bremseegenskaper er uavhengig av togets lengde (Teknisk Linjeføring, 2013). Trekraften må overvinne togets kjøre motstander for å sette toget i

¹Krav gitt av DB Fachbuch, Zusammenstellung von Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen sowie Tabellen und Formeln, Band 8/15, avsnitt 2.1.9 Neigungen, opplyst i epost fra Mette Sveen 01.06.17.

bevegelse, holde det i konstant hastighet, akselerere toget og overvinne stigninger (Profillidis, 2014, s. 381-401 og Teknisk Linjeføring, 2013). Lokomotivdrevne tog som godstog har størst vanskeligheter ved økt kjøremotstand. Kjøremotstand utdypes i neste kapittel.

Den utnyttbare trekkraften (F) til et lokomotiv består av drivmaskineriets totale utviklede kraft minus indre motstand i bevegelige deler og overføringer (Teknisk Linjeføring, 2013). Trekkraften overføres fra hjulperiferien ved adhesjon mellom drivhjul og skinnehode, og den utnyttbare trekkraften F måles på drivhjulets periferi (Pachl, 2015, s. 37-48, Teknisk Linjeføring, 2013 og American Railway Engineering Maintenance of Way Association, 2003, s. 33-66). Figur 1 viser kraftoverføringen mellom hjul og skinne, der kontaktpunktet vises ved et lite, rødt område med flateinnhold på ca. $1-2 \text{ cm}^2$ (Samvirke mellom rullende materiell og spor, 2015).



Figur 1: Kraftoverføring mellom drivhjul og skinne. Fra Pawar (2011)

Overføring av trekkraft begrenses av adhesjonsforholdene, der adhesjonskoeffisienten (μ) angir hvor stor trekkraft (og bremsekraft) som kan benyttes i forhold til lokomotivets eller drivhjulenes tyngde. Dersom det benyttes en for stor kraft vil hjulene spinne eller gli (Teknisk Linjeføring, 2013, Chandra og Agarwal, 2013, s. 451-463 og Hansen og Pachl, 2014, s. 65-77). Dette gjør adhesjon til en grunnleggende egenskap som bestemmer grensen for utnyttbar trekkraft, sammen med lokomotivets effekt.

Som beskrevet over vil togets framdrift være begrenset av adhesjon mellom drivhjul og skinne, samt lokomotivets utviklede effekt. Kraften som kan overføres mellom hjul og skinne kan uttrykkes som vist i Formel 1, og den faktiske kraften utøvd av drivmaskineriet kan uttrykkes som vist i Formel 2.

$$F_{adhesjon} = m * g * \mu$$

Formel 1

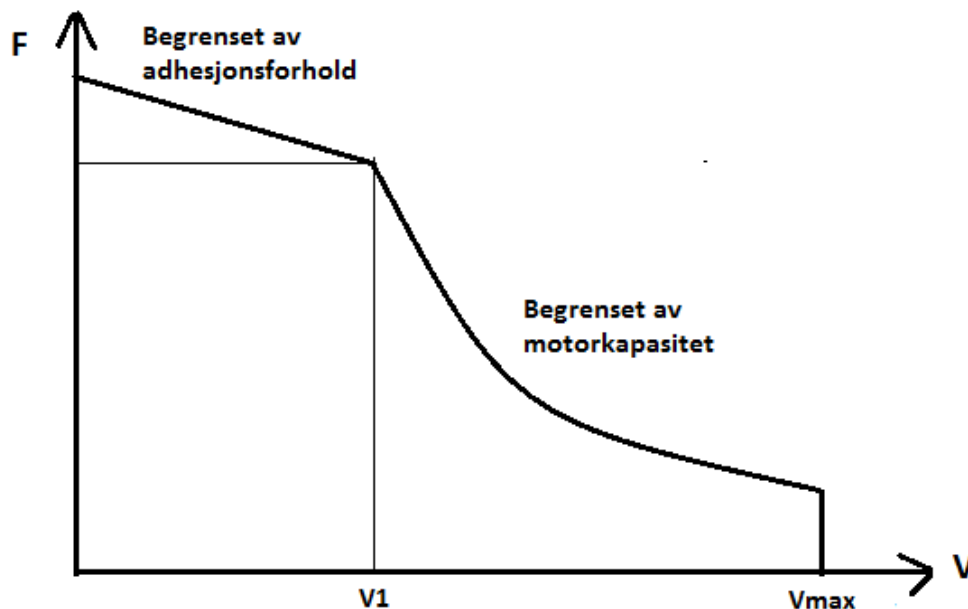
$$F_{effekt} = \frac{E}{v}$$

Formel 2

Der $m \cdot g$ er vekten på drivhjulene, μ er adhesjonskoeffisienten, E er netto effekt fra lokomotivet og v er framføringshastighet (m/s) (American Railway Engineering Maintenance of Way Association, 2003, s. 33-66 og Pachl, 2015, s. 37-48).

Effekten (E) holdes på et konstant nivå slik at trekraften (F) avtar med økende hastighet (som følge av Formel 2). Nettoeffekten E er mindre enn den totale motoreffekten som følge av tap i overføringsledd (Teknisk Linjeføring, 2013).

Kreftene fra Formel 1 og Formel 2 kan fremstilles som en funksjon av hastigheten. Resultatet er en såkalt trekraftkurve, som skissert i Figur 2. Figuren viser at den utnyttbare trekraften bestemmes av adhesjonsforholdene opp til et visst hastighetsnivå (v_1). Over denne hastigheten synker trekraften med økende hastighet på grunn av begrensninger ved motorkapasiteten. Den skrånende linjen (grensen for adhesjonsforholdene) tar hensyn til at adhesjonsforholdene avtar med økende hastighet på grunn av mikroskopiske ujevnheter i sporet (Teknisk Linjeføring, 2013).



Figur 2: Prinsipp for en trekraftkurve. Basert på Teknisk Linjeføring (2013)

Den spesifikke (relative) trekkraften (f) angis i forhold til togets samlede aksellast (P). Uttrykket er vist i Formel 3.

$$f = \frac{F}{P} \left[\frac{N}{kN} = \% \text{ av aksellast} \right] \quad \text{Formel 3}$$

F er lokomotivets utnyttbare trekkraft. Aksellasten P finnes ved å multiplisere togets masse med tyngdens akselerasjon, g .

Kjøremotstand

For at et tog skal settes i en konstant bevegelse må trekkraften beskrevet tidligere overvinne togets totale kjøremotstand (F_{RT}). Kjøremotstanden kan beskrives som krefter som virker på toget mot bevegelsesretningen, og vil påvirke togets hastighet og evne til å akselerere (Lukaszewicz, 2001). Tabell 3 viser bidrag til den totale kjøremotstanden.

Tabell 3: Total kjøremotstand

Motstand	Benevning (N/kN)	Forklaring
Grunnmotstand	w_0	Grunnmotstanden består av rulle- og luftmotstand. Rulle- og luftmotstanden er i denne sammenhengen et samlebegrep som inneholder friksjon i lager og overføringsledd, rullende friksjon mellom hjul og skinne, motstand på grunn av ujustert spor og elastisk nedbøyning av skinnegangen ved overkjøring samt motstand i skinneskjøter (når sporet er lasket). Luftmotstanden innefatter trykket på togets frontparti, sug bak toget, luftinntrengning mellom vogner samt friksjon mot tak, understell og sideflater (Pachl, 2015, s. 37-48 og Teknisk Linjeføring, 2013)
Kurvemotstand	w_r	Kurvemotstanden er i hovedsak et resultat av friksjon mellom hjulflens og skinne samt sliring (friksjon i kjøreretningen). Denne motstanden er ofte liten og kan neglisjeres (Pachl, 2015, s. 37-48 og Teknisk Linjeføring, 2013)
Stigningsmotstand	w_s	Beskrives i eget underkapittel

Summen av de overnevnte motstandene utgjør den totale spesifikke kjøremotstanden, vist i Formel 4. Et tog med aksellast P vil ha samlet motstand F_{RT} som vist i Formel 5 (Teknisk Linjeføring, 2013).

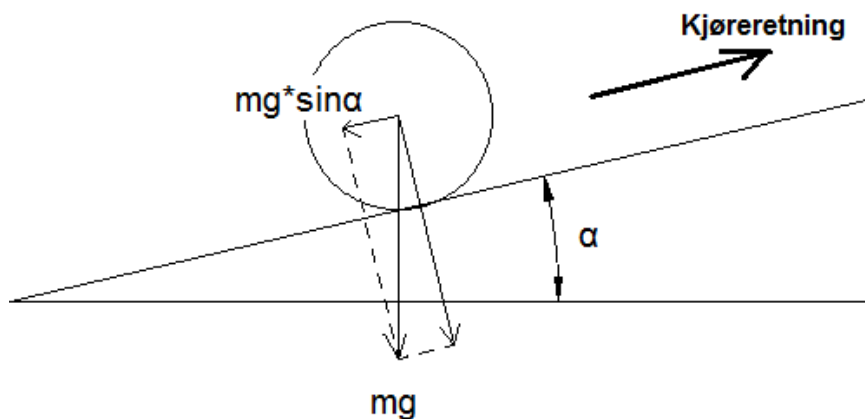
$$f_{RT} = w_0 + w_r + w_s \left[\frac{N}{kN} \right] \quad \text{Formel 4}$$

$$F_{RT} = f_{RT} * P = (w_0 + w_r + w_s) * P \left[N = \frac{N}{kN} * kN \right] \quad \text{Formel 5}$$

I et jernbanesystem vil det alltid eksistere en grunnmotstand. Kurvemotstand og stigningsmotstand vil variere med henholdsvis kurveforhold og stigningsgrad på strekningen. Det vil også være en ekstra motstand knyttet til start og akselerasjon. Disse kan inkluderes i uttrykket for total motstand (Chandra og Agarwal, 2013, s. 451-463 og Profillidis, 2014, s. 381-401).

Stigningsmotstand – forholdet mellom stigningsgrad og motstand

Ved togframføring i en stigningsgrad ulik null‰ vil toget ha en tyngdekomponent mot bevegelsesretningen. Denne komponenten er positiv for stigning og negativ for fall. Dette illustreres i Figur 3. I tilfelle med fall vil tyngdekomponenten «dytte» toget nedover.



Figur 3: Prinsippskisse av stigningsmotstand

Den ekstra kraften som trengs for at et lokomotiv skal kunne trekke et tog med tyngden $m \cdot g$ en stigningsgrad s med vinkelen α kan uttrykkes som vist i Formel 6 (Chandra og Agarwal, 2013, s. 451-463). På grunn av svært små vinkler i longitudinal retning antas $\sin \alpha = \tan \alpha$ og Formel 7 dannes. Videre kan stigningsmotstanden uttrykkes som vist i Formel 8, og den spesifikke stigningsmotstanden kan uttrykkes som i Formel 9 (Lindahl, 2001, Pachl, 2015, s. 37-48, Hansen og Pachl, 2014, s. 65-77, Profillidis, 2014, s. 381-401 og Chandra and Agarwal, 2013, s. 451-463).

$$W_s = mg * \sin\alpha \quad \text{Formel 6}$$

$$W_s = mg * \sin\alpha \approx mg * \tan\alpha = mg * s \quad \text{Formel 7}$$

$$W_s = \frac{(m_l + m_v) * g * s}{1000} [N] \quad \text{Formel 8}$$

$$w_s = \frac{W_s}{P} = s [\%] \quad \text{Formel 9}$$

der m_l er massen til lokomotivet, m_v er den totale massen til samtlige godsvogner, g er tyngdens akselerasjon og s er stigningsgraden langs sporet (%).

Som beskrevet innledningsvis vil et lokomotivtrukket tog ha hele trekkraften samlet i lokomotivet, og oppleve en økt belastning som følge av stigningsmotstanden (når positiv stigningsgrad). Slik er stigningsmotstanden dominerende for godstransport i stigningen (Lindahl, 2001).

Toget under akselerasjon

For at et tog skal holde konstant hastighet over en strekning med samlet motstand F_{RT} , må toget yte en trekkraft F slik at $F = F_{RT}$ (Teknisk Linjeføring, 2013). For å sette toget i bevegelse kreves imidlertid en større kraft, og det er behov for nok kraft til å akselerere toget samt å overvinne stigningsmotstanden. Ifølge Lindahl (2001) må trekkraften F fra lokomotivet tilfredsstillende forholdet vist i Formel 10. F_{RT} tar hensyn til at det er en ekstra motstand ved start fra stillstand. Akselerasjonen (a) til toget (etter det er satt i bevegelse) kan beskrives som vist i Formel 11.

$$F \geq F_{RT} \quad \text{Formel 10}$$

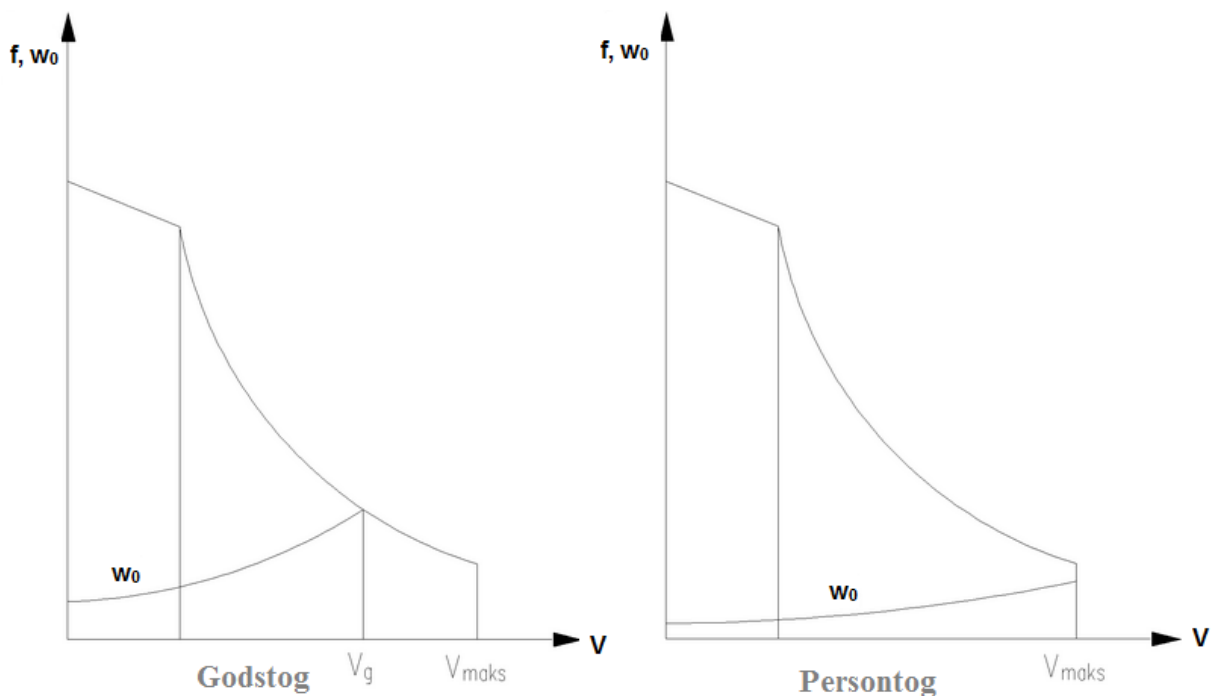
$$a = \frac{F - F_{RT}}{m_e} \quad \text{Formel 11}$$

der m_e er den ekvivalente massen til toget, som tar hensyn til rotasjonstregghet eller tregghetsmomentet (Lindahl, 2001). Dette skyldes at toget består av roterende deler som vil forbruke noe av den tilgjengelige trekkraften (Hansen og Pachl, 2014, s. 65-77).

Dersom $F < F_{RT}$ vil toget oppleve en retardasjon, og tape hastighet.

Forholdet mellom trekkraft og kjøremotstand

Spesifikk trekkraft (f) og spesifikk grunnmotstand (w_0) endrer seg med hastigheten (V), og forholdet kan illustreres som vist i Figur 4. Delen av trekkraftkurven som ligger under kurven for grunnmotstand benyttes til å gi toget konstant hastighet på en horisontal, rettlinjert strekning. Resterende trekkraft er tilgjengelig for å akselerere toget eller overvinne stigning eller kurvemotstand. Dersom man ser på differansen mellom trekkraft og grunnmotstand får man disponibel trekkraft, som for eksempel kan gi et uttrykk for den maksimale stigningen et tog kan overvinne for en gitt hastighet V når kurvemotstand og akselerasjonen er lik null (Teknisk Linjeføring, 2013).



Figur 4: Prinsippkisse for forholdet mellom spesifikk trekkraft (f) og spesifikk grunnmotstand (w_0) for gods- og persontog. Fra Teknisk Linjeføring (2013)

Skjæringspunktet mellom de to kurvene betegner den maksimale hastigheten et tog kan oppnå på en horisontal og rettlinjert strekning. Denne hastigheten kalles en grunnhastighet (V_g), og er relatert til godstog som kan ha underskudd av trekkraft. I slike tilfeller vil godstoget maksimalt kunne oppnå grunnhastigheten V_g .

Fra teorien beskrevet ser man at togene taper hastighet dersom det ikke er tilstrekkelig trekkraft tilgjengelig. Lindahl (2001) trekker frem tre punkter som en følge av økt stigningsgrad: 1) energitilførsel og energitap vil øke i store stigninger, 2) tunge (gods)tog vil ha vanskeligheter med å overvinne store, positive stigningsgrader og 3) bremselengden vil øke ved store negative stigningsgrader. Punkt 2) indikerer at særlig godstogene opplever en tregere akselerasjon som følge av en stor, positiv stigning. Fra punkt 3) vil fall på strekningen føre til økte bremselengder

og dermed større signalavstand for å kunne stoppe toget med normale bremses. Tregere akselerasjon av godstog kan føre til at toget blokkerer strekningen i en lengre tid, noe som kan føre til redusert kapasitet på strekningen. En treg akselerasjon av godstog vil også kunne medføre større hastighetsdifferanser mellom persontog og godstog, som kan påvirke kapasiteten på strekningen (Abril et al., 2008). Dersom et fall på strekningen fører til lengre signalavstander, vil dette påvirke togfølgetiden mellom etterfølgende tog, noe som også kan påvirke kapasiteten på strekningen (Abril et al., 2008). Punkt 1) som omhandler energiforbruk og energitap som følge av stigningsgrad er utenfor avgrensingene for denne oppgaven, og kommenteres ikke ytterligere. Temaer som omhandler kapasitet utdypes videre.

2.1.3 Kapasitet på en jernbanelinje

Definisjoner av kapasitet

Pawar (2011) sier at kapasitet er et begrep som er definert i forhold til konteksten det blir benyttet i. Kapasitet betyr i sin praktiske forstand evnen til å romme eller yte, mens det i jernbanesammenheng ofte er snakk om evnen til å transportere (Kaas, 1998). Kapasitet på jernbanelinjer kan være vanskelig å fastslå, siden jernbanen er et komplisert system der kapasiteten avhenger av både infrastruktur, rutetabell, rullende materiell og ønsket punktlighetsnivå (Kaas, 1998, Burdett og Kozan, 2006 og International Union of Railways, 2004).

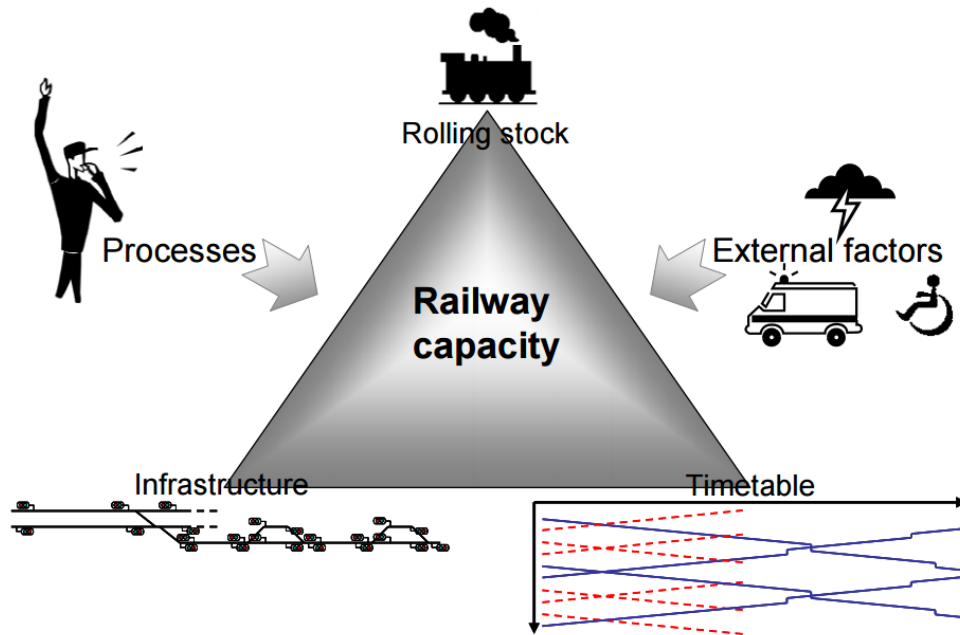
Krueger et al. (1999) har definert kapasitet som et mål på evnen til å forflytte en spesifikk mengde trafikk over en definert jernbanelinje med et gitt sett ressurser underlagt en spesifikk serviceplan (fritt oversatt). Denne definisjonen kan blant annet innefatte antall tonn som flyttes, tilgjengelig tid for vedlikehold, eller maksimalt antall tog per dag en delstrekning kan håndtere. Samtlige tolkninger sier noe om kapasiteten, men få kan sammenliknes med hverandre.

Burdett og Kozan (2006) definerer kapasitet som maksimalt antall tog som kan krysse hele jernbanestrekningen eller visse kritiske deler av strekningen (flaskehals) i et gitt tidsrom. Denne definisjonen finner man igjen hos Skartsæterhagen (1993), som sier at kapasiteten for en strekning kan omtales som antall tog som kan trafikere strekningen per tidsenhet. Begge kan sammenliknes med Pacht (2015, s. 255), som definerer kapasitet på en jernbane som maksimal trafikkflyt en del av infrastrukturen (linje, sikringsystem, terminaler) kan håndtere under gitte driftsforhold.

International Union of Railways (2004) sier at kapasitet som sådan ikke eksisterer, men at infrastrukturens kapasitet er avhengig av måten den utnyttes på. Boysen (2014) har sett på transportkapasiteten til jernbanesystemet som en helhet, og definerer denne som lastekapasiteten per tog multiplisert med frekvensen på togene.

Flere av definisjonene ser på kapasiteten på en jernbanestrekning som avhengig av infrastrukturen og rutetabellen, og dermed underforstått også av det rullende materiell som

benyttes. Landex (2008) illustrerer dette som vist i Figur 5. Prosesser knyttet til drift samt eksterne påvirkninger er inkludert i figuren. Dette er påvirkninger som ikke er mulig å forutsi. Slike prosesser er for eksempel tidkrevende avgangsprosedyrer, eller eksterne påvirkninger som været eller problemer med rullende materiell. For å minimere innvirkningen av slike faktorer tas de hensyn til ved å legge til et såkalt supplement ved planlegging av for eksempel rutetabellen. International Union of Railways (2004) kaller dette for supplement for forventede forstyrrelser og forventet vedlikehold.



Figur 5: Parametere som påvirker kapasiteten på en jernbanestrekning. Fra Landex (2008)

Denne oppgaven baserer seg på Burdett og Kozan (2006), Skartsæterhagen (1993) og Pachl (2015, s. 255) sine definisjoner av kapasitet. Kapasiteten defineres som antall tog som kan trafikkere en strekning i en retning per tidsenhet. Tidsintervallet er en klokke time (60 minutter), og man studerer en retning av gangen siden det er en dobbeltsporet strekning.

Et fundamentalt prinsipp ved denne måten å studere kapasitet på er at den totale kapasiteten på en strekning mellom to punkter aldri kan overskride kapasiteten til strekningen med den laveste kapasiteten, betegnet som en flaskehals (Landex et al., 2008 og Burdett og Kozan, 2006).

Teoretisk og praktisk kapasitet

Teoretisk kapasitet

Teoretisk kapasitet er en øvre grense for kapasiteten på jernbanestrekning, og baserer seg på ideelle omstendigheter (International Union of Railways, 2004). Den teoretiske kapasiteten til en strekning er antall tog som kan trafikere en strekning i løpet av et gitt tidsintervall i et perfekt, matematisk generert miljø, der samtlige tog alltid følger hverandre med minste togfølgetid (Abril et al., 2008). Videre forutsettes det at samtlige tog er av samme type med like karakteristikk, samme rangering og prioritering, og at de kjører uten forstyrrelser. Begrepet teoretisk kapasitet ignorerer altså effektene av variasjon i trafikken og driftsforstyrrelser som opptrer i virkeligheten. Ved teoretisk kapasitet antar man at samtlige tog kjører så tett som signalanlegget tillater, med full hastighet. Det er ingen marginer som kan fange opp forsinkelser (Skartsætherhagen, 1993). Det vil aldri være mulig å kjøre antall tog som den teoretiske kapasiteten tilsier. For en dobbeltsporet strekning baseres den teoretiske kapasiteten på minste togfølgetid (Abril et al., 2008).

Den teoretiske kapasiteten på en strekning beregnes som vist i Formel 12 .

$$K_{teo} = \frac{T}{t_{s,min}} \quad \text{Formel 12}$$

der T er tidsintervallet og $t_{s,min}$ er minste togfølgetid. Man ser at den teoretiske kapasiteten er direkte avhengig av hvor tett togene kan følge hverandre som følge av $t_{s,min}$. Minste togfølgetid drøftes senere i kapitlet, og omtales videre som MT .

Praktisk kapasitet

Praktisk kapasitet sørger for et rimelig pålitelighetsnivå for togdriften, og representerer et mer realistisk mål på kapasiteten. Den praktiske kapasiteten tar hensyn til en representativ togtrafikk, og gjenspeiler aktuell togmik, prioriteringer, rangeringer o.l. Praktisk kapasitet er kapasiteten som kan tilbys under normale driftsforhold (Abril et al., 2008). Ved høy utnyttelse av kapasiteten vil forventet driftskvalitet og systemets pålitelighet reduseres. Denne sammenhengen utdypes i neste kapittel.

International Union of Railways (2004) har utarbeidet utnyttelsesgrader for den teoretiske kapasiteten som sier noe om hvor mye systemet bør utnyttes for å unngå forsinkelser. Praktisk kapasitet kan også tas hensyn til ved såkalte buffertider, som er en ekstra tid som legges til minste togfølgetid for å unngå overføring av små forsinkelser (Pachl, 2015, s. 254). Utnyttelsesgradene er gjengitt i Tabell 4. Praktisk kapasitet kan beregnes som vist i Formel 13 (utnyttelsesgrad, U) og Formel 14 (buffertid, t_b).

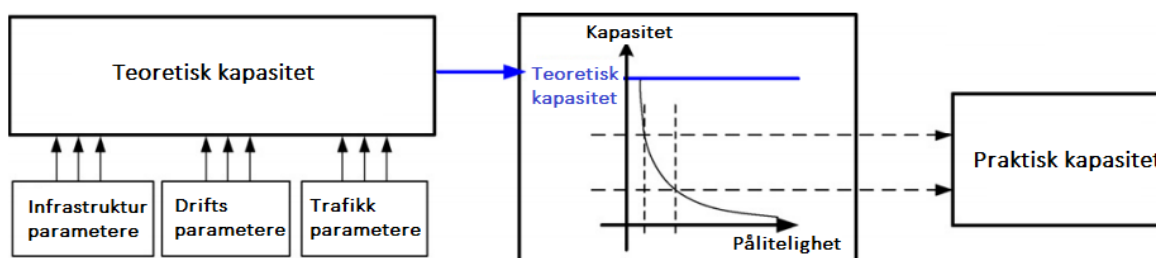
Tabell 4: Utnyttelsesgrader praktisk kapasitet. Basert på International Union of Railways (2004)

Type system	Timekapasitet (rushtid)	Døgncapasitet
Lukkede systemer (for eksempel t-bane)	85%	70%
Egen høyhastighetslinje	75%	60%
Blandet trafikk	75%	60%

$$K_p = K_{teo} * U \quad \text{Formel 13}$$

$$K_{teo} = \frac{T}{t_{s,min} + t_b} \quad \text{Formel 14}$$

Figur 6 viser en oversikt teorien som er presentert. Figuren illustrerer at det er viktig å ha en god forståelse av teoretisk kapasitet, da dette danner grunnlaget for den praktiske kapasiteten. Denne oppgaven baserer seg utelukkende på den teoretiske kapasiteten, og man ser fra figuren at parametere som kan påvirke kapasiteten studeres sammen med teoretisk kapasitet. Neste avsnitt illustrerer forholdet mellom teoretisk kapasitet og pålitelighet.

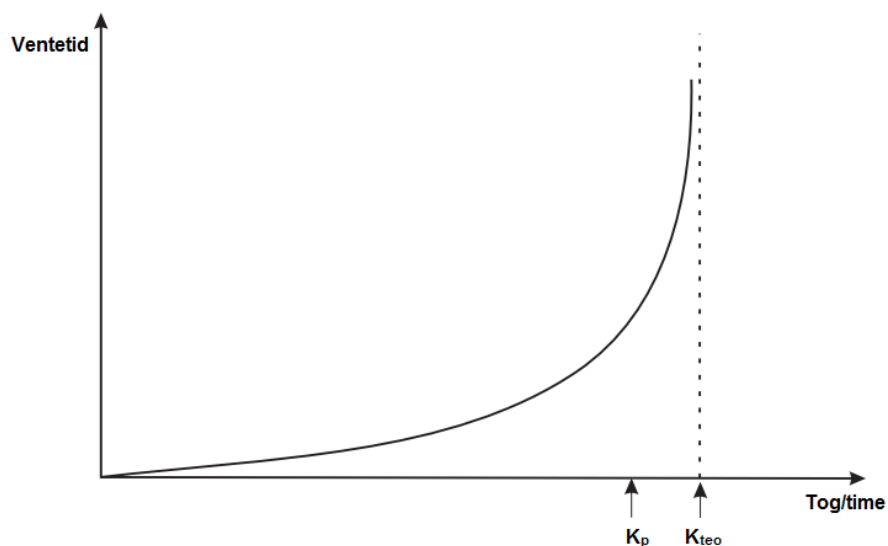


Figur 6: Sammenheng mellom teoretisk og praktisk kapasitet. Basert på Abril et al. (2008)

Ventetid og kapasitet

I jernbanesammenheng skiller man mellom planlagt og uforutsett ventetid. Planlagt ventetid oppstår ved konstruksjon av rutetabell, mens uforutsett ventetid genereres under driften. Den uforutsette ventetiden innefatter alle avvik fra den planlagte ruteplanen, også for tidlige ankomster (Handstanger, 2009 og Hansen og Pachl, 2014, s. 117-131). Uforutsett ventetid kan betegnes som en forsinkelse.

Det er en nær sammenheng mellom ventetid og kapasitet (tog per tidsenhet) på en jernbanestrekning. Schwanhäußer (1974) var den første til å definere forsinkelser til å være eksponentialfordelte, og sammenhengen illustreres i Figur 7. Man ser at dersom trafikkbelastningen øker vil også ventetiden øke. Jo nærmere antall tog per tidsenhet kommer den teoretiske kapasiteten, desto større blir ventetiden, helt til den går mot uendelig og en kø oppstår. Schwanhäußer har også sett på økonomiske aspekter knyttet til kapasitet, og sier at den mest optimale driften er der fortjenesten er på sitt høyeste². I dette ligger tanken om at tid er lik penger, slik at lang ventetid er lite lønnsomt.



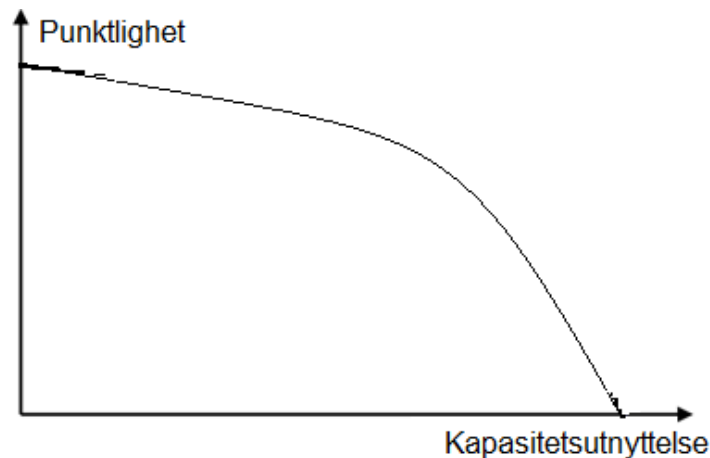
Figur 7: Sammenheng kapasitet og ventetid illustrert i et ventetidsdiagram. Basert på Pachl (2015, s. 171-192)

Figur 7 viser at det ikke er gunstig å utnytte systemet over den praktiske kapasiteten, da dette fører til forsinkelser. Siden det ikke er en lineær sammenheng mellom kapasitetsutnyttelse og forsinkelse vil et tog «for mye» være nok til å generere en stor forsinkelse i systemet.

For å finne den praktiske kapasiteten går man altså veien om den teoretiske kapasiteten. Å kunne fastslå den teoretiske kapasiteten til en banestrekning vil derfor være viktig for å kunne

²Schwanhäußer (1994), gjenngett fra forelesning i faget TBA4225 Jernbaneteknikk GK, holdt av Anne Christine Torp Handstanger (07.11.16)

tilby en robust og punktlig jernbane. Figur 8 viser sammenhengen mellom punktlighet og kapasitetsutnyttelse. For at punktligheten skal være høy, må kapasitetsutnyttelsen være lav.



Figur 8: Sammenheng mellom punktlighet og kapasitetsutnyttelse. Basert på Kaas (2000)

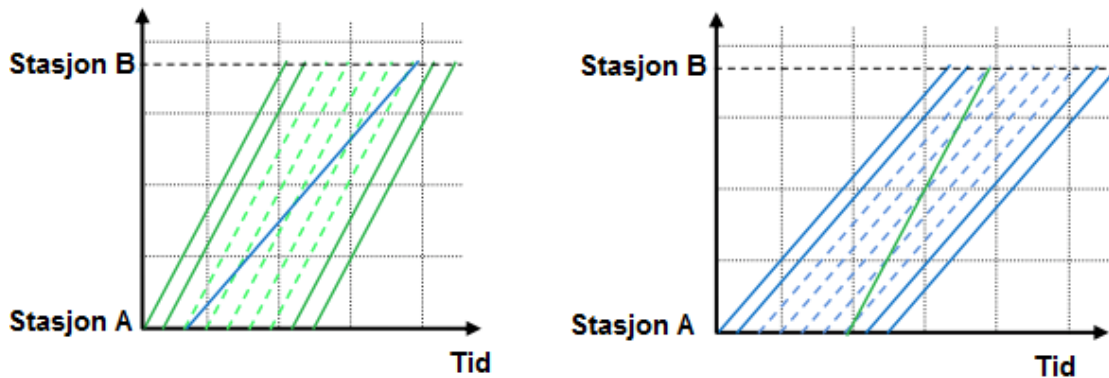
Av teorien presentert over ser man at forsinkelse på en jernbanelinje kan være et mål på kapasiteten på strekningen. White (2006) sier imidlertid at forsinkelse ikke er en egnet indikator for kapasitet fordi det ikke er en direkte sammenheng mellom forsinkelse og kapasitet. White (2006) sier at tid er et bedre mål på kapasiteten. Kapasiteten i denne oppgaven beregnes på bakgrunn av minste togfølgetid, altså en tidsbasert metode. Fra Formel 12 (s. 11) ser man at den teoretiske kapasiteten er direkte avhengig av minste togfølgetid. Videre beskrives minste togfølgetid med tilhørende egenskaper.

2.1.4 Minste togfølgetid og blokkprinsippet

Minste togfølgetid

Minste togfølgetid (MT) kan defineres som det minste tidsintervallet to etterfølgende tog kan opprettholde, slik at det bakerste toget kan kjøre med optimal hastighet (Kaas, 1998, Pachel, 2015, s. 171-192 og Skartsæterhagen, 1993), eller som et uttrykk for hvor lang tid et tog beslaglegger en konkret del av infrastrukturen (Kaas, 1998).

MT avhenger av om det er ensartet eller blandet trafikk på strekningen. På strekninger med blandet trafikk, som er situasjonen i denne oppgaven, vil MT i all hovedsak avhenge av hastighetsdifferansen mellom togene (Pachel, 2015, s. 49-65 og Skartsæterhagen, 1993). Dette skyldes at et raskt tog vil kjøre fra et langsommere tog, og danne en stor tidsluke når det ankommer endestasjonen. På tilsvarende måte må et raskt tog starte langt bak et langsomt tog for å kunne kjøre uhindret. Figur 9 viser at blandet trafikk eliminerer togleier, og reduserer dermed kapasiteten. Venstre side viser at et saktegående tog (blå linje) blant hurtiggående tog (grønn linje) medfører færre hurtiggående togleier. Tilsvarende vil et hurtiggående tog blant saktegående tog medføre færre saktegående togleier. Dette vises til høyre i figuren.



Figur 9: Blandet trafikk på en jernbanestrekning. Basert på Pawar (2011)

Blandet trafikk – midlere minste togfølgetid

I Norge driftes de fleste jernbanelinjene med blandet trafikk. Siden togfølgetiden kun kan utledes mellom par av etterfølgende tog, må det beregnes en gjennomsnittlig (midlere) minste togfølgetid, $\overline{t_{ij}}$ for strekninger med blandet trafikk (Spönemann og Wendler, 2010).

$\overline{t_{ij}}$ kan beregnes på ulike måter, avhengig av om man har ruteplan tilgjengelig eller ikke, eller om man ønsker å beregne med hensyn på varierende trafikkvolum. I denne oppgaven benyttes en ruteplanuavhengig metode, da det ikke foreligger en eksakt ruteplan. Det antas at togmiksen er kjent (antall tog av hvert slag).

Alle mulige kombinasjoner (rekkefølger) ij av tog i og j vurderes og vektes med en sannsynlighet p_{ij} for at tog i følges av tog j . Dette vises i Formel 15, hvor x_i representerer antall tog av type i , x_j er antall tog av type j og N er totalt antall tog (Spönemann og Wendler, 2010).

$$p_{ij} = \frac{x_i}{N} * \frac{x_j}{N} = \frac{x_i * x_j}{N^2} \quad \text{Formel 15}$$

$\overline{t_{ij}}$ for samtlige tog innenfor tidsintervallet som studeres oppnås ved å summere forekomstene av produktene av togfølgetidene mellom tog i og j , t_{ij} og sannsynlighetene p_{ij} . Dette er vist i Formel 16.

$$\overline{t_{ij}} = \sum_i \sum_j p_{ij} * t_{ij} \quad \text{Formel 16}$$

Et eksempel på beregning av $\overline{t_{ij}}$ er vist i vedlegg 2. Den teoretiske kapasiteten for en strekning med blandet trafikk beregnes som vist i Formel 17, basert på Formel 12 (s. 11).

$$K_{teo} = \frac{T}{\overline{t_{ij}}} \quad \text{Formel 17}$$

$\overline{t_{ij}}$ vil omtales videre som MMT (midlere minste togfølgetid). Man ser igjen at den teoretiske kapasiteten på strekningen er direkte avhengig av togfølgetidene på strekningen.

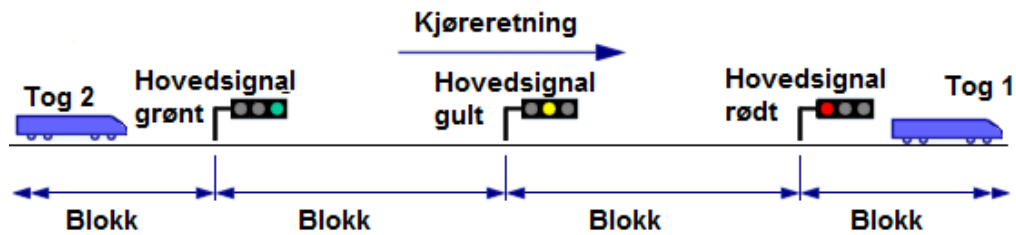
Sikker togseparasjon – blokkstrekninger, togfølgetid og *blocking time model*

For normal jernbanedrift er det nødvendig med prosedyrer for å skille togene fra hverandre for å sørge for en sikker drift. Denne prosedyren kan ikke være avhengige av førerens siktlengde, slik separasjonen mellom biler foregår på bilvegen (Pachl, 2015, s. 49-65). Dette skyldes som beskrevet tidligere at jernbanen er et stål -mot-stål-system, der bremselengden til et tog raskt blir lengre enn siktlengden til føreren av toget. En sikker togseparasjon sikres ved at togene følger en minste togfølgetid (MT). I denne oppgaven avhenger MT av *blocking time* (BT) som følge av at strekningen har faste blokkklengder. Dette beskrives videre.

Blokkstrekning

En metode for togseparasjon er å dele opp jernbanestrekningen i etterfølgende blokkstrekninger med faste blokkklengder (Pachl, 2015, s. 49-65). En blokkstrekning er den minste distansen på en jernbanelinje, og kan kun trafikkeres av ett tog av gangen (Handstanger, 2009). Blokkstrekningen kan ikke under noen omstendigheter være kortere enn bremselengden for toget med dårligst bremseegenskaper (Skartsæterhagen, 1993). Sammenhengen mellom blokkstrekningens lengde (blokkklengde) og bremselengde avhenger av signalanlegget, der blokkklengden reduseres ved økende antall aspekter på signalet (Skartsæterhagen, 1993). For dobbeltsporede jernbanelinjer benytter Norge et system som består av forsignaler som gir et forvarsel om at bremsing må innledes fordi neste signal viser stopp. Dette kalles et tre-aspekt signalsystem. I Norge står forsignalene på foregående hovedsignals mast (Skartsæterhagen, 1993).

Hver blokkstrekning «voktes» av et blokksignal i hver ende (et hovedsignal). For at et tog skal kunne entre en blokkstrekning må det foregående toget ha forlatt blokkstrekningen, og signalanlegget vise klart for innkjøring (Pachl, 2015, s. 49-65 og Hansen og Pachl, 2014, s. 13-46). Oppdeling i faste blokkstrekninger mellom hvert hovedsignal danner bakgrunnen for signalplasseringen som benyttes i infrastrukturmodellen i denne masteroppgaven. Dette illustreres i Figur 10. Blokkstrekningen som er belagt av tog 1 er vaktet av det røde signalet ved inngangen av blokkstrekningen. Blokkstrekningen bak er klar for tog, og det gule signalet gir en indikasjon på at neste signal viser stopp. Denne blokkstrekningen sørger for en sikker bremselengde for tog 2. Blokkstrekningen bak er også klar for tog, og voktes med et grønt signal. Føreren av tog 2 vet dermed at det er to ledige blokkstrekninger i front, og kan holde maksimal hastighet frem til neste gule signal hvor bremsing må innledes.



Figur 10: Prinsippskisse av 3-aspekts signalering. Basert på Adlington (2017)

Beregninger av nødvendige blokk lengder gjøres i tråd med anbefalinger fra TR (Bane NOR, 2017d), og består av en beregnet bremselengde og et hastighetsavhengig tillegg. Bremselengden utledes fra kjente, fysiske sammenhenger (bevegelseslovene). Det hastighetsavhengige tillegget er $T=8$ sekunder, gitt fra TR. Beregninger av blokk lengder er vist i Formel 18.

$$MA = \frac{L}{3,6} * T + \frac{L^2 - MH^2}{2 * R * 3,6^2} [m] \quad \text{Formel 18}$$

MA står for målavstand, som i denne oppgaven omtales som blokk lengder. L er linjehastigheten (km/t), T er et hastighetsavhengig tillegg lik summen av reaksjonstid og tilsetningstid ($T = 8$ sek). MH er mål hastigheten som i dette tilfellet er null km/t (full stopp) og R er retardasjonen. Ved tog framføring i fall må R beregnes, ellers benyttes en konstant grunnretardasjon på $r=0,7$ m/s². Blokk strekninger for ulike hastighetsnivåer og stigningsgrader er vist i Figur 21 i modell beskrivelsen i kapittel 4.2. Beregning av R i uttrykket over og blokk strekningene er vist i vedlegg 3.

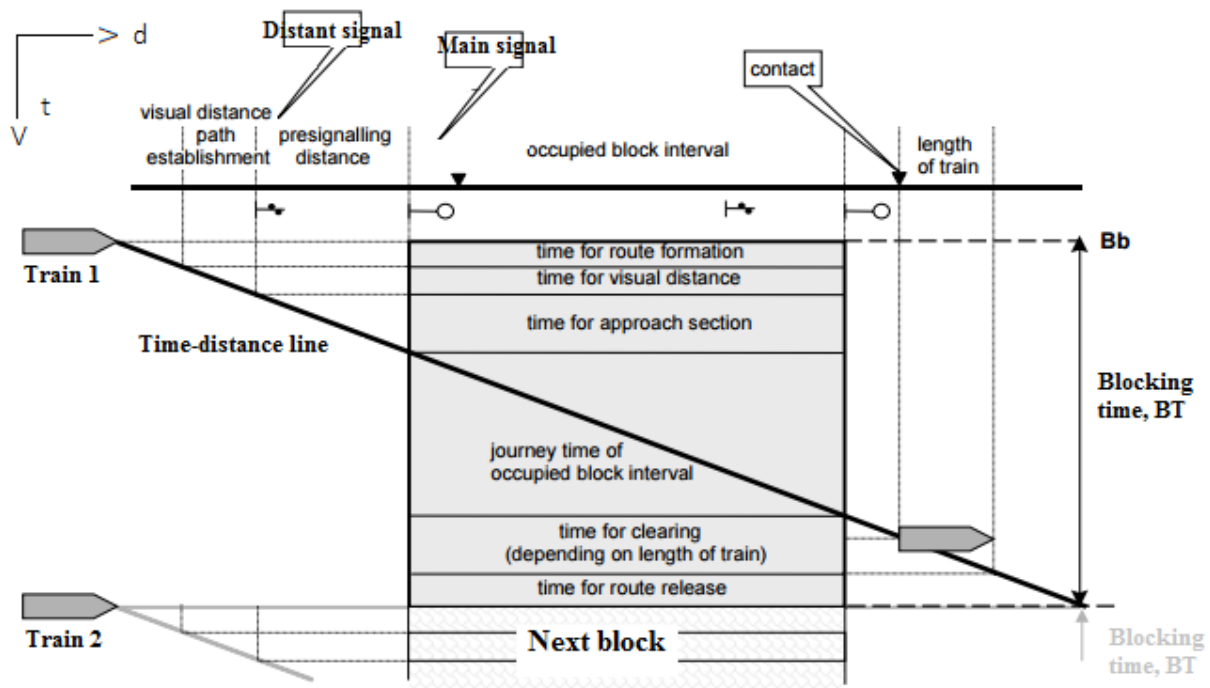
Blocking time og Togfølgetid

Blokk strekningen alene er ikke tilstrekkelig for sikker tog separasjon. Minste togfølgetid på en strekning med faste blokk lengder avhenger av *blocking time* (BT) som er det tidsintervallet en del av en strekning er utelukkende tildelt én togbevegelse, og derfor blokkert for alle andre togbevegelser. BT er ofte lenger enn tiden selve blokk strekningen er belagt av et tog (Pachl, 2015, s. 49-65). Dette skyldes at BT for en blokk strekning består av flere elementer enn kun gjennomkjøringstiden av blokk strekningen. Grunnleggende elementer for BT vises i Tabell 5 og i Figur 11.

Tabell 5: Elementer som inngår i BT

<i>Element</i>	<i>Forklaring</i>
<i>Tid for å klargjøre kjøreveien</i>	Innebærer å sette sporveksler og signaler riktig før toget kan entre strekningen. Denne tiden avhenger av type stillverk.
<i>Tid for føreren av toget til å se signalet</i>	Siktavstanden det tar lokføreren å se signalet. Det benyttes ETCS level 2 i denne oppgaven, og tid til sikt vil bortfalle fra BT grunnet ombordutrusningen til toget. ETCS utdypes i modelloppbygningen i kapittel 4.2
<i>Tid for å komme til strekningen (presignalling distance i Figur 11)</i>	Kan også betegnes som kjøretid fra forsignal til hovedsignal. I Norge står forsignalene på foregående hovedsignals mast, såkalt tre-begreps signalering.
<i>Kjøretid mellom hovedsignal (blokkstrekningen)</i>	Tiden det tar å kjøre gjennom selve blokkstrekningen
<i>Tid for å rydde strekningen</i>	Tiden det tar før strekningen er «tom». Denne tiden vil avhenge av lengden på toget
<i>Tid for å frigi togveien bak</i>	Denne tiden avhenger av type stillverk

En skjematisk fremstilling av punktene beskrevet i Tabell 5 er vist i Figur 11, der tid-distanselinjen viser fronten av toget, og elementene i blokktiden er vist som en tidskanal nedover. Fremstillingen av tidskanalen rundt tid-distanselinja kan ifølge Hansen og Pachl (2014, s. 13-46) omtales som *Blocking time model* (BTM).



Figur 11: Elementer som inngår i BT. Basert International Union of Railways (2004)

I Norge står som beskrevet tidligere forsignalene (*distant signal*) på foregående hovedsignals mast. For Figur 11 vil *presignalling distance* dermed være like lang som en blokkstrekning. Dette er også illustrert i Figur 10.

Summen av samtlige elementer fra Figur 11 utgjør BT. Hovedbidraget til BT kommer fra tiden det tar å komme til og passere selve blokkstrekningen (Landex, 2008). Dersom denne tiden øker, vil det påvirke kapasiteten på strekningen ved at BT øker, som medfører at MT øker. Fra Formel 12 (s. 11) ser man at en direkte konsekvens er at kapasiteten reduseres.

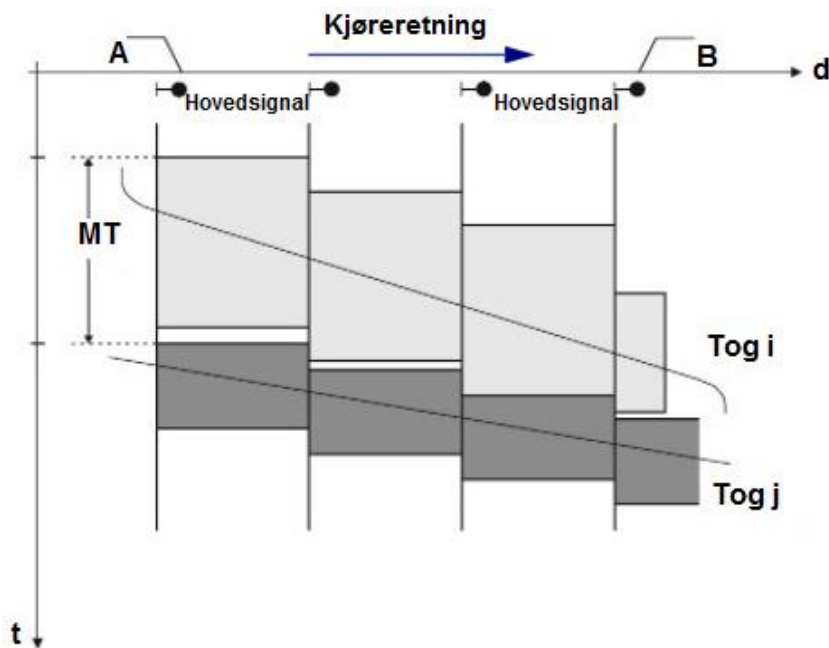
Kjøretiden gjennom blokkstrekningen kan for eksempel øke som følge av at blokkstrekningen er lang, eller at toget bruker lang tid på å akselerere som følge av stor motstand på strekningen. Fra Formel 18 (s. 17) ser man også at bremselengden til toget er med på å bestemme signalplasseringen, og dermed blokkstrekningens størrelse. Dersom bremselengden øker som følge av fall, vil blokkstrekningens størrelse øke, noe som igjen kan påvirke kapasiteten på strekningen. Man kan redusere hastigheten til togene istedenfor å øke signalavstanden, noe som medfører lengre kjøretid på strekningen.

Fastsettelse av minste togfølgetid ved hjelp av *blocking time model* (BTM)

Denne oppgaven tar utgangspunkt i MT og BTM, som beskrevet tidligere. Figur 11 på forrige side viser BT for én enkelt blokkstrekning. Dersom samtlige blokkstrekninger et tog passerer over en viss strekning framstilles i et tid-distanse-diagram får man det som kalles en *blocking time stairway* (blokktrapp). Ved å fremstille blokktrappene til et tog *i* etterfulgt av et tog *j* i samme tid-distanse-diagram får man situasjonen vist i Figur 12.

Ved å skyve blokktrappen til det etterfølgende toget *j* helt til det berører, men ikke overlapper, blokktrappen til det foregående toget *i* kan man finne minste togfølgetid mellom togene. MT leses av fra starten av BT for den første blokkstrekningen mellom to stasjoner (A og B i Figur 12), og er en vel anvendt og viktig metode innenfor kapasitetsstudier (Hansen og Pachl, 2014, s. 13-46). Metoden illustreres i Figur 12, der MT er togfølgetiden mellom tog *i* og *j*.

Analysestrekningen er definert mellom utkjøringssignalet fra stasjon A og innkjøringssignalet for stasjon B. Det er her togene har mulighet til å bytte rekkefølge, og det er her det er interessant å se hvor lang bak et tog må starte. Infrastrukturmodellen i denne oppgaven er basert på dette prinsippet.

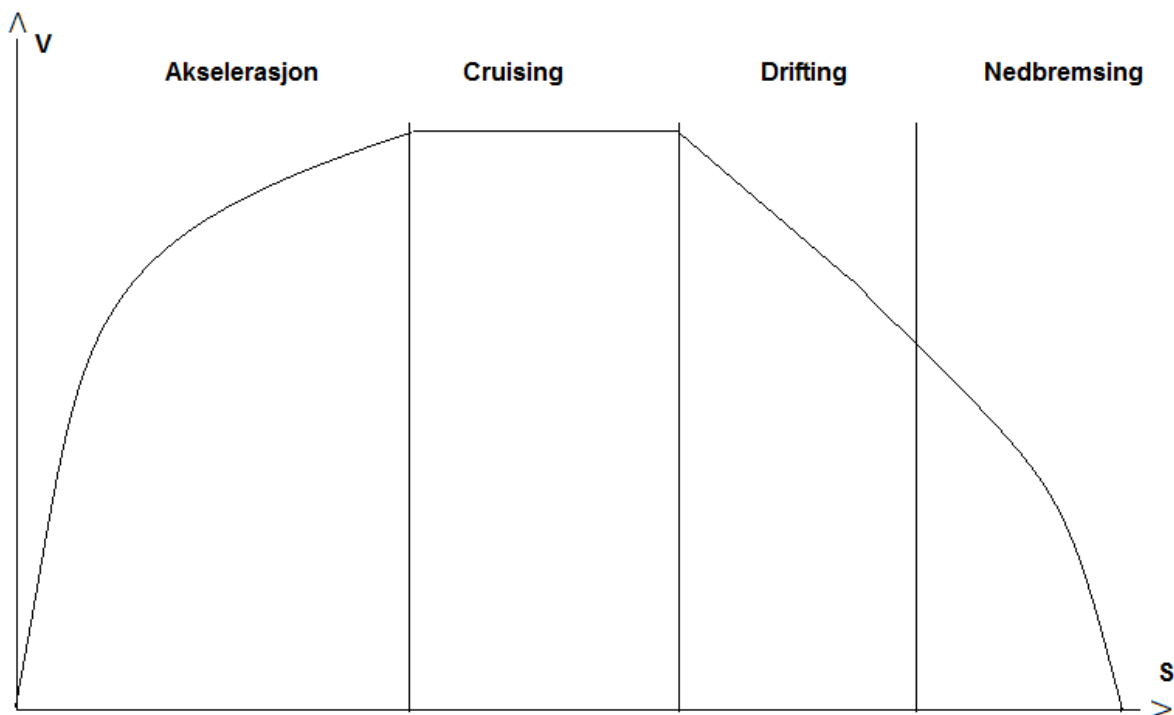


Figur 12: Blokktrapper og MT for etterfølgende tog *i* og *j*. Basert på Spöemann og Wendler (2010)

Som beskrevet tidligere vil BT, og dermed minste togfølgetid, i stor grad avhenge av hvor raskt et tog gjennomkjører blokkstrekningen. Det er dermed interessant å se på elementene som inngår i beregning av kjøretiden på en jernbanestrekning.

2.1.5 Kjøretidsberegninger

En togbevegelse kan ifølge Pachl (2015, s. 37-48) illustreres som vist i Figur 13, og de ulike områdene vil avhenge av trekkraften til toget, akselerasjon, kjøremotstand, bremsekraft og treghetskraft i toget (*inertial force*).



Figur 13: Elementer i en togbevegelse. Basert på Pachl (2015, s. 37-48)

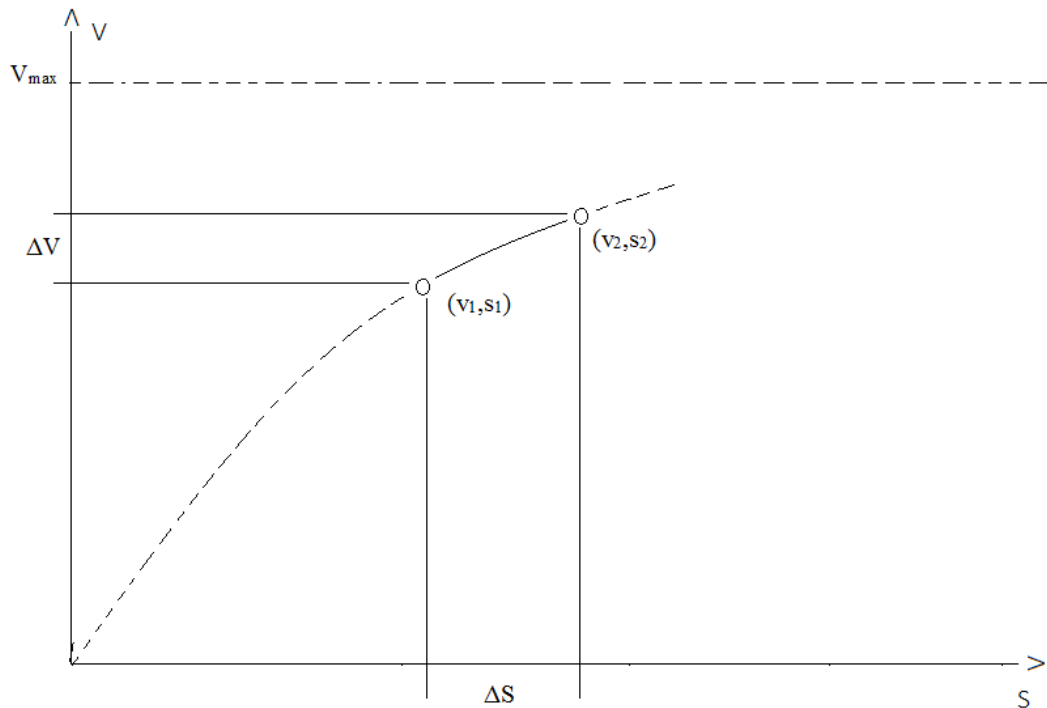
For å fastslå kjøretiden på en strekning er det ikke tilstrekkelig med en lineær interpolasjon fra avgangs- og ankomsttiden på stasjonene, da akselerasjonen til et tog ikke er konstant. Dette skyldes trekk-karakteristikkene til lokomotivet, og kjøremotstanden kan endres i korte intervaller på grunn av karakteristikkene i linjeføringen. Dette gjelder også ved kjøring etter akselerasjon (cruising og drifting i Figur 13), samt ved nedbremsing. Dette fører til at analytiske beregninger utført manuelt er umulig. Hastighetskurven blir heller tilnærmet stegvis ved hjelp av sekvenser av rette linjestykker. Nøyaktigheten vil følgelig avhenge av punkttettheten til polygonet (hastighetskurven) (Pachl, 2015, s. 37-48 og Hansen og Pachl, 2014, s. 65-77).

For beregning av neste punkt på kurven kan følgende to metoder benyttes:

- Hastighetsintervall (Δv)
- Avstandsintervall (Δs)

Et eksempel er skissert i Figur 14. Eksemplet viser tilfellet for bevegelse i akselereringsområdet (ref. Figur 13), men beregning ved øvrige områder av kurven følger samme prinsipp. Figuren viser både hastighetsintervall (Δv) og avstandsintervall (Δs). Fra hastighetskurven kan

kjøretiden beregnes ved numerisk integrasjon. For detaljert beskrivelse av kjøretidsberegninger vises det til Pachl (2015, s. 47-48).



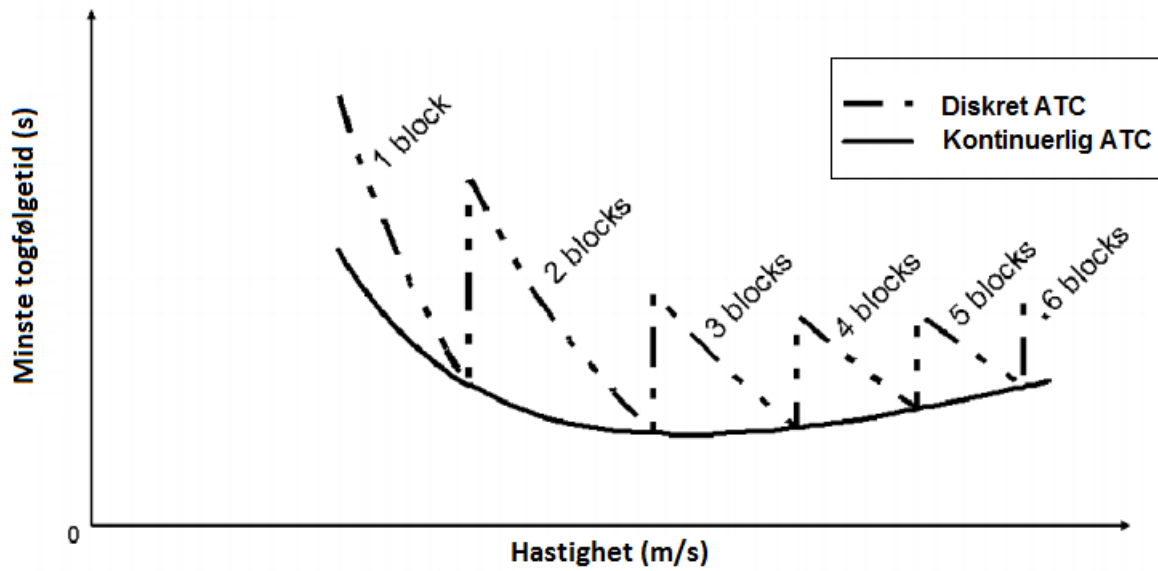
Figur 14: Tilnærming av hastighetskurve for kjøretidsberegninger ved Δv eller Δs . Basert på Pachl (2015, s. 37-48)

Dataprogrammet som benyttes for infrastrukturmodellen i denne oppgaven benytter Δv -steg, altså hastighetsintervall for å beregne kjøretiden på strekningen, og dermed kjøretiden gjennom blokkstrekningene. I programmet kan størrelsen på intervallene bestemmes. I denne oppgaven benyttes standardinnstillinger fra programmet på 5 km/t.

Tidligere i kapitlet ble eksterne innvirkninger og prosesser på jernbanedriften beskrevet (ref. Figur 5, s.10). Slike innvirkninger er man ikke i stand til å forutsi. En måte å minimere innvirkningen av dette er å legge til såkalte supplementer. Supplementene gir et kjøretidstillegg, og kan defineres som differansen mellom planlagt kjøretid og den minste kjøretiden på strekningen (Landex og Kaas, 2005). Supplementet øker robustheten til strekningen, men også kjøretiden.

Landex og Kaas (2005) har utviklet en metode for å beregne den mest egnede hastigheten på en jernbanestrekning med tett trafikk, og sier at den optimale hastigheten er når togfølgetiden er så kort som mulig. Metoden beregner den mest egnede hastigheten basert på bremselengder og informasjon om signal og sikringsanlegg. Basert på bremselengdene vil det være mulig å avgjøre MT. Figur 15 viser sammenhengen mellom hastighet og MT for to ulike ATC-systemer (*automatic train control*). For et kontinuerlig ATC-system er den optimale hastigheten et globalt minimum, og en hastighetsendring vil kun medføre små endringer i MT. For et diskret

ATC-system har hastigheten en større innvirkning på MT. Fra figuren ser man at selv en liten endring i hastigheten kan medføre en mye lengre MT, som følge av at bremselengden opptar en ekstra blokkstrekning. Når hastigheten er over den optimale hastigheten vil bremselengdene øke og oppta blokkstrekningen lenge. Dersom hastigheten er under optimal hastighet vil togene også oppta blokkstrekningen lengre enn nødvendig (optimalt sett).



Figur 15: Sammenhengen mellom MT og hastighet på en strekning. Fra Landex og Kaas (2005)

Figur 13 viser at kjøremotstand på linja er en avgjørende faktor for togframføring, og man kan forvente en påvirkning fra stigningsgraden på kjøretiden på strekningen. Figur 15 viser at hastighetsendring på strekningen kan føre til en mindre optimal hastighet, slik at MT øker. Fra sammenhengen mellom kapasitet og togfølgetid vist i Formel 12 (s. 11) vet man at dersom togfølgetiden påvirkes, vil også kapasiteten på strekningen påvirkes.

Teorien presentert i dette kapitlet danner bakgrunnen for denne oppgavens tema, som er sammenhengen mellom stigningsgraden og kapasiteten på en jernbanelinje. Videre presenteres forskning som er gjort på fagfeltet, før metode, gjennomføring og resultater for masteroppgaven presenteres.

2.2 State of the Art – Eksisterende forskning

I dette delkapitlet presenteres *State of the Art* innenfor forskning på kapasitet og vertikal linjeføring. Temaene omtalt i kapittel 1.2 utdypes, og studiet utvides. Kapitlet er delt inn i temaer for å gi en oversiktlig fremstilling av stoffet. Det vises til kapittel 4.1 for beskrivelse av identifiserte kapasitetspåvirkende parametere.

2.2.1 Kapasitet på en jernbanestrekning og metoder for å bestemme kapasiteten

Som diskutert i kapittel 2.1 er kapasitetsbegrepet definert på ulike måter. I denne oppgaven ser man på kapasiteten som antall tog per time.

Det er gjennomført en rekke studier som tar for seg kapasiteten på en jernbanelinje, og studiene har ulike formål. Dingler et al. (2009a) tar for seg kapasitet på en enkeltsporet linje, mens Lindfeldt (2011) og Sogin et al. (2012) ser på kapasiteten på dobbeltsporede strekninger. Landex (2011) tar for seg stasjonskapasitet. I denne oppgaven studeres kun kapasitet på en dobbeltsporet jernbanelinje.

Flere studier tar for seg metoder for å bestemme kapasiteten på en jernbanelinje, og evaluering av de metodene som eksisterer. Det blir ikke gitt en innføring i alle metodene og modellene, men enkelte av metodene kommenteres for å gi et bilde på hvor bredt kapasitetsbegrepet er.

Kaas (1998) ser på metoder for beregning av jernbanekapasitet, og har utviklet en kapasitetsmodell for overordnet, strategisk jernbaneplanlegging med mål om å identifisere større flaskehalsen i systemet. Abril et al. (2008) har utviklet en modell gir mulighet til å optimalisere rutetabeller og evaluere kapasitet for spor og stasjoner. Lindfeldt (2011) har utviklet en modell for å evaluere kapasiteten for ulike togmikser, mens Sogin et al. (2012) har benyttet et simuleringsverktøy for å studere effekten av ulike togmikser og prioriteringer av togene.

International Union of Railways (2004) har utarbeidet en universal metode for beregning av kapasitet. Metoden er presentert i *UIC code 406*, og har som formål å være en internasjonal standard for å vurdere kapasiteten og sørge for en felles forståelse av infrastrukturens kapasitet. Metoden tar for seg kapasitetsforbruk (*capacity consumption*) ved å komprimere en reell rutetabell slik at buffertiden forsvinner, og deretter evaluere mulige togleier for en linje, node eller korridor.

Generelt kan de ulike metodene for å studere kapasitet deles inn i analytiske metoder, simuleringsmetoder og optimaliseringsmetoder (Abril et al., 2008). Hansen og Pachl (2014, s. 47-63) beskriver at metodene har ulike bruksområder, avhengig av hva man skal studere og i hvilken tidshorisont man arbeider (korttids- eller langtidsplanlegging).

Det finnes flere programvareverktøy for hver av de tre tilnærmingene. For parameterstudiet i masteroppgaven benyttes et verktøy som heter LUKS (*Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken – analysis of lines and junctions*). LUKS kombinerer de tre ulike metodene beskrevet over ved å tilby ulike moduler av programmet. Anvendelsen av LUKS diskuteres i senere kapitler.

Det finnes altså mye forskning i forbindelse med kapasitetsberegninger, men per dags dato er det ikke noen bestemt/felles måte for hvordan kapasiteten skal beregnes og studeres. Som vist over har flere av studiene utviklet egne modeller, som hver har sine input- og outputparametere, og som alle er basert på egne antagelser og avveininger. I tillegg til metodene over finnes det parameter-modeller, som identifiserer og studerer enkelte parameteres påvirkning på kapasiteten. Dette er overførbart til denne masteroppgaven, og diskuteres i neste delkapittel.

2.2.2 Parameterstudier

Prokopy og Rubin (1975) utviklet den første kapasitetsmodellen basert på parameterstudier (Lai og Barkan, 2009). Modellen tar for seg en parameteranalyse av flere scenarioer i tilknytning til drift og fysiske anlegg (Prokopy og Rubin, 1975). Denne metoden er videreutviklet av Mitra et al. (2010) som illustrerer sammenhengen mellom enkelte parametere og kapasiteten på en strekning ved bruk av en multivariat regresjonsanalyse.

Krueger et al. (1999) utviklet Canadian National Railway Company (CN) *parametric line capacity* model. De kapasitetspåvirkende parametere grupperes som: 1) Anleggsparametere, 2) Trafikkparametere og 3) Driftsparametere. Modellen måler teoretisk-, praktisk-, benyttet³ og tilgjengelig⁴ kapasitet på en strekning for å identifisere flaskehalser og muligheter for økt trafikk. Lai og Barkan (2009) har videreutviklet modellen fra Krueger et al. (1999), og inkluderer blant annet moduler for kostnadsestimater og konsekvensanalyser.

En viktig studie når det gjelder identifisering av kapasitetspåvirkende parametere er gjort av Abril et al. (2008). De kapasitetspåvirkende parametere grupperes som hos Krueger et al. (1999). Studien presenterer også resultater fra kapasitetsberegninger gjort under påvirkning av de ulike parametere. Togets hastighet, ruteplanens heterogenitet, robustheten, og kommersielle stopp på strekningen trekkes fram som viktige parametere.

Felles for parameterstudiene beskrevet over er at ingen av dem inkluderer stigningsgraden som en selvstendig parameter som kan ha påvirkning på kapasiteten på en jernbanestrekning. Flere studier kommenterer imidlertid stigningsgraden. Mitra et al. (2010) sier at ved beregning av den teoretiske kapasiteten kan man se på idealiserte forhold, der et av disse idealiserte forholdene er at man antar at det ikke er noen signifikant stigningsgrad som vil føre til hastighetsvariasjoner. Av dette kan man tolke at det forventes en påvirkning fra stigning/fall på

³ Det opptredende trafikkvolumet

⁴ Differansen mellom benyttet og praktisk kapasitet

kapasiteten. Videre vil utnyttelsesgraden for praktisk kapasitet (ref. Tabell 4, s. 12) blant annet avhenge av terrenget, der et bratt terreng kan skape en flaskehals på strekningen, og påvirke mulig utnyttelsesgrad. Sogin et al. (2012) har eliminert stigningsgraden fra modellen, da stigningsgraden påvirker ulike togslag i forskjellig grad. Dingler et al. (2009b) trekker fram at jernbanekapasitet er et komplisert forhold mellom infrastruktur- og operasjonelle parametere. Operasjonelle parametere henger sammen med, og påvirkes av infrastrukturen. Stigningsgraden defineres som en del av infrastrukturen, og vil dermed betraktes som en påvirkende faktor.

2.2.3 Stigningsgrad og kapasitet

Hu et al. (2014) presenterer en studie som ser på effektene av vertikal stigning på en jernbanestrekning med tanke på kapasitet og kapasitetstap på strekningen. Hu et al. (2014) trekker frem at de ikke er kjent med noen forskning som omhandler modellering av vertikal linjekarakteristikk med hensikt å se på konsekvenser for kapasiteten. I studien blir vertikal stigning betraktet som en flaskehals der hastigheten reduseres og kjøretiden økes. Dette skyldes blant annet at gravitasjonskrefter gjør at et tog vil miste hastighet ved kjøring i motbakke.

Hu et al. (2014) utviklet en univariat og en multivariat log-lineær regresjonsmodell for å studere forholdet mellom kapasitetstap og stigning. Resultatene fra den univariate modellen viste at det er flere faktorer enn kun stigning på linjen alene som forårsaker kapasitetstap. I den multivariate modellen ble påvirkningen av strekningslengde og gjennomsnittshastighet studert sammen med stigningen. Resultatene fra disse analysene viste at økt stigning og strekningslengde ga større kapasitetstap, mens økt gjennomsnittshastighet hadde en positiv påvirkning på kapasitetstapet.

Lindahl (2001) har som en del av en større studie sett på konsekvensene av stigning og fall på en linje, samt konsekvenser av at godstog trafikkerer linjen. En stor stigning kan føre til redusert hastighet og linjekapasitet, behov for større bremskapasitet (aktuelt ved fall) og større signalavstand (aktuelt ved fall). Når det gjelder stigningsgraden i forhold til togets vekt er det viktig at lokomotivet kan sette toget i bevegelse fra full stopp, også i en stigning. Videre må toget kunne akselereres etter at det er satt i bevegelse. En treg akselerering av et godstog vil blokkere strekningen lenger og på denne måten påvirke kapasiteten til strekningen. Dersom stigningen er kort vil ikke dette være et stort problem, da toget har mulighet til å akselerere så fort det er ute av stigningen igjen. Det er verre hvis hele tog lengden får plass i stigningen, som omtalt i TR (Tabell 2, s. 4). Til slutt påpekes det at et tog må kunne bremse og stoppe innenfor angitt bremselengde ved kjøring i fall. En lang strekning med fall vil normalt øke bremselengden, og dermed signalavstanden. Lindahl (2001) sier at en studie på om anbefalt stigningsgrad er egnet med tanke på togets evne til å akselerere hurtig på en linje med tett trafikk og begrenset kapasitet bør gjennomføres.

2.2.4 Ulike mål for kapasitet

Studiene som er omtalt benytter forskjellige mål på kapasiteten. Parameterstudiene til Krueger et al. (1999) og Mitra et al. (2010) har begge målt kapasiteten på en strekning ut fra forsinkelse. Det samme gjelder studiene til Dingler et al. (2009b) og Sogin et al. (2012). Alle som følge av påvirkning fra ulike parametere. Som beskrevet tidligere hevder White (2006) at forsinkelse ikke er en egnet indikator for kapasitet. Dette skyldes at det ikke er en direkte sammenheng mellom forsinkelse og kapasitet.

White (2006) mener at tid er et bedre mål, og sier at det eksisterer en direkte sammenheng mellom tid, kapasitet og en effektiv drift. Tid er en viktig komponent av kapasiteten fordi et segment av en jernbanelinje kun kan romme ett tog av gangen, og kapasiteten på strekningen vil avhenge av varigheten et tog blokkerer en del av strekningen. *Blocking time diagrams* trekkes frem som en detaljert måte å avgjøre kapasiteten på. White (2006) sier at forsinkelse som mål på kapasiteten er unøyaktig, og at forsinkelsen på en strekning kan endres uten at kapasiteten på strekningen endres. Dette kan føre til at det trekkes uriktige konklusjoner vedrørende kapasiteten og nødvendig infrastruktur.

Schwanhäußer (1974) har imidlertid sett på kapasitet som en sammenheng mellom ventetid og kapasitet, og sier at ved maksimal kapasitetsutnyttelse (K_{teo}) vil ventetiden bli uendelig (det danens kø). På denne måten knyttes en direkte sammenheng mellom forsinkelse og kapasitet. Dette ble illustrert i Figur 7 (s. 13).

Hu et al. (2014) har sett på kapasitetstap som følge av økt stigning, og definerer kapasitetstapet som differansen mellom kapasiteten ved basis-tilfellet (null stigning) og tilfellet med positiv stigningsgrad. International Union of Railways (2004) ser på kapasitetsforbruk på en jernbanelinje, og beskriver hvor stor del av kapasiteten som er utnyttet på en gitt strekning.

2.2.5 Optimalisering av longitudinal (vertikal) linjeføring

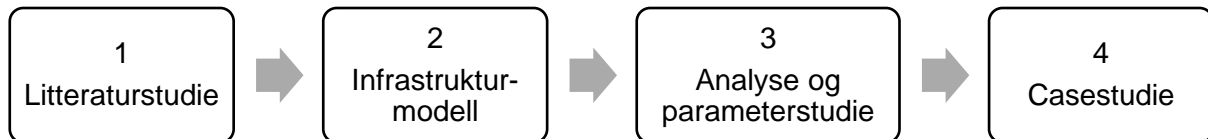
Bababeik og Monajjem (2012) har sett på optimaliseringen av longitudinal linjeføring med hensyn på bygge- og driftskostnader. De trekker frem viktigheten av å benytte en gunstig stigningsgrad, da en uheldig stigningsgrad kan føre til urimelige byggekostnader samt fremtidige driftshensyn som for eksempel begrensninger i godstrafikken og tap av kapasitet på strekningen.

Kim et al. (2013) har sammenliknet ulike vertikale linjeprofiler som forbinder to stasjoner på ulik høyde. Videre viser studien optimaliserte resultater for blant annet reisetid, maksimal hastighet, maksimal stigning, nødvendig trekkraft og bremskraft med tilhørende kostnader. Studien tar ikke for seg kapasiteten på jernbanelinjen, men ser på innvirkningen stigningsgraden har på de overnevnte punktene. Ved et større fall vil for eksempel toget akselerere hurtigere, som kan påvirke kjøretiden på strekningen og knyttes til kapasiteten på strekningen. Motsatt vil et tog i stigning bremse raskere, slik at bremsingen kan innledes senere.

Man ser at det finnes flere metoder å avgjøre og betegne kapasiteten på. Det finnes lite forskning som omhandler stigningsgradens direkte påvirkning på kapasiteten, men mange studier omtaler stigningsgradens påvirkning på kjøremotstanden. På bakgrunn av litteraturen som er gjennomgått i kapittel 2 presenteres nå metoden for denne masteroppgaven.

3. Metode

I dette kapitlet presenteres metodene som benyttes for å besvare problemstillingen til oppgaven. Metoden illustreres i Figur 16, som også danner grunnlaget for oppbyggingen av kapitlet. Til slutt i kapitlet vurderes valg av metode for denne oppgaven.



Figur 16: Prosess for gjennomføring av metode

Første steg i prosessen er å identifisere kapasitetspåvirkende parametere og velge ut analyseparametere. Dette ble gjort gjennom et litteraturstudie. I neste steg bygges en infrastrukturmodell som inkluderer de utvalgte parametere fra steg 1. Output-resultatene fra modellen bearbeides og benyttes som input-verdier i parameterstudiet i steg 3. Siste steg i prosessen er å studere funnene fra analysen ved hjelp av et casestudie.

Metoden som er valgt er basert på litteraturgjennomgangen, samt diskusjoner med veiledere rundt hva som vil være en best mulig tilnærming til problemstillingen. Metoden ble valgt da prosjektoppgaven ble skrevet høsten 2016 (Eggum, 2016), men er videreutviklet fra prosjektoppgaven ved at parameterstudiet gjennomføres på en mer systematisk måte ved å benytte et kjent forskningsdesign. Kapitlet holder en generell tilnærming, og for konkrete valg og karakteristikk vises det til kapittel 4.

3.1 Litteraturstudie

For å identifisere kapasitetspåvirkende parametere, samt å danne et teoretisk bilde over eksisterende forskning på fagfeltet ble det utført et litteraturstudie i forbindelse med prosjektoppgaven skrevet høsten 2016 (Eggum, 2016).

For å finne litteratur ble det benyttet søkemotorer og databaser fra universitetsbiblioteket. Søkeprosessen startet i Oria, der søkene ble konsentrert rundt følgende nøkkelord:

- Capacity AND "vertical alignment" AND rail*
- Capacity AND "vertical gradient" AND rail*
- "Parametric analysis" AND capacity AND rail*

Flere av søkene ga mange resultater, enkelte over 100 000. For å begrense antall treff ble søket ytterligere konsentrert ved å kombinere søkeordene på andre måter, og ved å benytte synonymer

til ordet, evt. ved å tilføre andre søkeord. Ettersom søkene ledet frem til relevante artikler, ble referanselistene til de mest aktuelle artiklene benyttet til videre søk. Eventuell sitering av litteraturen ble også studert. Det er gjennomført flere litteratursøk sporadisk gjennom våren 2017, med hensikt å gå fra et generelt syn til å tilspisse litteratur og teori rundt temaet til denne masteroppgaven.

Gjennom litteraturstudiet er det også valgt ut et visst antall parametere som er modellert og benyttet videre i parameterstudiet. Omtale av de identifiserte parametere, samt utvelgelsen av analyseparametere presenteres i kapittel 4.1.

3.2 Infrastrukturmodell og analysevarianter

De utvalgte analyseparametere fra steg 1 i Figur 16 implementeres i en numerisk infrastrukturmodell, der ulike kombinasjoner av parametere studeres ved ulike analysevarianter av strekningen i modellen. Infrastrukturmodellen bygges som en dummy-strekning, som vil si at strekningen ikke eksisterer i virkeligheten. Modellen bygges i et mikroskopisk dataverktøy, som kreves for å få eksakte kjøretidsberegninger (Hansen og Pachel, 2014, s. 47-63). Videre benyttes en deterministisk prosess for å undersøke den faktiske påvirkningen hver parameter har på kapasiteten på strekningen, eventuelt i kombinasjon med andre parametere. En deterministisk modell vil si at samtlige av parametere er definert av brukeren, slik at modellkjøringene ikke inneholder noen tilfeldige prosesser (Hansen og Pachel, 2014, s. 193). Output-verdien fra modellen er minste togfølgetid (MT).

Infrastrukturmodellen består av en analysestrekning som inneholder en fast infrastruktur som trafikkeres av et sett med forhåndsdefinerte tog etter en bestemt (eksempel)ruteplan. Modellstrekningen bygges i dataprogrammet LUKS, som er et akronym for det tyske navnet *Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken – analysis of lines and junctions*. For ytterligere informasjon om programmet vises det til Janecek og Weymann (2010). LUKS egnert seg som modellverktøy for denne masteroppgaven fordi det på en enkel og oversiktlig måte gir mulighet til å bygge en infrastruktur tilpasset analysevarianten som studeres. Programmet gir mulighet til nøyaktige studier av *blocking time model* (BTM), som er en viktig egenskap for denne oppgaven.

Hver analyseparameter studeres på to nivåer. Dette gir 2^n modellvarianter (der n er antall analyseparametere). Modellvariantene representerer samtlige kombinasjoner av hver parameter og tilhørende nivåer. Dette beskrives i neste delkapittel. Hver modellvariant baserer seg på en grunnmodell av analysestrekningen med egenskaper tilpasset aktuell analysevariant.

Formålet med denne masteroppgaven er å se på *trender* og *endringer* av kapasiteten. Det er derfor tilstrekkelig med en enkel infrastrukturmodell som representerer et generelt tilfelle av en jernbanestrekning. Kapittel 4.2 beskriver oppbygningen av infrastrukturmodellen, sammen med trafikksammensetningen på strekningen.

3.3 Analyse og parameterstudie

For å analysere sammenhengen mellom stigningsgrad og kapasitet på modellstrekningen bearbeides output-verdiene fra modellen (MT). De bearbeidede resultatene benyttes i et statistisk forsøksdesign kalt *full factorial design* (FFD). FFD gir mulighet til å studere effekten av flere uavhengige parametere på en avhengig parameter, der hver uavhengig parameter har mer enn ett nivå. Designet gir mulighet til å se hvilke parametere som gjør hva med hvilke responser på en økonomisk, oversiktlig og effektiv måte (Box et al., 2005 og Antony, 2014a). Det er ofte flere faktorer som påvirker en respons, men kun et fåtall vil være viktige (Lillestøl, 2000). For å si noe om hvilke analyseparametere som påvirker responsen mest beregnes såkalte effekter. Ved å studere effektene til de utvalgte analyseparameterne vil det gir svar på om stigningsgraden er en dominerende parameter eller ikke.

Videre beskrives inputverdiene som skal benyttes i FFD, før FFD beskrives ved hjelp av et eksempel.

Inputverdier – Midlere minste togfølgetid

Output-resultatene (MT) fra infrastrukturmodellen bearbeides før de benyttes som inputverdier, eller responser, i FFD. Siden modellstrekningen trafikkeres med ulike togslag må MT omregnes til *midlere* minste togfølgetid (MMT). Infrastrukturmodellen gjør ikke beregningen automatisk, og MT fra hver analysevariant omregnes til MMT ved beregningsmetoden beskrevet i kapittel 2.1.4 (Formel 15 og Formel 16, s. 15).

Forskningsdesign: 2ⁿ FFD

For å avgjøre hvor mye de utvalgte analyseparameterne påvirker kapasiteten på strekningen benyttes et såkalt full factorial design (FFD) med to nivåer (two levels full factorial design, 2ⁿ FFD). Dette er valgt fordi oppgaven tar for seg flere parametere som man ønsker å se effekten av, både enkeltparameteres påvirkning samt eventuelle samspillseffekter mellom parameterne.

2ⁿ FFD tar for seg n uavhengige parametere, som alle har to nivåer. Dette gir 2ⁿ eksperimenter med like mange responser (Box et al., 2005 og Antony, 2014a). Infrastrukturmodellen beskrevet i kapittel 3.2 ovenfor benyttes til å gjennomføre disse eksperimentene, med samtlige kombinasjoner av parameterne og tilhørende nivåer. Analysene gjennomføres på en systematisk måte ved hjelp av en designmatrise (DM).

Videre i dette kapitlet blir det gitt en innføring i 2ⁿ FFD. Teksten er basert på litteratur fra Box et al. (2005), Antony (2014a), Lillestøl (2000) og American Society for Quality (2017).

For å illustrere forskningsdesignet benyttes et eksempel med to parametere, X_1 og X_2 , som studeres på to nivåer. Parameterne gis en maksimum- og en minimumsverdi, representert ved henholdsvis $X_{1\max}$, $X_{2\max}$ og $X_{1\min}$, $X_{2\min}$. For videre arbeid kodes disse verdiene med et pluss-

nivå (+1) for maksverdiene og en minus-nivå (-1) for minimumsverdiene. Parameterne med tilhørende nivåer og koding er vist i Tabell 6.

Tabell 6: Nivåinndeling for analyseparametere

<i>Parameter</i>	<i>Nivå</i>	
	+1	-1
<i>X1</i>	$X1_{\max}$	$X1_{\min}$
<i>X2</i>	$X2_{\max}$	$X2_{\min}$

Tabell 7 viser DM for parameter X1 og X2 med responsen som studeres (R). DM viser en oversikt over alle mulige kombinasjoner av høyt og lavt nivå for hver analyseparameter, representert ved kodene beskrevet over. Antall gjennomføringer, og mulige kombinasjoner av analyseparametere med tilhørende nivåer er 2^n , som i dette eksemplet blir $2^2=4$. Radene viser antall modellkjøringer, og man observerer at ved fire modellkjøringer har man studert alle mulige kombinasjoner av parameterne med tilhørende to nivåer.

Tabell 7: Designmatrise (DM)

<i>Modellkjøring nr.</i>	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>Respons</i>
1	-1	-1	R1($X1_{\min}, X2_{\min}$)
2	-1	+1	R2($X1_{\min}, X2_{\max}$)
3	+1	-1	R3 ($X1_{\max}, X2_{\min}$)
4	+1	+1	R4 ($X1_{\max}, X2_{\max}$)

DM utvides til en matrise som representerer kontrastkoeffisientene (en såkalt table of contrast coefficients, forkortet TCC videre). TCC viser hver enkelt parameter (X1 og X2) og interaksjonene mellom dem (X1X2), beskrevet ved kontrastnivåene +1 og -1. Matrisen benyttes til å finne hoved- og samspillseffektene til parameterne. Matrisen kalles table of contrast coefficient fordi man ved beregning av hoved- og samspillseffekter ser på differansen, eller kontrasten, mellom gjennomsnittet av positive og negative verdier ($\overline{R_+}$ og $\overline{R_-}$) for hver parameter og interaksjon. Dette er vist i Formel 19. Tabell 8 viser TCC.

$$Effekt = \overline{R_+} - \overline{R_-}$$

Formel 19

Tabell 8: TCC (Table of contrast coefficient)

	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X1X2</i>	<i>Respons</i>
	-1	-1	+1	R1
	-1	+1	-1	R2
	+1	-1	-1	R3
	+1	+1	+1	R4
<i>Nevner</i>	2	2	2	

De første tre kolonnene indikerer hvilke responser som beregnes som et positivt gjennomsnitt ($\overline{R_+}$) og hvilke som beregnes som et negativt gjennomsnitt ($\overline{R_-}$). De to første kolonnene er fra DM (Tabell 7), og representerer parameter X1 og X2 ved kodede nivåer. Neste kolonne representerer interaksjonen mellom parameter X1 og X2. Kodingen for denne kolonnen er representert ved produktet av de respektive faktorene X1 og X2. Dette er en viktig egenskap for TCC, der man generelt kan si at kolonnene til interaksjonseffektene oppnås ved å multiplisere kolonnene med kodene for sine respektive parametere. Dersom man for eksempel studerer 3 parametere X1, X2, X3 (2^3 full factorial design) vil man oppnå kolonnen med koding for interaksjonen X1X2 som produktet av kolonnene til X1*X2 og interaksjonen X1X2X3 som produktet av kolonnene til X1*X2*X3.

Den siste kolonnen i TCC inneholder responsene, R, fra eksperimentkjøringene. Beregningen av hoved- og samspillseffektene er vist i Formel 19. Ved å se på produktet av kolonnen med responser og kolonnen for hver parameter (evt. interaksjoner) fra Tabell 8 får man positive eller negative responser. Gjennomsnittene ($\overline{R_+}$ og $\overline{R_-}$) beregnes ved å dividere summen av positiv eller negativ respons på en nevner. Nevneren er basert på de positive og negative nivåene til hver parameter (evt. interaksjon). Beregningene vises i Tabell 9.

Nevneren vises i den nederste raden i TCC. Nevneren for beregning av effektene vil være summen av alle positive eller negative koder i den respektive kolonnen. Nevneren beregnes som 2^{n-1} som følge av TCC. I dette eksemplet får man dermed nevnerer som vist i Tabell 9, der X1 og X2 og interaksjon mellom parametere (X1X2) har nevner $2^{2-1}=2$.

Hoved- og samspillseffektene beregnes altså ved å multiplisere verdiene fra kolonne X1, X2 og X1X2 sammen med kolonnen for respons. Deretter beregnes differansen av det positive gjennomsnittet og det negative gjennomsnittet, med tilhørende nevnerer som beskrevet over. Man kan si at hovedeffekt X1 er den gjennomsnittlige forskjell i responsen fra å gå fra lavt til høyt nivå for X1 for de to nivåene for X2. Hovedeffekten X2 er den gjennomsnittlige forskjell i responsen fra å gå fra lavt til høyt nivå for X2 for de to nivåene for X1. Samspillet X1X2 er forskjellen i endring fra lav til høyt for X1 for hhv. lav og høy for X2.

Beregningene av effektene for dette eksemplet vises i Tabell 9, basert på Formel 19.

Tabell 9: Beregning av hoved- og samspillseffekter

<i>Parametere</i>	<i>Effekter</i>
$X1$	$\frac{(+1) \cdot R3 + (+1) \cdot R4}{2} - \frac{(-1) \cdot R1 + (-1) \cdot R2}{2}$
$X2$	$\frac{(+1) \cdot R2 + (+1) \cdot R4}{2} - \frac{(-1) \cdot R1 + (-1) \cdot R3}{2}$
$X1X2$	$\frac{(+1) \cdot R1 + (+1) \cdot R4}{2} - \frac{(-1) \cdot R2 + (-1) \cdot R3}{2}$

Beregningene gir svar på hvilke effekter som har stor påvirkning på responsene, og hvilke som er såkalte inaktive parametere. De generelle sammenhengene er vist i vedlegg 4.

Metoden som er beskrevet benyttes i masteroppgaven, men inkluderer flere parametere. For å vurdere om effektene er statistisk signifikante plottes hver av de beregnede effektene som en normalfordeling (*normal probability plot*, NPP). Dersom effektene skyldes tilfeldigheter vil punktene ligge omtrent på linje, mens signifikante effekter vil ha et tydelig avvik fra linjen.

3.4 Casestudie for å undersøke funn fra LUKS

Det gjennomføres et casestudie for å undersøke de teoretiske sammenhengene funnet fra LUKS og parameterstudiet. Casestudiet skal besvare det siste forskningsspørsmålet presentert i kapittel 1.3:

Hva er konsekvensen av de teoretiske funnene fra LUKS og parameterstudiet for kapasiteten og kjøretiden på en planlagt jernbanestrekning?

Ved hjelp av metodene beskrevet utarbeides det en teori som sier noe om hvilke parametere som påvirker kapasiteten på jernbanestrekningen mest, og om stigningsgraden er en påvirkende parameter. Teorien er dannet på grunnlag av analyser gjort på en dummy-strekning, og med forhold tilpasset infrastrukturmodellen. Strekningen i casestudiet tar for seg en mindre idealisert situasjon. Strekningen baseres på en utredningsrapport for en strekning på Bergensbanen (Jernbaneverket, 2016), og eksisterer kun i planstadiet. Formålet med casestudien vil dermed være å benytte resultatene fra de gjennomførte analysene til å vurdere kapasiteten til den planlagte strekningen. På denne måten kan man si noe om begrensninger og muligheter til strekningen. Dersom casestrekningen fantes i virkeligheten kunne det blitt gjennomført et feltforsøk og sammenlignet en reell situasjon med resultatene fra denne oppgaven.

Casestudiet tar for seg en strekning hvor situasjonen vedrørende krav til maksimal stigningsgrad fra TR er erfart. Strekingen som studeres innebærer en høydeforskjell på ca. 570 meter. Høydeforskjellen skal overvinnes ved å benytte regelverkets minstekrav på 20‰, og strekingen er i konstant stigning eller fall. Dette gir mulighet til å studere om teoriene som er dannet fra parameterstudiet også stemmer i tilfellet med konstant stigningsgrad.

Strekingen fra utredningsrapporten modelleres og studeres i LUKS, og det gjennomføres kapasitets- og kjøretidsberegninger for å studere konsekvensen av en kontinuerlig stigningsgrad. Resultatene sammenliknes med en referansestreking fra parameterstudiet.

3.5 Vurdering av metode

Resultatene i en studie vil alltid avhenge av hvordan oppgaven er løst, og hvilke metoder som ligger til grunn.

Denne oppgaven baserer seg i stor grad på subjektive valg. Dette gjelder både parameterne som er vurdert i litteraturstudiet, parameterne som er inkludert som analyseparametere, hvordan infrastrukturmodellen er bygget opp samt karakteristikkene for de to nivåene hver analyseparameter studeres på. Andre valg vil gi forskjellige resultater enn de som presenteres i denne studien. En svakhet ved den valgte metoden er dermed at det må foretas mange subjektive valg, noe som gjør at resultatene vil variere.

Videre er en modell en forenkling av virkeligheten. Forenklingen er imidlertid nødvendig for å studere de egenskapene som er interessante for studien som gjennomføres. Modellen som er benyttet i denne oppgaven er tilstrekkelig for oppgavens formål.

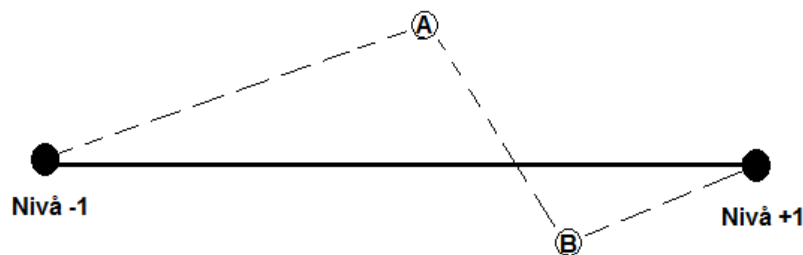
Output-resultatene fra modellen leses av manuelt, noe som innebærer unøyaktigheter. Dette vil imidlertid dreie seg små avrundingsavvik, og er ikke utslagsgivende for resultatene. Oppgaven er basert på en deterministisk, konstant modell. Ved å benytte en annen analysemetode, for eksempel en simuleringsmetode, blir stokastiske prosesser inkludert.

En fordel med det valgte forskningsdesignet i denne oppgaven er at det er en utbredt og velanvendt metode som er godt dokumentert. Det finnes mye litteratur om metoden, samt studier som har benyttet seg av den. Det valgte forskningsdesignet gir mulighet til å se effekten av samtlige av de valgte analyseparametere, samt samspillseffekter mellom dem. Dette gjør at man får et bredt bilde på hvilke av parameterne og eventuelle kombinasjoner av dem som har størst negativ påvirkning på kapasiteten på strekingen. Det finnes statistiske programmer som utfører slike beregninger, men i denne oppgaven er Excel benyttet.

Det valgte forskningsdesignet er imidlertid best egnet når antall analyseparametere er mindre eller lik fire. Dette skyldes at antall eksperimentgjennomføringer blir stort ved flere parametere (Antony, 2014a). Da denne oppgaven inneholder flere analyseparametere kunne et *fractional factorial design* blitt benyttet. *Fractional factorial design* antar at interaksjonseffekter fra tre

eller flere parametere ikke er vesentlige, og beregner hoved- og samspillseffekter mellom to parametere på bakgrunn av deler av et FFD. Dette minimerer antall eksperimentkjøringer (Antony, 2014b).

Det anvendte forskningsdesignet innebærer valg av nivåer for hver analyseparameter. Resultatene er sensitive på valg av nivåer, siden det antas en lineær sammenheng mellom de to nivåene. Ved å benytte to nivåer istedenfor tre eller flere vil man risikere å miste effekter som ligger utenfor lineariteten. Dette er illustrert i Figur 17, der man ved å studere to nivåer (-1 og +1) går glipp av A og B. Forskningsdesignet *fractional factorial design* kunne igjen vært benyttet for å studere enkelte parametere på flere nivåer.



Figur 17: Nivåer og linearitet for 2^n FFD

Alternativet til det valgte forskningsdesignet er å studere en og en parameter av gangen, der en parameter endres mens de andre holdes konstante i tur og orden. Dette er en tidkrevende prosess sammenlignet med det anvendte forskningsdesignet, og man får kun et estimat av effektene til en enkelt parameter ved utvalgte og faste betingelser for de andre parameterne (Box et al., 2005). I FFD som anvendes i denne oppgaven benyttes alle observasjonene for å beregne hver av hovedeffektene.

Når det gjelder det mer overordnede valget om å studere stigningsgradens påvirkning på kapasiteten ved et parameterstudie, er dette en ofte anvendt metode (ref. kapittel 2.2.2). Abril et al. (2008) sier at variasjon i ulike parametere enten vil øke eller minke kapasiteten på forskjellige måter. Dette støtter opp under valget om å identifisere ulike parametere som kan ha innvirkning på systemet, og videre analysere enkelte av parameterne. Hu et al. (2014) sier at det er flere parametere som påvirker kapasiteten enn kun stigningsgraden alene. Det er derfor viktig å gjennomføre et parameterstudie der man studerer kombinasjoner av og interaksjoner mellom flere parametere, slik som det er gjort i denne oppgaven. Dette diskuteres i kapittel 6.

4. Planlegging og gjennomføring

I dette kapitlet presenteres planlegging og gjennomføring av arbeidet med masteroppgaven. Kapitlet er omfattende, da det presenterer selve arbeidsprosessen med masteroppgaven. Kapitlet er bygget opp i samsvar med metoden presentert i kapittel 3. Identifisering og utvelgelse av analyseparametere beskrives først. Neste del presenterer en detaljert oppbygning av infrastrukturmodellen. Resultatuttak fra modellen presenteres, samt hvordan output-resultatene bearbeides til MMT før de videre benyttes i parameterstudiet. Videre beskrives gjennomføringen av parameterstudiet. Til slutt i kapitlet presenteres casestudiet.

Delkapitlene er delt inn i temaene *planlegging* og *gjennomføring*. Det er fokusert på å redegjøre for valg og avveieringer som er gjort underveis i arbeidet med masteroppgaven som ikke kommer fram i den vitenskapelige artikkelen.

4.1 Identifiserte parametere

I dette kapitlet presenteres parametere som ble identifisert gjennom litteraturstudiet og vurdert til å kunne ha en påvirkning på kapasiteten på en jernbanestrekning. Hver parameter presenteres, med en beskrivelse av forholdet til kapasiteten. Til slutt tar kapitlet for seg utvelgelsen av analyseparametere som skal benyttes i parameterstudiet.

4.1.1 Kapasitetspåvirkende parametere

Det ble identifisert flere parametere gjennom arbeidet med prosjektoppgaven høsten 2016 (Eggum, 2016) og masteroppgaven våren 2017. Presentasjonen av parametere er basert på litteraturgjennomgangen og diskusjon med veiledere for denne masteroppgaven. De viktigste bidragene for identifisering av parametere er skrevet av Krueger et al. (1999), Mitra et al. (2010) og Abril et al. (2008). Parametere er gruppert og presentert som følger:

- Fysiske parametere
- Infrastrukturparametere
- Trafikkparametere
- Driftsparametere

Fysiske parametere

Stigning og fall: Som beskrevet i kapittel 2 påvirker stigningsgraden på en strekning bremse- og akselerasjonsegenskapene til et tog. Ved en positiv stigningsgrad påføres toget en større motstand, mens ved en negativ stigningsgrad blir toget «dyttet» fremover av gravitasjonskomponenten. Økt tidsbruk i forbindelse med akselerasjon vil føre til økt kjøretid på strekningen, og fall kan føre til lengre blokkstrekninger. Dette kan føre til tap av kapasitet, og sammenhengene skal studeres i denne masteroppgaven. Hu et al. (2014) har omtalt en positiv stigningsgrad som en flaskehals, der hastigheten reduseres og kjøretiden øker. Stigningsgraden

til en jernbanestrekning er også omtalt av Dingler et al. (2009b), som i sin studie sier at jernbanekapasitet er et komplisert forhold mellom infrastruktur- og operasjonelle parametere. Stigningsgraden er omtalt som en del av infrastrukturen, og betraktes dermed som en påvirkende faktor.

Vekt: Vekten av toget betegnes som tonnasje (brutto masse et lokomotiv trekker). Tonnasjen begrenses blant annet av stigningsgrad, adhesjon og trekkraften til lokomotivet (Boysen, 2014).

Adhesjon: Som beskrevet i kapittel 2.1 er jernbanen et såkalt stål-mot-stål system, der adhesjonen er en avgjørende faktor for tilgjengelig trekkraft og bremsekraft. Adhesjonen påvirker bremseegenskapene til toget, og dermed bremselengdene.

Trekkraft: Trekkraften et tog har tilgjengelig for start, akselerering og konstant bevegelse er omtalt i kapittel 2.1, og vil påvirkes av adhesjonsforholdene og tilgjengelig motorkraft. Trekkraften påvirkes av kjøremotstandene toget møter, og toget må overvinne motstandene for å ha nok trekkraft for å starte, akselerere og holde toget i konstant bevegelse.

Motstander: Motstandene et tog møter er beskrevet i kapittel 2.1. Stigningsmotstanden er viktig i denne oppgaven, da man forventer at stor stigning vil medføre en tregere akselerasjon, mens et stort fall medfører raskere akselerasjon og lengre bremselengder.

Aksellast: Aksellast er den statiske bruttolasten per hjulsett. Jo høyere tillatt aksellast desto høyere brutto masse og nyttelast. Ved økt tillatt aksellast vil dermed vekten, eller tonnasje, av toget kunne øke. Dette vil imidlertid begrenses av stigningsgraden.

Infrastrukturparametere

Lengde på analysestrekningen: En strekning defineres som en del av en linje der trafikksammensetningen og antall tog, samt infrastrukturen og signaleringen ikke varierer fundamentalt (International Union of Railways, 2004). Ettersom lengden på strekningen øker, vil gjennomkjøringstiden også øke (Krueger et al., 1999). På denne måten vil analysestrekningens lengde ha en direkte påvirkning på kapasiteten. Lange analysestrekninger blir sett på som flaskehalser i systemet og er en begrensende faktor for den samlede kapasiteten (Abril et al., 2008). Kjøretiden mellom to stasjoner er et annet mål på analysestrekningens lengde (Mitra et al., 2010), men kjøretiden avhenger også av togkarakteristikker og tillatt linjehastighet.

Enkelt- eller dobbeltspor: Kapasiteten på en jernbanestrekning påvirkes av om det er enkelt- eller dobbeltsporet drift på strekningen. En dobbeltsporet jernbanestrekning har ca. fire ganger så stor kapasitet som en enkeltsporet strekning (Abril et al., 2008). Krueger et al. (1999) og Mitra et al. (2010) har definert prosentandel med dobbeltspor på analysestrekningen som en parameter. I denne oppgaven studeres kun kapasiteten for en dobbeltsporet jernbanestrekning (alle tog går i samme retning, etter hverandre).

Type signal- og blokk-system: Formålet med signaler er å sørge for en sikker separasjon av togene. Signalene utvider også førerens sikt slik at hastigheten på strekningen kan øke (Abril et al., 2008). Ved et fastblokk-system er togets posisjon kjent som følge av blokkstrekningen det blokkerer, og kun ett tog kan oppholde seg i en blokkstrekning av gangen. Viktige faktorer for et slikt signalsystem er blokkstrekningens lengde samt togets hastighet og lengde. Ved å øke antall signalaspekter kan kapasiteten også øke, som omtalt i kapittel 2.1. Togene må alltid følge minste togfølgetid.

Alternativt til fastblokk-system er rullende eller dynamisk blokk (*moving block*), som kan tillate en avstand mellom to tog ned mot en dimensjonerende bremselengde (Skartsæterhagen, 1993). Dette krever et effektivt kommunikasjonssystem, og tar ofte i bruk førerrom-signalering (*cab-signalling*) som gir lokfører kontinuerlig informasjon om blant annet hastighet og avstand til foregående tog.

Nettverkseffekt og definerte ruter: En analysestrekning kan aldri betraktes som en uavhengig del av et nettverk. Dette skyldes at det eksisterer overlappende jernbanelinjer og kryssinger. Kapasiteten på en strekning kan altså ikke fastslås uten å vurdere hva som er tilfellet ved slike krysningspunkt (konfliktpunkt). Strekningen som analyseres i denne oppgaven er en dummy-strekning, og man ser bort fra tilstøtende spor og nettverkseffekt.

Linjehastighet: Lovlig hastighet på strekningen er av betydning for kapasiteten. Økt gjennomsnittlig hastighet vil øke kapasiteten, fordi gjennomkjøringstiden minker. Ujevn hastighet mellom togene som følge av togets egenskaper vil minske kapasiteten (heterogen trafikksammensetning). Hastighet kan defineres som en trafikkparameter (Mitra et al., 2010, Krueger et al., 1999) eller som en infrastrukturparameter (Abril et al., 2008). Linjehastigheten beskrives under infrastrukturparameterne, siden skiltet hastighet er en del av infrastrukturen i modellen (beskrives i kapittel 4.2).

Landex og Kaas (2005) har sett på optimal hastighet for en linje med tett trafikk (beskrevet i kapittel 2.1.5), og sier at den optimale hastigheten er der hvor togfølgetiden er minst. Togfølgetiden avhenger blant annet av togets bremselengder, som igjen påvirkes av togets hastighet. Man kan dermed se at en høy hastighet på en strekning også kan føre til lange bremselengder og dermed lavere kapasitet.

Sidespor (Sidings): Sidespor, eller vikespor, er steder der tog møtes, kjører forbi eller krysser. Slike spor er viktige ved en heterogen trafikksammensetning og ved ulik prioritering av tog, og påvirker kapasiteten på strekningen. Økt avstand mellom slike sidespor øker forsinkelsen på linja. Videre må sidesporet være langt nok til at hele toget får plass i avvik, og en økt lengde på sidesporet øker kapasiteten på strekningen. En ujevn fordeling av sidesporene vil øke forsinkelsen og redusere kapasiteten (Mitra et al., 2010 og Krueger et al., 1999).

Hastighet ved møte med stigningsgraden: Hastigheten ved møte av stigningsgraden vil være avhengig av plasseringen av stigningsgraden. Dersom toget møter en stigning mens det fortsatt er i akselerasjon, vil det medføre en økt motstand på toget og kreve mer trekkraft. Det vil dermed benytte tilgjengelig trekkraft både til å akselerere toget, samt å overvinne stigningen. Dersom toget møter et fall mens det fortsatt er i akselerasjon, vil det kreve mindre motorkraft siden fallet bidrar til hastighetsøkning for toget. Dette kan redusere kjøretiden på strekningen (Kim et al., 2013).

Dersom toget møter stigningen eller fallet etter at det har nådd sin maksimale hastighet, vil påvirkningen avhenge av tilgjengelig trekkraft. Fra kapittel 2.1.2 har man at dersom trekkraften F er mindre enn den totale motstanden F_{RT} ($F < F_{RT}$) vil toget oppleve en nedbremsing. Dette kan skje ved store stigninger. Dersom toget møter et fall etter at det har nådd linjehastigheten vil det måtte bremse ned.

Retning: Denne parameteren sier noe om hvilken retning togene trafikkerer jernbanestrekningen, og vil avgjøre om det er stigning eller fall på analysestrekningen. Parameteren avgjør dermed om det er akselerasjonsegenskapene eller bremseegenskapene som påvirkes av stigningsgraden, som igjen kan påvirke kapasiteten på strekningen.

Trafikkparametere

Togtype: Togmateriell er en parameter som inneholder flere av de fysiske parameterne beskrevet. Parameteren inkluderer type lokomotiv eller motorvognsett, med togets bremseegenskaper og tilgjengelig trekkraft. Parameteren vil innebære en hastighetsvariasjon for ulike togtyper.

Toglengde: Maksimal toglengde begrenses blant annet direkte av bremseegenskapene til toget. Praktisk toglengde begrenses også indirekte av maksimal tonnasje (Boysen, 2014). Toglengden inngår direkte i begrepet for togfølgetid, fordi et langt tog vil blokkere en blokkstrekning lengre (Skartsæterhagen, 1993). Dette vises også av elementene som inngår i BT, der toglengden avgjør tiden det tar å rydde blokkstrekningen. Dette ble vist i Figur 11 (s. 19). Lengre tog vil være viktig for fraktekapasiteten⁵ på jernbanenettet, og med tanke på økonomiske aspekter for godsoperatører (Boysen, 2014).

Ny eller eksisterende jernbanelinje: Ved studier av eksisterende jernbanestrekninger er det flere begrensninger som allerede foreligger, og det blir et spørsmål om ledig/tilgjengelig kapasitet når ny trafikk skal tilrettelegges for (Abril et al., 2008).

Togmiks (heterogenitet): Den kapasitetsmessige beste situasjonen for en jernbanestrekning finner sted når samtlige tog som trafikkerer strekningen holder samme hastighet, som illustrert i Figur 9 (s. 15). Heterogen trafikk på strekningen fører til en hastighetsdifferanse mellom

⁵ Masse- og volumtransport

togene, noe som påvirker togfølgetidene til de ulike togslagene. Dette påvirker kapasiteten direkte (ref. Formel 12, s. 11). Ulik hastighet vil også kreve forbikjørings- og kryssingsmuligheter, noe som vil redusere trafikkflyten (Abril et al., 2008). Denne parameteren ofte omtalt i litteraturen, og det er utført egne kapasitetsstudier hvor kun innvirkningen av togmiksen på kapasiteten er studert (for eksempel Sogin et al. (2012)). Skartsætherhagen (1993) presiserer at hastighetsdifferansen kan skyldes både ulik topphastighet og ulikt stoppmønster.

Hastighetsprofil: Med hastighetsprofil menes om toget entrer og forlater analysestrekningen i sin maksimale hastighet (såkalt *flying start*), eller om toget starter fra stillstand og akselererer seg opp i hastighet fra starten av analysestrekningen og bremses ned til full stopp ved strekningens slutt. Denne parameteren illustrerer påvirkningen av akselerasjon og bremsing inne på analysestrekningen.

Gjennomsnittlig minste kjøretid og gjennomsnittlig hastighet: Gjennomsnittlig minste kjøretid påvirkes direkte av gjennomsnittlig hastighet. Høyere gjennomsnittlige hastigheter reduserer forsinkelser og gjennomkjøringstid, fordi et hurtiggående tog blokkerer strekningen kortere enn et saktegående tog. Gjennomsnittlig kjøretid påvirkes blant annet av topografien på strekningen (Krueger et al., 1999).

Rutetabell: Markedsmessig er det ønske om en såkalt periodisk rutetabell, der tog av samme slag har et fast intervall mellom avgangene. For å oppnå best mulig kapasitet er det imidlertid best med puljekjøring, der tog av samme slag (like karakteristikk) kjører etter hverandre. Dette kan knyttes til heterogen trafikksammensetning, som diskutert tidligere.

Traffic peaking factor – rushtid: Ved rushtider kan trafikknivået overstige trafikkvolumet som er bærekraftig med tanke på hva systemet kan opprettholde på en pålitelig måte. Systemet overbelastes i en kort periode, men vil gjenopprette et punktlig nivå i tiden utenom rushperioden (Abril et al., 2008). Dette kommer frem av utnyttelsesgradene for praktisk kapasitet som ble presentert i Tabell 4 (s. 12). Schwanhäußer (1974) presenterer utnyttelsen av kapasiteten og robustheten til systemet som en eksponentiell sammenheng (Figur 7, s. 13), slik at jo mer kapasiteten utnyttes desto lavere blir påliteligheten.

Prioritet: Hvilke tog som prioriteres spiller en viktig rolle og avgjøre hvilke tog som vil oppleve forsinkelser. Prioriteringer fører til økte forsinkelser i nettverket, som igjen fører til lavere kapasitet (Abril et al., 2008, Krueger et al., 1999, Mitra et al., 2010). Sogin et al. (2012) sier at lik prioritet medfører at flere tog kan forflyttes gjennom nettverket og at de totale forsinkelsene minskes.

Driftsmessige parametere

Avbrytelser/forstyrrelser på strekningen: Forstyrrelser og driftsavbrudd på strekningen kan skyldes både planlagte og ikke planlagte hendelser. Typiske planlagte avbrudd skyldes vedlikehold. Her kreves det at strekningen stenges av for vanlig trafikk i en viss periode. Dette vil direkte redusere antall timer som er tilgjengelig for togframføring i løpet av en dag (Abril et al., 2008, Krueger et al., 1999 og Mitra et al., 2010).

Dersom vedlikeholdsarbeidet finner sted langt unna et kryssings- eller forbi kjøringsspor, vil det føre til at arbeidsutstyret belegger strekningen lenge uten at øvrige tog kan passere. Arbeidsutstyr er ofte tunge maskiner med lav hastighet, noe som også vil påvirke kapasiteten. Tidligere i oppgaven er det diskutert at godstog vil ha problemer med å overkomme store stigninger på en strekning. Det samme vil være tilfellet for arbeidsmaskiner. Krueger et al. (1999) betegner situasjonen omtalt som en egen parameter: midlertidige *slow orders*. Slike saktegående maskiner/kjøretøy genererer to typer forsinkelser: 1) tap som følge at de kjører saktere enn vanlig hastighet og 2) fordi de har en tregere akselerasjon og retardasjon enn togene som vanligvis trafikkerer strekningen. Avbrudd kan også skyldes uforutsette hendelser som ulykker, skinnebrudd og lignende.

Stoppetiden til togene: Hvor lang tid et tog står stille på strekningen vil direkte påvirke hvor lang tid toget blokkerer analysestrekningen.

Antall stopp på strekningen: Ved å redusere antall stopp på strekningen vil gjennomsnittlig hastighet øke, fordi stopp på strekningen innebærer nedbremsing og akselerasjon. Denne parameteren kan også knyttes til togmiksen, da ulikt stoppmønster også kan føre til hastighetsdifferanser.

Kvalitet på togtilbudet, robusthet: Kvaliteten og robustheten til togtilbudet avhenger av utnyttelsesgraden til kapasiteten på strekningen (ref. Tabell 4, s. 12). Dersom kapasiteten utnyttes ut over en gitt metningsgrense vil forsinkelser oppstå, som illustrert i Figur 7 (s. 13). På denne måten vil kapasiteten på strekningen avhenge av hvor pålitelig system som skal driftes. Hvis forsinkelser er akseptabelt, kan kapasiteten utnyttes nærmere grensen for den teoretiske kapasiteten (Schwanhäußer, 1974, Kaas, 2000 og Abril et al., 2008).

4.1.2 Gjennomføring – valg av analyseparametere

I forrige delkapittel ble det presentert 27 parametere som virker inn på kapasiteten på en strekning på eller flere måter. Videre er syv av de omtalte parameterne valgt ut til å modelleres og studeres i parameterstudiet. Årsaken til at ikke samtlige av de identifiserte parameterne er analysert er at det medfører en omfattende analyse. En analyse av samtlige av de identifiserte parameterne svarer heller ikke på problemstillingen i denne masteroppgaven, der formålet er å avgjøre om stigningsgraden alene, eller i kombinasjon med andre parametere, har en påvirkning på kapasiteten på strekningen.

Utvelgelsen av parameterne ble gjort på bakgrunn av litteraturstudiet, samt ved faglige diskusjoner med kandidatens veiledere. Parameterne som er studert har en direkte eller indirekte tilknytning til stigningsgraden. Parameterne er også mulige å modellere og studere/endre på en enkel måte i LUKS. Analyseparametere er presentert under, med en kort begrunnelse for hvorfor de er inkludert.

- *Togmiks*: Stigningsgraden påvirker person- og godstog ulikt, og situasjonen i Norge er at linjene driftes med blandet trafikk
- *Stigningsgrad*: Bakgrunnen for problemstillingen i denne masteroppgaven
- *Togtype*: Det er interessant å studere om hastighetsdifferansen mellom ulike togtyper og økt stigningsgrad vil ha en påvirkning på kapasiteten
- *Retning* (stigning eller fall): Inkluderes naturlig ettersom både stigning og fall på strekningen studeres
- *Hastighetsprofil*: Parameteren gir mulighet til å se påvirkningen av akselerasjon på analysestrekningen, også i tilknytning med stigning eller fall
- *Hastighet ved møte av stigningsgraden*: Sier noe om hvor mye akselerasjon og trekkraften påvirkes av økt stigningsmotstand på strekningen
- *Lengde på analysestrekningen*: Infrastrukturmodellen må ha en viss strekningslengde, og det er interessant å studere om stigningsgradens utstrekning innenfor en jernbanestrekning har påvirkning på kapasiteten

Tabell 10 viser en oversikt over utelatte parametere, gruppert etter grunnlag for å utelate de i analysene. Flere av parameterne presentert i forrige kapittel inkluderes i infrastrukturmodellen, men holdes konstante og inkluderes ikke i parameterstudiet.

Tabell 10: Redegjørelse for parametere som ikke er inkludert i parameterstudiet

Utelatte parametere	Grunnlag for å utelate parameteren
Driftsavbrudd (vedlikehold og ulykker), rushtid	Vanskelig å modellere ved metoden som benyttes i denne oppgaven (deterministisk, konstant modell)
Signalanlegg, de fysiske parameterne ⁶ , dobbeltsporet strekning, antall stopp på strekningen og stoppetiden til togene, gjennomsnittlig minste kjøretid, ny linje, togmateriell, sidespor, linjehastighet	Inkluderes i infrastrukturmodellen, men holdes på et konstant nivå og studeres ikke som en analyseparameter
Nettverkseffekt, ruteplan, enkeltspor, kvalitet på togtilbudet (robusthet), prioritet	Ikke aktuelle som følge av forenklinger og valg for denne masteroppgaven

De syv utvalgte analyseparameterne er videre studert ved en modellstrekning som bygges i dataverktøyet LUKS. Infrastrukturmodellen beskrives i kapittel 4.2, mens bruk av modellen til parameterstudiet presenteres i kapittel 4.3.

⁶ De fysiske parameterne, med unntak av stigningsgraden, vil bli inkludert i studien ved valg av togtype og infrastruktur. Trekkraften er bestemt ved valg av tog, og programmet antar ideelle adhesjonsforhold

4.2 Oppbygging av infrastrukturmodellen

I dette kapitlet presenteres infrastrukturmodellen som er bygget for analysene. Parametere som ikke omtales i modellbeskrivelsen er valgt til å beholde standardverdien foreslått i programmet. Først presenteres planleggingen og hensikten med modellen. Videre følger utførelsen med oppbygning av modellen og uthenting av resultatene. Kapitlet er bygget opp kronologisk ut fra hvordan modellen er bygget i dataprogrammet.

4.2.1 Hensikt med modellen, valg av dataverktøy og grunnmodeller

Som en del av metoden bygges en dummy-modellstrekning som trafikkeres av et bestemt antall tog med definerte egenskaper. Hensikten med å bygge en dummy-strekning i en *software* er å få output-resultatene minste togfølgetid (MT). Det benyttes en egendefinert, deterministisk modell som verktøy fordi dette gir mulighet til kontroll på samtlige parametere og infrastrukturelementer som inngår i modellen. Infrastrukturmodellen baseres på analytiske betraktninger, der fysikkens bevegelseslikninger benyttes for beregning av kjøretid og BT (ved Δv -steg som omtalt i kapittel 2.1.5). Videre er modellstrekningen bygget etter krav og anbefalinger fra TR. Infrastrukturmodellen i LUKS genererer blokktrapper for togene som trafikkerer strekningen. MT leses manuelt fra blokktrappene, slik som beskrevet i kapittel 2.1.4. På denne måten studeres nøyaktig den strekningen som er interessant for analysene, og MT leses av på riktig sted i forhold til ønsket analysestrekning.

Det understrekes at dummy-strekningen ikke er overførbar til virkeligheten. For å analysere egenskaper er det nødvendig med en forenklet situasjon, slik at egenskapene man er interessert i kommer tydelig frem. Virkeligheten vil alltid være annerledes, og full av «forstyrrelser».

Dataverktøy - LUKS

Modellstrekningen bygges i programmet LUKS. Programmet består av ulike moduler, som gjør det mulig å studere endinger av infrastrukturen og/eller ruteplanen på forskjellige måter. Det er i hovedsak den generelle modulen av programmet som benyttes i denne oppgaven, der man ved hjelp av en infrastruktureditor bygger infrastrukturmodellen. Modulen LUKS-K gir blokktrappene som manuelt flyttes inntil hverandre for å lese av MT. Det vises til Janecek og Weymann (2010) for videre beskrivelse av programmets moduler og muligheter.

LUKS benyttes som verktøy fordi programmet baserer seg på BTM, og i programmet kan infrastrukturen modelleres på meters-nøyaktighetsnivå, slik at databasen er tilstrekkelig detaljert for nøyaktig beregning av kjøretider og BT (Janecek og Weymann, 2010). Dette er viktige egenskaper for denne oppgaven, da BT påvirker MT for togene. LUKS gir mulighet til å lage en enkel modell tilpasset oppgavens formål.

Som alternativ til en manuell arbeidsmetode kan modulen LUKS-A benyttes. LUKS-A benytter også en analytisk tilnærming. Ved bruk av denne modulen beregner programmet MMT

og kapasiteten automatisk, og manuell avlesning fra blokktrappene unngås. Metoden skal i teorien gi nøyaktig samme svar som den manuelle metoden beskrevet over. Ved bruk av LUKS-A har man imidlertid ikke like stor kontroll på hvor MT leses av på analysestrekningen.

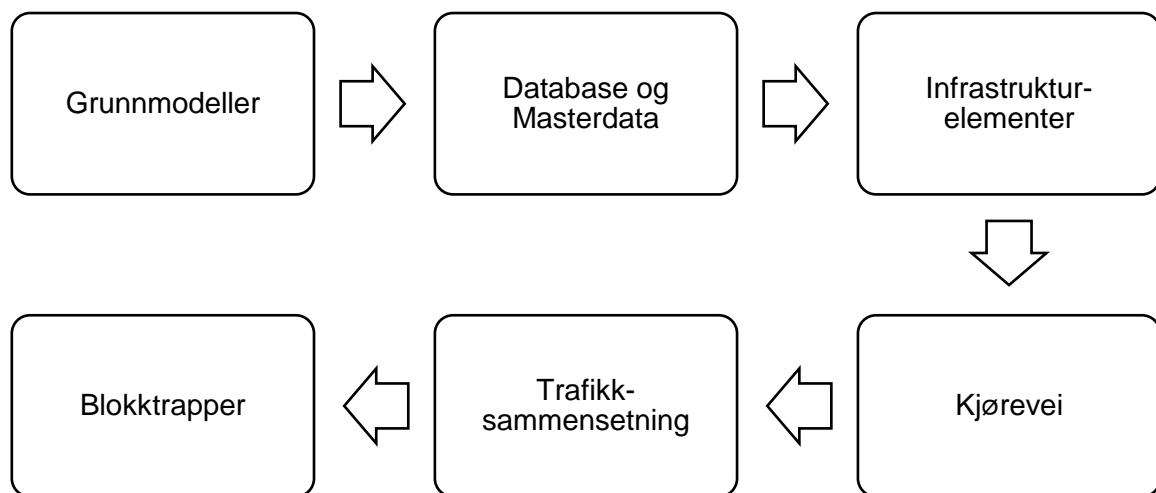
Siden kandidaten hadde vanskeligheter med å bygge modellstrekningen ved oppstarten av arbeidet med masteroppgaven, ble det bestemt å jobbe manuelt med resultatuttak for å sikre at resultatene ble lest av på riktig sted på analysestrekningen i forhold til den definerte oppgaven.

Strekningsutforming og modellvarianter

Strekningens utforming er planlagt i samarbeid med veiledere for denne masteroppgaven. Siden arbeid med modeller og programvaren er nytt for kandidaten er det satt av tid til et tett samarbeid med veiledere i oppstarten av oppgaven, slik at infrastrukturmodellen fungerer på et tidlig stadium.

Som beskrevet i kapittel 3 bygges det en modellstrekning tilpasset hver analysevariant. For å arbeide mest mulig effektivt er samtlige analysevarianter basert på grunnstrekninger av modellen. Disse strekningene inneholder en konstant infrastruktur, mens analyseparameterne varierer mellom de ulike analysevariantene. På denne måten unngår man å bygge samtlige analysevarianter fra bunnen av.

Videre i dette kapitlet presenteres utformingen og oppbygningen av infrastrukturmodellen. Arbeidet med modellen kan illustreres som vist i Figur 18.



Figur 18: Oppbygging av infrastrukturmodellen

4.2.2 Gjennomføring – dokumentasjon av infrastrukturmodellen

I det følgende presenteres arbeidet med infrastrukturmodellen i LUKS, etterfulgt av en dokumentasjon av modellen basert på Figur 18.

Arbeidet med infrastrukturmodellen

Arbeidet med infrastrukturmodellen har vært mer tidkrevende enn hva kandidaten hadde beregnet i opprinnelig tidsplan. Dette gjelder både oppbygging av modellstrekningen og uttak av resultater.

Siden kandidaten ikke var kjent med prosjektering av jernbanelinjer var det en vanskelig oppgave å bygge modellstrekningen i programmet. Det ble benyttet mye tid for å studere krav og anbefalinger for utforming av jernbanestrekninger. Dette har vært en krevende del av oppgaven. Det ble bygget flere utkast til modellen, siden utformingen endret seg underveis. Det ble for eksempel besluttet å bygge forbikjøringsspor på strekningen, noe som medførte store endringer i oppbygningen av modellen.

Ved uttak av resultater fra modellen ble det oppdaget en situasjon som medførte at samtlige resultater måtte leses ut på nytt. Resultatuthenting tok dermed lengre tid enn planlagt, men ble vurdert som nødvendig for at resultatene fra oppgaven skulle være gyldige. Denne situasjonen omtales ytterligere i kapittel 4.2.3.

Arbeidet med infrastrukturmodellen er i stor grad basert på en manual tilsendt per mail fra VIA Consulting&Development (utviklere av programmet LUKS). Manualen ga råd til arbeidsprosessen (VIA Consulting and Development, 2016). Medveileder for masteroppgaven har kjennskap til programmet, og det har blitt gjennomført to workshops for å bygge en fungerende modellstrekning. Det har også vært dialog med VIA Consulting&Development, både per e-post og telefonsamtaler.

Oppbygningen av infrastrukturmodellen beskrives videre.

Grunnmodeller av analysestrekningen

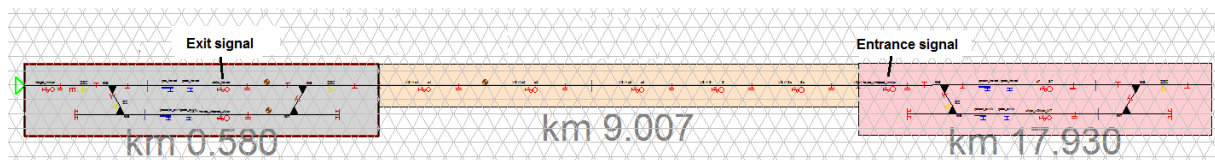
Modellstrekningen som studeres er som beskrevet tidligere tilpasset en analysevariant av gangen. Grunnmodellene representerer en basissituasjon for analysestrekningen, og består av en fast infrastruktur, der spor, forbikjøringsspor, signaler, linjehastighet, strekningslengde, holdeplasser og *liberation equipment* holdes konstante. For hver analysevariant er grunnmodellene benyttet med egenskaper tilpasset analysevarianten som ble studert. Analysevariantene baserer seg på forsøksdesignet som beskrives i kapittel 4.3.

Det er totalt gjennomført 2ⁿ analysevarianter i infrastrukturmodellen, omtalt som modellkjøringer. n representerer antall analyseparametere. Samtlige modellkjøringer, og dermed modellstrekninger, er basert på følgende fire grunnmodeller:

- Kort strekning med stigning
- Lang strekning med stigning
- Kort strekning med fall
- Lang strekning med fall

Strekningens lengde er inkludert i grunnmodellen og holdes konstant slik at resultatene fra analysene kan sammenliknes. Videre er strekningslengde en av de utvalgte analyseparameterne (fra kapittel 4.1.2), og studeres på to nivåer (kort og lang strekning). Nivåene utdypes i kapittel 4.3.

Figur 19 viser en skisse av modellstrekningen. Strekningen består av to forbikjøringsspor sammenkoblet med en rettstrekning, og analysestrekningen er definert mellom hoved utkjøringsignal og hoved innkjøringsignal ved stasjonene (*exit* og *entrance* signal i figuren).



Figur 19: Modellstrekning i LUKS (stasjonsgrenser, profilnumre (km) og signaler)

Videre beskrives infrastrukturmodellen med utgangspunkt i en grunnmodell (kort strekning med stigning).

Database og masterdata

LUKS er koblet mot en database, som blant annet inneholder et masterdataprofil. Masterdata defineres som et sett med informasjon og data som former basisen for all annen data ved prosjektet. Masterdataen inneholder data om togtyper, bremsetabeller, tilgjengelig trekkraft og tilhørende kjøretøysdynamiske egenskaper (VIA Consulting and Development, 2016). Masterdataen kan modifiseres, men dette utføres sjeldent. I denne oppgaven ble det benyttet et masterdataprofil tilsendt fra medveileder med egnede masterdata tilpasset norske forhold. Innstillinger og andre input-verdier kan dermed forsvares ut fra eksisterende praksis. Det er derfor ikke gjort endringer i masterdataen som er benyttet.

Infrastrukturelementer – oppbygging av jernbanestrekningen

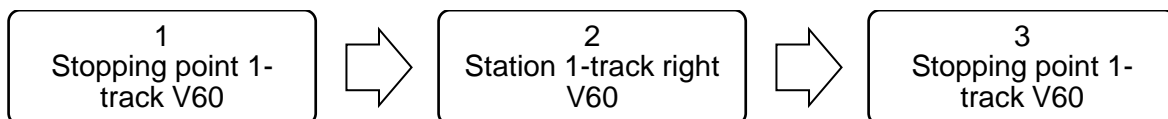
Det er bygget en infrastruktur som definerer analysestrekningen som togene trafikkerer. Analysestrekningen består av ulike infrastrukturelementer som ble definert i programmet.

Modellstrekningen representerer en dobbeltsporet jernbanestrekning. I modellen er dette representert ved en strekning der samtlige tog trafikkerer strekningen i samme retning. Situasjonen med stigning representeres ved at samtlige tog trafikkerer strekningen som *ascending* i programmet, mens fall representeres som *descending* i programmet. Infrastrukturmodellen som er bygget i LUKS inneholder elementene som beskrives videre i oppgaven.

Stasjonsgrenser og maler (*templates*)

Modellen i programmet er bygget opp ved hjelp av strekninger, der hver strekning er plassert innenfor det som kalles en stasjon. En slik stasjon er definert av stasjonsgrenser (*station boundaries*). Innenfor stasjonsgrensene finnes tilhørende infrastrukturelementer. Stasjonsgrensene vises som tre firkanter i Figur 19, der *km X* i figuren viser til middel av hver stasjonsgrense

Etter anbefaling fra LUKS-manualen (VIA Consulting and Development, 2016) er det valgt å benytte forhåndsdefinerte maler fra programmet for å bygge grunnlaget for analysestrekningen. Figur 20 viser hvilke maler fra LUKS strekningen er satt sammen av, i den skisserte rekkefølgen (1-3). De forhåndsdefinerte malene inneholdt buttspor i forbikjøringssporet (i mal 1 og 3), men disse ble satt inaktive siden de ikke har noe å si for resultatene i denne oppgaven.



Figur 20: Oversikt over maler fra LUKS og stasjonsgrenser

Malene ble kun brukt som basis for å sette inn spor. Infrastrukturelementene og profilnumrene (km) som karakteriserer strekningen er egendefinerte og vil omtales i det følgende. Profilnumrene sier noe om hvor på strekningen hvert infrastrukturelement befinner seg.

Sporveksel og *route liberation equipment*

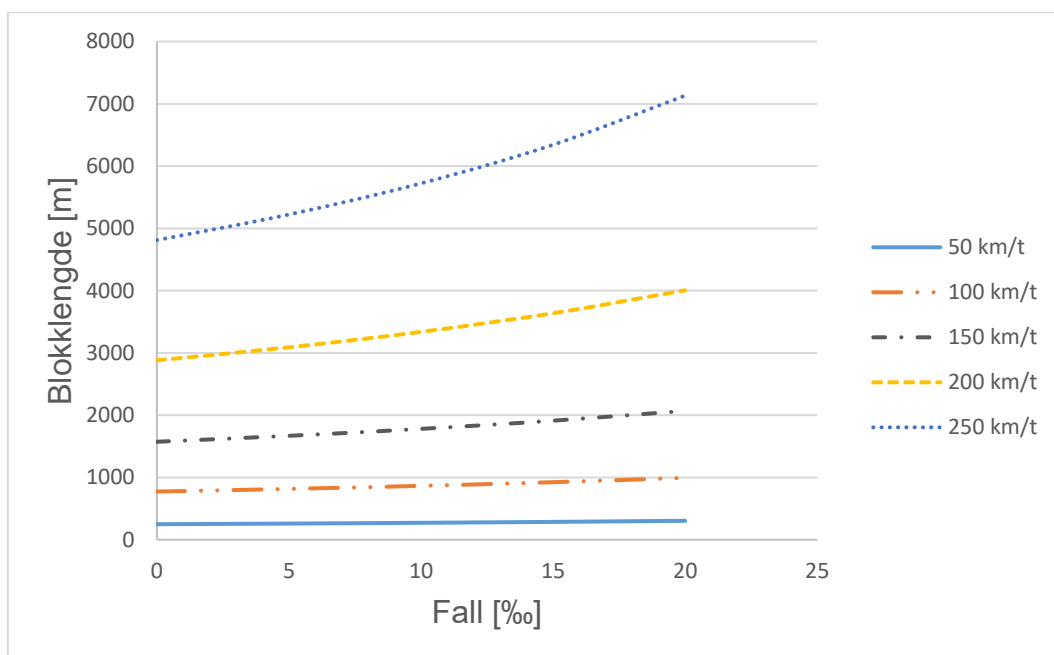
Sporvekslene er plassert innenfor stasjonsgrensene 1 og 3 (fra Figur 20). Det er valgt å benytte sporveksler 1:14, som gir hastighet 80 km/t for toget gjennom vekselen (tog i avvik). Valg av sporvekseltype og tilhørende hovedmål er basert på TR, og dokumenteres i vedlegg 5. *Route liberation equipment (RLE)* ble plassert på bakgrunn av hovedmålene fra TR, der RLE er et infrastrukturelement som refererer til det punktet toget må ha passert før togveien frigis i bakkant.

Spurvekslene finnes i forbindelse med forbikjøringsmulighetene. Forbikjøringsmulighetene representerer situasjoner hvor togene kan bytte rekkefølge. Ved å inkludere forbikjøringsmuligheter på modellstrekningen vil det gi et mer realistisk bilde av analysesituasjonen, siden det er ved kryssingsmuligheter det er interessant å vite hvor lang tid bak et etterfølgende tog må starte.

Signal, blokk lengder og *signal liberation equipment*

Signalene på modellstrekningen er basert på 3-aspekts signalering, der forsignalet er plassert på foregående hovedsignals mast (som beskrevet i kapittel 2.1.4). *Signal liberation equipment* (SLE) er plassert på samme profilnummer som forsignal og hovedsignal⁷. SLE er et infrastrukturelement toget må ha passert før signalet frigis i bakkant.

Denne oppgaven baserer seg på prinsippet om faste blokkstrekninger, og blokkstrekningene har et signal i hver ende. Plassering av signalene er dermed bestemt ut fra beregninger av blokk lengdene. Beregningene ble utført etter Formel 18 (s. 17), og Figur 21 viser ulike blokk lengder for flere hastigheter og fall. Bakgrunn for beregning av blokk lengdene presenteres i vedlegg 3.



Figur 21: Blokk lengder for ulike hastigheter og fall

⁷ Basert på praktisk gjennomføring, etter samtale med medveileder

For at resultatene fra analysen skal være sammenliknbare er analysestrekningens lengde holdt konstant på to nivåer (kort eller lang strekning). Antall signaler innenfor analysestrekningens lengde er også holdt konstant. For å oppnå en konstant signalplassering for samtlige analysevarianter ble det benyttet ETCS level 2 som signalsystem. ETCS level 2 er et digitalt radiobasert signalsystem, der lokfører mottar informasjon om kjøretillatelse og hastighet direkte i togets førerpanel (Jernbaneverket, 2014). Innføring av dette systemet gjør at signalene kan plasseres tettere. Dermed ble blokk lengdene i infrastrukturmodellen redusert. Det ble valgt å benytte blokk lengder for tilfellet med stigningsgrad på null‰ og linjehastigheten 200 km/t. Dette ga blokk lengder på ca. 3 km. Blokk lengder på 3 km er benyttet for samtlige analysevarianter.

Infrastrukturmodellen i LUKS ble bygget med elementer som tilsvarte konvensjonelle, optiske signaler. I et ETCS level 2-system vil disse signalene i virkeligheten være byttet ut med signalskilt, såkalte *markerboards*. Funksjonen vil imidlertid være den samme, da strekningen mellom hvert hovedsignal utgjør en blokkstrekning, på samme måten som strekningen mellom to signalskilt utgjør en blokkstrekning. På denne måten ble blokkprinsippet utnyttet i infrastrukturmodellen.

Valg av ETCS-systemer er i tråd med fremtidige scenarioer i Norge, der InterCity-prosjektet har som mandat å bygge ERTMS⁸ som signalteknisk løsning (Jernbaneverket, 2015b). Teori som omhandler ETCS og ERTMS vil ikke utdypes ytterligere, da det er blokkprinsippet som er viktig for denne oppgaven og ikke ETCS/ERTMS i seg selv.

ETCS i infrastrukturmodellen vises som skrånende linjer i hastighetsdiagrammene som genereres, og markerer blokkstrekningene på analysestrekningen.

ETCS start

For å markere at det er ETCS-kontrollsystem på strekningen ble det inkludert et infrastrukturelement som heter *ETCS start*. Elementet inneholder informasjon om ETCS-nivået som benyttes og hvilke regler og nasjonale valg systemet styres ut fra. Informasjon om nasjonale valg, samt bremsetabeller for ETCS er definert i masterdataen, og utdypes ikke ytterligere.

Running time measuring point

Running time measuring point (RTMP) definerer et referansepunkt for registrering av kjøretid. RTMP er plassert på midten av hver stasjonsgrense, og infrastrukturelementet fungerer for begge retninger (*ascending* og *descending*). Hver kjørevei har eksakt ett RTMP.

⁸ European Rail Traffic Management System (ERTMS), består av ETCS

Linjehastighet

Infrastrukturmodellen er definert med en linjehastighet på 250 km/t, mens hastigheten over sporvekselen er 80 km/t (for tog i avvikende spor).

Linjehastigheten på 250 km/t ble valgt fordi analysene i denne oppgaven er basert på fremtidige scenarier, der InterCity-prosjektene i Norge planlegges med en linjehastighet på 250 km/t (Jernbaneverket, 2015b). Hastighet i sporveksel på 80 km/t ble valgt fordi det er ønskelig med størst mulig hastighet for tog i avvik, slik at bremsing ikke må innledes tidlig i hovedsporet. Tidlig nedbremsing kan forlenge kjøretiden på strekningen.

Stoppsteder og stopptid (*dwelt time*)

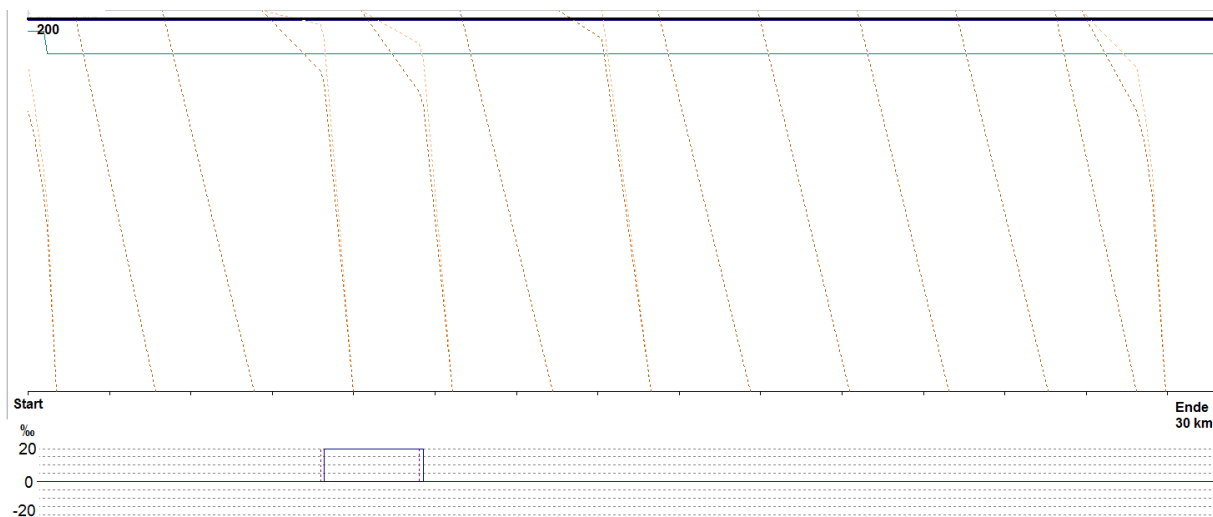
Det er definert stoppesteder (*stopping position*) for både persontog og godstog i hovedspor og avviksspor innenfor stasjonsgrense 1 og 3. Stoppestedene er definert med nødvendig lengde slik at togene kan stoppe med hele sin tog lengde innenfor sin *stopping position* (definert som 400 meter for persontog og 620 meter for godstog). Stoppestedene er plassert på samme profilnummer som utkjøringssignalet, og definerer dermed starten og slutten på analysestrekningen.

Stoppetiden for hver stasjon er satt til ett minutt. Stoppetiden ble imidlertid sett bort fra i analysene, siden man kun er interessert i å studere konsekvensen av at togene akselererer fra utgangsstasjonen, og bremser ned ved analysestrekningens slutt.

Enkelte av analysevariantene innebærer at togene entrer og forlater analysestrekningen i maksimal hastighet (*flying start*). I disse situasjonene er stopptiden fjernet. Det ble heller definert en såkalt «oppførsel ved første og siste stasjon», slik at togene entrer og forlater analysestrekningen i sin maksimale hastighet. Et eksempel på den sistnevnte situasjonen er vist i Figur 22, som viser innstillinger for persontoget BM74. Hastighetsdiagrammet for en situasjon med *flying start* vises i Figur 23, der man ser at analysevarianten verken inneholder akselerering eller nedbremsing.



Figur 22: Flying start for persontog BM74. Innstillinger fra LUKS



Figur 23: Hastighetsdiagram for flyging start for persontog BM74

Stigningsgrad

Stigningsgraden på analysestrekningen er inkludert i infrastrukturmodellen ved infrastrukturelementet *gradient*. Stigningsgraden i modellen varierer mellom 12,5‰, og 20‰ og retningen varierer mellom *ascending* og *descending* avhengig av hvilken analysevariant som studeres. Det er lagt inn to slike infrastrukturelementer, der ett definerer stigningen/fallets startposisjon og det andre definerer slutten. Lengden på stigningen/fallet er konstant lik 3 km, som er grensen ved bruk av minstekravet fra TR (Tabell 1, s. 4).

Plasseringen av stigningen/fallet er studert ved to ulike situasjoner. I situasjon A har alle togene nådd sin maksimale hastighet før møtet med stigningen/fallet. For denne situasjonen er *gradient* plassert 8 km fra utgangsstasjonen. I Situasjon B møter togene stigningen/fallet mens de fortsatt er i akselererende tilstand. I denne situasjonen er *gradient* plassert 200 meter fra utgangsstasjonen til togene.

Plasseringen av stigningen/fallet er basert på beregninger ved bruk av bevegelseslikninger og antagelse om konstant akselerasjon. Dette ga et overslag på hvor stigningen/fallet skulle plasseres.

For situasjon A ble det tatt utgangspunkt i konstant akselerasjon frem til togene fikk sin maksimale hastighet. Hastighetsdiagrammene som ble generert i LUKS avdekket imidlertid at den beregnede plasseringen av stigningen/fallet var for nære utgangsstasjonen, siden maksimal hastighet ikke var nådd for alle togene før møte med stigningen/fallet. Stigningen/fallet ble dermed plassert på bakgrunn av hastighetsdiagrammene til toget med lengst akselerasjonsdistanse (ICE toget med maksimal hastighet 250 km/t). Unøyaktige resultater fra beregningene med konstant akselerasjon var forventet, da man fra kapittel 2.1.5 vet at togene ikke har konstant akselerasjon (ref. Figur 13, s. 21). Plassering av stigning/fall ut fra

hastighetsdiagrammene fra programmet er mer nøyaktig, siden kjøretidsberegningene er utført med Δv -steg.

For situasjon B ble det tatt utgangspunkt i at togene hadde nådd 50% av sin maksimale hastighet i møte med stigningen/fallet. Ved denne antagelsen ble beregningene utført med konstant akselerasjon opp til 50% av maksimal hastighet. Dette ga et bilde på hvor stigningsgraden måtte plasseres for at alle togene fortsatt skulle være i akselerasjon. Beregningen ga et godt overslag på plasseringen til *gradient*, ca. 200 meter etter utgangsstasjonen.

Beregningsbakgrunn for plassering av stigningsgrad, samt hastighetsdiagrammer med stigningsgradene er vist i vedlegg 6.

Stigningsgraden langs strekningen vises i hastighetsdiagrammet som genereres i LUKS.

Kjørevei

Etter at infrastrukturelementene var plassert i infrastrukturmodellen ble strekningens kjørevei definert i programmet. Programmet genererer alle mulige «måter» et tog kan trafikere infrastrukturen på. I denne oppgaven ønsker man å studere hele strekningens lengde. Videre er det bestemt at godstog skal kjøre i avvikssporet og persontog i hovedsporet. Dersom analysevarianten *flying start* studeres er samtlige tog satt i hovedsporet.

De ulike kjøreveiene som er benyttet i denne oppgaven er oppsummert under:

- *Ascending*, hovedspor for persontog
- *Descending*, hovedspor for persontog
- *Ascending*, avviksspor for godstog
- *Descending*, avviksspor for godstog
- *Flying start*, retning *ascending* og *descending* for person og godstog

Trafikksammensetning og togtyper

Sammensetningen av trafikken på strekningen er forenklet i forhold til en reell trafikksituasjon. Infrastrukturmodellen tar for seg situasjonen der to ulike togslag trafikkerer strekningen av gangen. Det er valgt å benytte ett type godslokomotiv samt to ulike motorvognsett (persontog) med ulik maksimal hastighet.

Togene som er benyttet i infrastrukturmodellen ble valgt fra masterdataprofilet beskrevet tidligere. Modellstrekningen er trafikkert med togtyper som er tenkt å trafikere InterCity-strekningene (Jernbaneverket, 2015b) eller tog med tilsvarende egenskaper, og vises i Tabell 11. Innstillingene for togenes egenskaper er holdt konstante gjennom samtlige analysevarianter.

Tabell 11: Egenskaper for tog som trafikkerer strekningen i infrastrukturmodellen

	EL19 Godstog (lokomotiv)	BM74 Passasjertog (motorvognsett)	ICE Passasjertog (motorvognsett)
<i>Togtype</i>	LDFT ⁹ , Cargo	LDPT ⁹ , IC	LDPT ⁹ , ICE
<i>Lengde (m)</i>	600	212	200
<i>Vekt (tonn)</i>	800	-	-
<i>Maks hastighet (km/h)</i>	140 ¹⁰	200 ¹⁰	330 ¹⁰
<i>Bremseposisjon</i>	G	P+Mg	P+Mg
<i>Bremseprosent</i>	80	200	200

Supplement

Hensikten med et supplement (eller kjøretidstillegg) er beskrevet i kapittel 2.1.5, og størrelsen på supplementet varierer. I denne oppgaven er det benyttet et konstant tillegg på 10%, der 4% er et grunntillegg som tar hensyn til at alle lokførere er forskjellige, og 6% som et robusthetstillegg. Supplementet kommer til utslag i hastighetsdiagrammene, der man ser at supplementet fører til en lavere hastighet på hele strekningen. Dette vises for eksempel i Figur 27 der den nederste kurven i diagrammet representerer tilfellet med supplement. Dette er tilfellet for samtlige hastighetsdiagram i masteroppgaven.

Ruteplan

For at togene skal trafikkere modellstrekningen må de driftes etter en ruteplan. Analysene i denne oppgaven er utført ved ruteplanuavhengige beregninger. Ruteplanen som er definert i LUKS har til formål at togene skal trafikkere strekningen, slik at blokktrappene til togene genereres og MT kan leses ut fra modellen. Siden ruteplanen ikke har noen betydning for resultatene i denne oppgaven er ikke innstillinger og valg ytterligere utdypet.

⁹ Long distant freight train/Long distant passenger train

¹⁰ v_{\max} fra trekkraften er 330 km/t for ICE toget, men hastigheten begrenses til linjehastigheten som er 250 km/t. For BM74 er den maksimale hastigheten begrenset av trekkraften til 200 km/t. v_{\max} fra trekkraften til godstoget er 140 km/t, men begrenses til 100 km/t ut fra norske forhold.

Blokktrapper

Tid-distanse-linjen og blokktrappene til togene opprettes når modellen er bygget med infrastrukturelementer, kjøreveier og ruteplan som beskrevet over. Uttak av MT fra blokktrappene beskrives videre.

4.2.3 Uttak av resultater fra infrastrukturmodellen

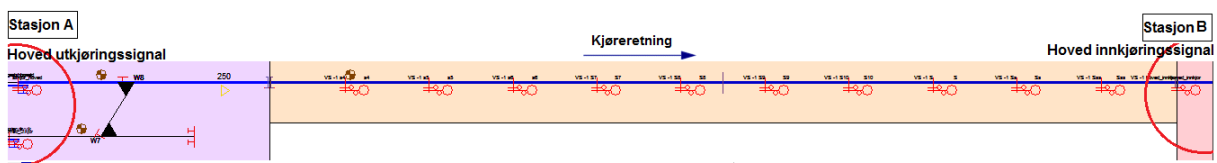
Output-verdien fra infrastrukturmodellen er minste togfølgetid (MT). I tillegg gir modellen kjøretid på strekningen.

Minste togfølgetid

I kapittel 2.1.4 ble blokkprinsippet beskrevet. Ved å skyve blokktrappene for de påfølgende togene i tid-distanse-diagrammet fra LUKS slik at trappene tangerer hverandre, kan MT leses ut slik det ble illustrert i Figur 12 (fra toppen av blokken til tog i til toppen av blokken til tog j ved utgangsstasjonen).

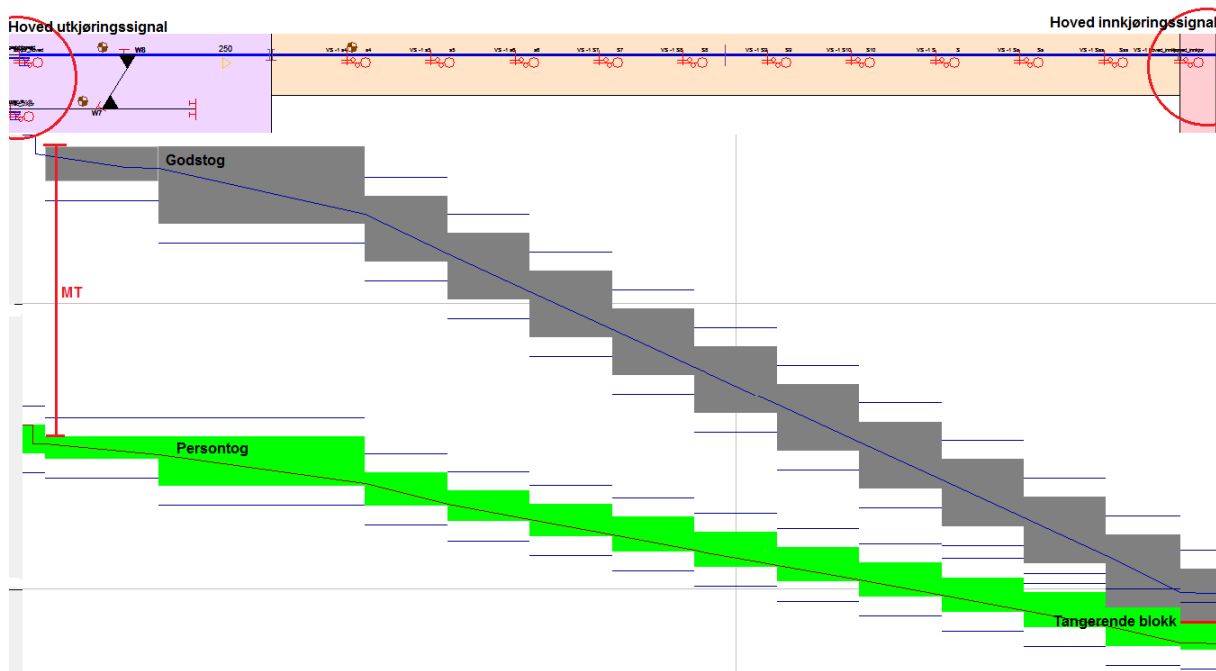
Infrastrukturmodellen som er bygget i LUKS er deterministisk, og det er ingen «random» forstyrrelser. Det er derfor ikke behov for replikasjoner i modellen, og på grunn av konstante forhold skal avlesningen av MT gi samme verdi ved hver avlesning. For å opprettholde en konstant ramme er MT lest ut mellom klokken 06.00 og 07.00. Dette skal ikke ha noen innvirkning på resultatene.

Analysestrekningen er som beskrevet tidligere definert som strekningen mellom forbikjøringsmulighetene. Analysestrekningen starter ved hoved utkjøringssignalet ved stasjon A, og avsluttes ved hoved innkjøringssignalet ved stasjon B. Analysestrekningen er vist i Figur 24 (representert ved en lang basisstekning, retning *ascending*).



Figur 24: Analysestrekningen fra hoved utkjøringssignal til hoved innkjøringssignal

MT leses av ved første blokk på analysestrekningen (ved utkjøringssignalet). Figur 25 viser samme basisstekning som figuren over, men inkluderer nå blokktrappene for et godstog etterfulgt av et persontog. Man ser at blokktrappene tangerer på enden av analysestrekningen, der persontoget tar igjen godstoget. Den aller siste blokken (til høyre i figuren) viser et rødt overlapp-område. Dette er utenfor analysestrekningen, og er ikke av betydning for oppgaven.



Figur 25: Avlesning av minste togfølgetid fra blokktrapper i LUKS

Hver modellkjøring innebærer en avlesning av MT for samtlige kombinasjoner av togene som følger hverandre (togfølger), dvs. fire togfølgetider per analysevariant. Togfølgetidene som leses ut fra infrastrukturmodellen er som følger:

- Persontog – persontog
- Persontog – godstog
- Godstog – persontog
- Godstog – godstog

Resultatene føres i en matrise i et Excel-dokument, der de beregnes til MMT før de benyttes i parameterstudiet. Dette beskrives i kapittel 4.3.

Kjøretid

Kjøretiden på modellstrekningen får man direkte fra programmet, der man kan lese av tid for ankomst og avgang og se på differansen av disse. Kjøretidene fra programmet er beregnet ved Δv -metoden som beskrevet i kapittel 2.1.5.

4.3 Analyse og parameterstudie

I dette kapitlet presenteres planlegging og gjennomføring av analysene som er benyttet for å komme frem til resultatene som presenteres i kapittel 5. Valg og antagelser diskuteres underveis. Dette delkapitlet er omfattende siden analysen inneholder flere deler. De ulike stegene i analysen beskrives trinnvis, og reflekterer rekkefølgen på arbeidet. Arbeidet illustreres i Figur 26.

4.3.1 Planlegging og hensikt med analyser

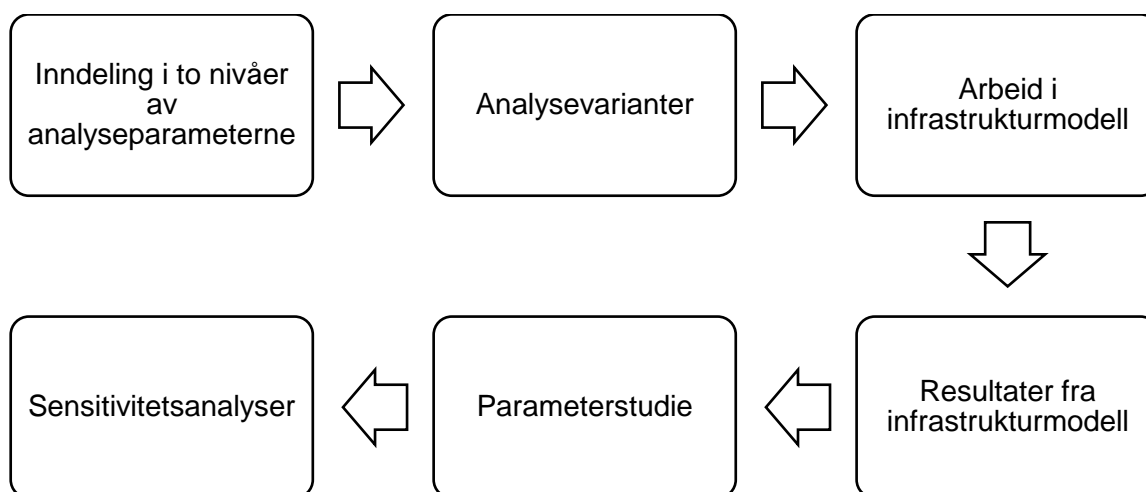
Hensikten med analysen er å identifisere hvilke av parameterne, og eventuelle kombinasjoner av dem, som har størst påvirkning på kapasiteten på modellstrekningen, og på denne måten avgjøre om stigningsgraden er en av parameterne som har stor effekt enten alene eller i kombinasjon med øvrige analyseparametere. Analysen gjennomføres i tre hoveddeler.

Først benyttes infrastrukturmodellen fra kapittel 4.2 til å hente ut minste togfølgetider (MT) for samtlige parameterkombinasjoner. Avleste MT bearbeides videre til midlere minste togfølgetid (MMT), som benyttes som input-verdier i parameterstudiet. Til slutt beregnes hoved- og samspillseffekter for parameterne og interaksjoner mellom dem.

Det benyttes en MATLAB-kode for å generere samtlige analysevarianter. For at resultatene fra modellen skal være anvendbare må de beregnes til MMT, som beskrevet tidligere. Beregningene føres i et Excel-ark hvor formel for MMT og teoretisk kapasitet er inkludert, og beregningene gjennomføres automatisk ved innskriving av avleste MT for alle togfølgene fra de ulike analysevariantene fra LUKS. Etter at MMT er beregnet gjennomføres et parameterstudie ved bruk av forskningsdesignet *full factorial design* (FFD).

4.3.2 Gjennomføring

Gjennomføringen av analysene illustreres i Figur 26 og redegjøres for i det følgende kapitlet.



Figur 26: Gjennomføring av analysene

Inndeling i to nivåer av analyseparameterne

De utvalgte analyseparameterne fra kapittel 4.1.2 er studert ved et 2ⁿ FFD. Hver analyseparameter er derfor inndelt i to nivåer. Nivåinndelingen vises i Tabell 12, og nivåene beskrives i Tabell 13 og

Tabell 14. De to nivåene er kodet med henholdsvis +1 og -1 for nivå 1 og nivå 2. Kodene benyttes i designmatrisen (DM) for å representere de ulike kombinasjonene av hver parameter og hvert nivå (som beskrevet i kapittel 3.3). DM for oppgaven presenteres senere.

Utvalg av analyseparametere ble begrunnet i kapittel 4.1.2. Inndeling i nivåene i Tabell 12 baserer seg på at hver analyseparameter studeres på et realistisk ekstremnivå. Flere av ekstremnivåene er selvforklarende og har en naturlig inndeling. Dette gjelder parameter X4 (retning) som representerer enten stigning eller fall. Tilsvarende vil X5 (hastighetsprofil) være enten fra full stopp eller i maksimal hastighet, og parameter X6 (Hastighet ved møte av stigningsgraden) vil være enten ved full hastighet eller som akselererende. Stigningsgraden (X2) baserer seg imidlertid på krav fra TR, der normalkravet er 12,5% og minstekravet er 20%. Togtype (X3) baserer seg på to ulike passasjertogtyper med ulike maksimalhastigheter, og er valgt på bakgrunn av fremtidige norske forhold.

Når det gjelder strekningens lengde (X7) er nivåene delt i kort og lang strekning, der analysestrekningens lengde er 15 eller 30 km. Nivåene er valgt på bakgrunn av driftskonseptet med blandet trafikk. Siden man kjører tog av ulike typer vil et hurtig tog ta igjen et saktegående tog i løpet av en gitt distanse. Det må derfor være mulighet for forbikjøring på strekningen. Strekningen må også være så lang at togets maksimale hastighet blir utnyttet over en viss distanse før nedbremsing. Det er derfor kommet frem til at en strekning på 15 km innebærer en tilstrekkelig distanse for kryssing, og at hastigheten utnyttes. 30 km er benyttet for å se hva en dobling i lengden har å si for kapasiteten.

Tabell 12: Analyseparametere med tilhørende to nivåer

<i>Parameter</i>	<i>Parameter</i>	<i>Nivå 1</i> (+1)	<i>Nivå 2</i> (-1)
<i>Togmiks</i>	X1	3P1G	1P3G
<i>Stigningsgrad (%)</i>	X2	20	12,5
<i>Type persontog</i>	X3	ICE	BM74
<i>Retning</i>	X4	Stigning	Fall
<i>Hastighetsprofil (starttilstand)</i>	X5	<i>Flying</i>	Stopp
<i>Hastighet ved møte av stigningsgraden</i>	X6	Full	Akselererende
<i>Lengde av analysestrekningen (km)</i>	X7	30	15

Tabell 13: Beskrivelse av analyseparameterens nivåer, nivå 1 (+1)

Parameter	Kode (+1)	Forklaring
X1	3P1G	Togmiksen består av tre persontog og ett godstog
X2	20‰	Stigningsgraden på strekningen er 20‰
X3	ICE	Persontog som trafikkerer strekningen er av type ICE med hastighetsbegrensning 250 km/t
X4	Stigning	Fortegnet til stigningsgraden på modellstrekningen er positivt, altså stigning. Retningen i modellen er <i>ascending</i> .
X5	<i>Flying</i>	Togene i modellen entrer og forlater analysestrekningen med sin maksimale hastighet (bestemt av togtypen)
X6	Full	Togene i modellen møter stigningsgraden når de har nådd sin maksimale hastighet
X7	30 km	Lengden på analysestrekningen er 30 km

Tabell 14: Beskrivelse av analyseparameterens nivåer, nivå 2 (-1)

Parameter	Kode (-1)	Forklaring
X1	1P3G	Togmiksen består av ett persontog og tre godstog
X2	12,5‰	Stigningsgraden på strekningen er 12,5‰
X3	BM74	Persontog som trafikkerer strekningen er av type BM74 med hastighetsbegrensning 200 km/t
X4	Fall	Fortegnet til stigningsgraden på modellstrekningen er negativt, altså fall. Retningen i modellen er <i>descending</i> .
X5	Stopp	Togene i modellen entrer analysestrekningen fra full stopp på de definerte stasjonene, slik at de må akselerere seg opp i sin maksimale hastighet. Likeledes stopper de på siste stasjon, og må bremse ned.
X6	Akselererende	Togene i modellen møter stigningsgraden mens de fortsatt akselererer opp i hastighet, dvs. før maksimal hastighet for hver togtype er nådd.
X7	15 km	Lengden på analysestrekningen er 15 km

Analysevarianter

For å generere en designmatrise som dekket alle kombinasjonene av analyseparameterne og nivåene fra Tabell 12 ble det benyttet et MATLAB-script. Scriptet vises i vedlegg 7 sammen med DM for $2^7 = 128$ analysevarianter.

Tabell 15 viser et sammendrag av DM, sammen med interaksjoner mellom analyseparameterne. Kolonnen «Analysevariant» viser til nummeret på modellkjøringen. X1 til X7 viser de syv utvalgte analyseparameterne, mens kodene +1 og -1 viser hvilket nivå parameteren studeres på. Resterende kolonner viser til hovedeffektene X1 til X7, samt interaksjonene X1X2 til og med X1X2X3X4X5X6X7.

Tabell 15: Designmatrise (DM) med analyseparametere og interaksjoner

Analysevariant	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X1X2	X1X3	...	X1X2X3X4X5X6X7
S1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1		-1
S2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1		+1
S3	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1		+1
S4	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1		-1
...											
S128	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1		+1

Fra Tabell 15 ser man dermed at analysevariant S1 gjennomføres som følger:

- Togmiksen ett persontog og tre godstog (X1)
- En stigningsgrad på 12,5‰ (X2)
- Et BM74 persontog (holder hastigheten 200 km/t) (X3)
- Retningen er *descending*, altså fall (X4)
- Toget starter fra stopp på utgangsstasjonen (X5)
- Toget møter stigningsgraden (i denne situasjonen fallet) i akselererende tilstand (X6)
- Analysestreknings lengde er 15 km (X7).

Denne oppgaven baserer seg på ruteplanuavhengige beregninger av MMT. Parameter X1 (togmiksen) ble dermed tatt hensyn til først ved beregningene som fulgte *etter* at resultatene (MT) ble hentet ut av modellen. Det vil si at det ble utført $2^6=64$ modellkjøringer i LUKS med output-resultat MT. Deretter ble MMT beregnet med hensyn på to ulike togmikser (nivå 1 og nivå 2). Dette resulterte i $64*2=128$ resultater fra de gjennomførte analysevariantene. Dette kommer tydelig fram i DM i vedlegg 7, der man ser at analysevariantene S1-S64 har like kombinasjoner som S65-S128 med unntak av parameter X1 som endrer fortegn fra -1 til +1.

For beregningene av MMT ble det valgt å trafikkere strekningen med fire tog i timen. Det er ikke antall tog i timen som er interessant for oppgaven, men den prosentvise fordelingen av persontog og godstog. For analysene i denne oppgaven studeres tilfellene med enten tre persontog og et godstog (3P1G, nivå 1), eller ett persontog og tre godstog (1P3G, nivå 2). Dette tilsvarer 75% persontog og 25% godstog, og motsatt (Nivå 2) 25% persontog og 75% godstog. Valg av nivåer for togmiksen kommenteres ytterligere under punktet *sensitivitetsanalyser* senere i dette kapitlet.

Arbeid i infrastrukturmodellen – avlesning av minste togfølgetid

For hver modellkjøring ble MT avlest for samtlige togfølger (person-person, person-gods, gods-person, gods-gods) ved hjelp av blokkprinsippet.

Ved avlesning av MT fra blokkene i infrastrukturmodellen var det forventet konstante resultater for MT innenfor en og samme analysevariant. Dette skyldes at infrastrukturmodellen som benyttes er statisk, der alt innenfor en og samme analysevariant holdes konstant. På denne måten skal MT mellom to etterfølgende tog være konstant og opptre med samme verdi uavhengig av når MT leses ut. Da MT ble lest ut fra modellen ble kandidaten imidlertid oppmerksom på at avlest MT endret seg fra gang til gang resultatet ble lest ut. Endringen bestod i at avlest togfølgetid varierte mellom to ulike verdier, enten en høy eller en lav verdi. Felles for samtlige avlesninger var at variasjonen mellom høy og lav verdi var på 0,4 minutter. Endringene forekom ved avlesning av MT på ulike tider av døgnet (altså ved forskyvning av blokktrappene til togene), og innenfor avlesning for hver togfølge (person-person, person-gods, gods-person, gods-gods)

En realistisk forklaring på hvorfor variasjonen forekommer, og alltid opptrer med forskjellen 0,4 minutter (høy/lav verdi), er akkumulert avvik på grunn av avrunding av kjøretider gjennom en blokkstrekning. Programmet beregner en kjøretid på strekningens totale lengde, men også en kjøretid for hver blokkstrekning. Kjøretidene for hver blokk kan studeres i *occupation information* i LUKS. Ved å studere *occupation information* for tilfellet som gir høyest verdi og for tilfellet som gir lavest verdi, ble det observert en differanse på ett sekund i total varighet av blokken. Dersom man antar at kjøretidene som beregnes (BT) rundes opp eller ned til nærmeste hele sekund, vil man kunne få et *worst case* scenario der samtlige kjøretider i hver blokk rundes ned, og man får den lave varianten. På samme måte kan kjøretidene for blokkene rundes opp, og man får den høye varianten. Dersom man videre antar at programmet enten runder alle blokker opp eller alle blokker ned (ikke en individuell avveining), vil det kunne opptre to forskjellige resultater med konstant variasjon (+/- 0,4 min).

Det akkumulerte avrundingsavviket vil være på maksimalt 0,4 min = 24 sek. Dersom samtlige avlesninger av MT settes til høy verdi, gir dette mellom ett til to tog forskjell i beregnet teoretisk kapasitet i forhold til bruk av lav verdi. Det er imidlertid ikke selve kapasitetstallet man er

interessert i på strekningen, men trender og endringer i togfølgetidene og dermed kapasitetstallene som følge av at stigningsgraden endres. Det er dermed et forholdstall som skal studeres. Slike forhold fremkommer ved å benytte enten høy eller lav verdi for avlest togfølgetid. I denne oppgaven ble resultatene med høye verdier benyttet, da disse så ut til å opptre flest ganger. Ved å benytte den høyeste MT oppnår man også de mest konservative resultatene.

Den beskrevne situasjonen medførte mye ekstra arbeid med uthenting av resultatene, siden samtlige avlesninger måtte gjennomføres to ganger. Dette skyldes at situasjonen med endring i resultatene ikke ble oppdaget før sent i resultatuthenting. Det ble imidlertid vurdert som nødvendig å hente ut nye MT for å få et anvendbart resultat fra oppgaven.

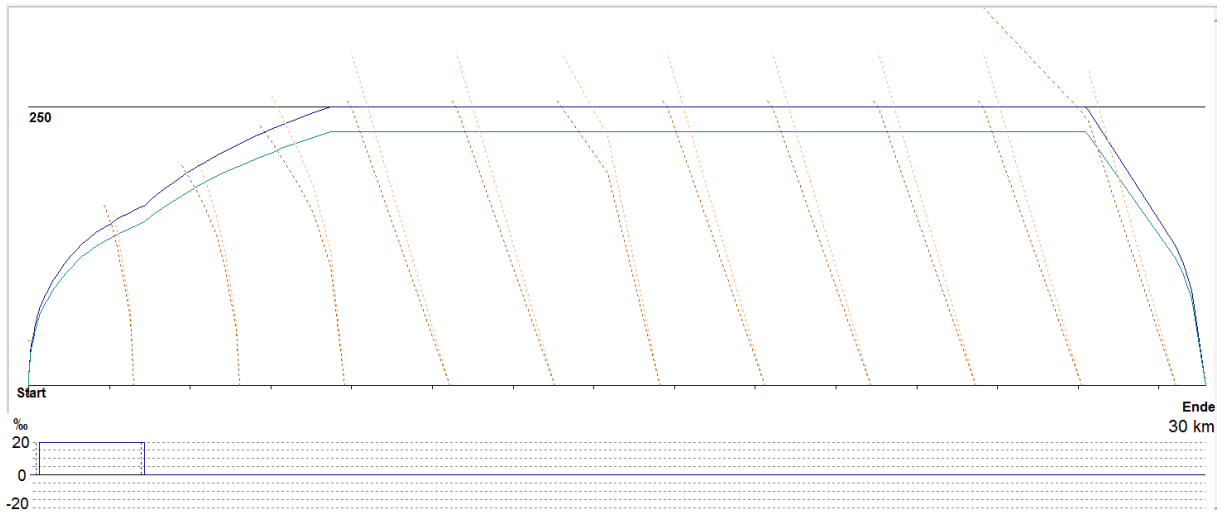
Resultater fra modellen – Minste togfølgetid, midlere minste togfølgetid og kapasitet

Det er valgt å dokumentere en av de gjennomførte analysevariantene fra LUKS. Resultatene som presenteres er fra analysevariant S58, og har karakteristikker som vist i Tabell 16. Analysevariant S58 er den varianten som gir lavest kapasitetstall. Dette utdypes og diskuteres ytterligere i kapittel 5.

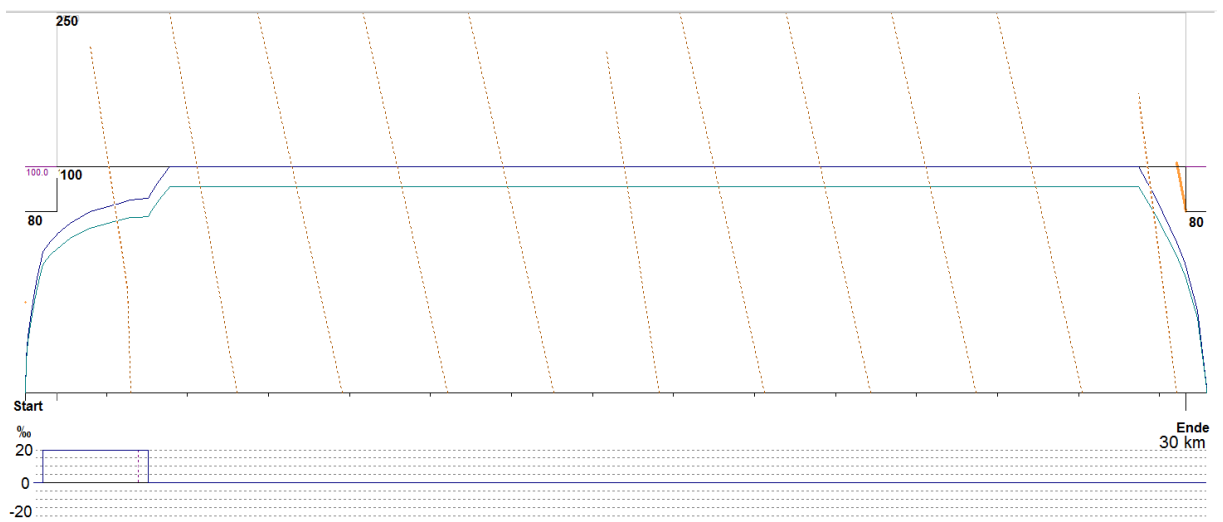
Figur 27 og Figur 28 viser hastighetsdiagrammet til henholdsvis person- og godstoget. Figur 29 og Figur 30 viser tid-distanse-linja til persontoget etterfulgt av godstoget og godstoget etterfulgt av persontoget. Figur 28 og 29 viser at blokktrappene tangerer, og MT leses ut fra første blokk på analysestrekningen.

Tabell 16: Karakteristikker for analysevariant S58

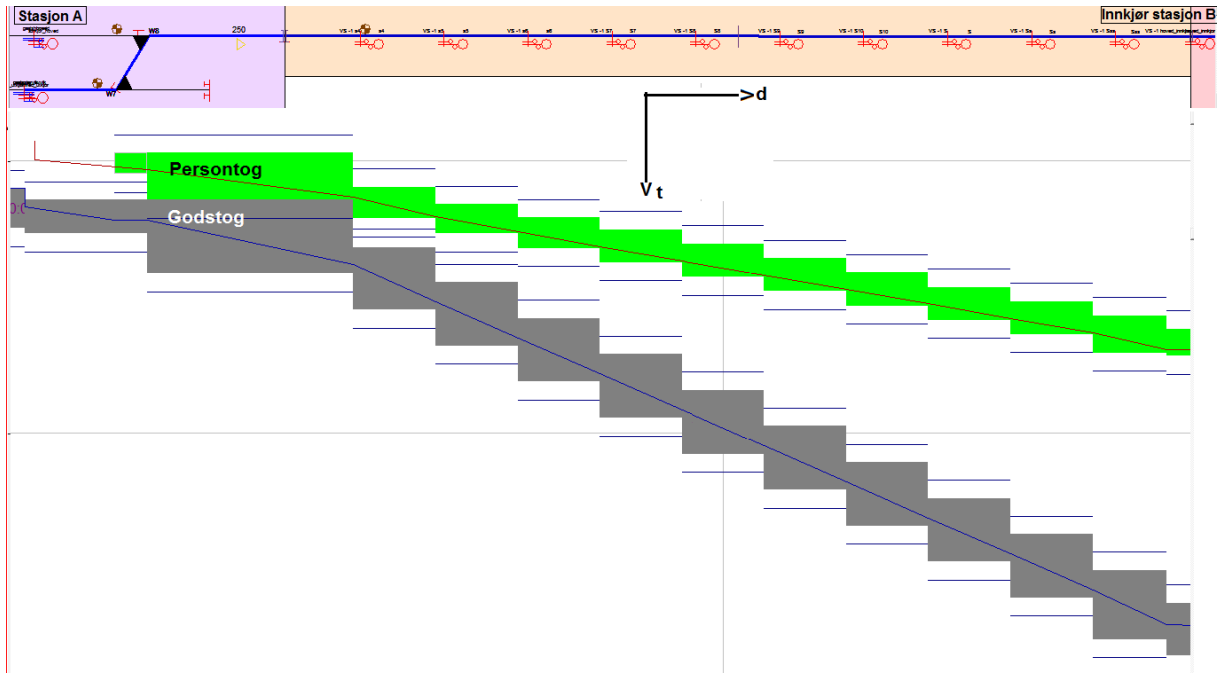
Parameter	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Nivå	-1	1	1	1	-1	-1	1
Forklaring	1P3G	20‰	250 km/t	Stigning	stopp	akselererende	30 km



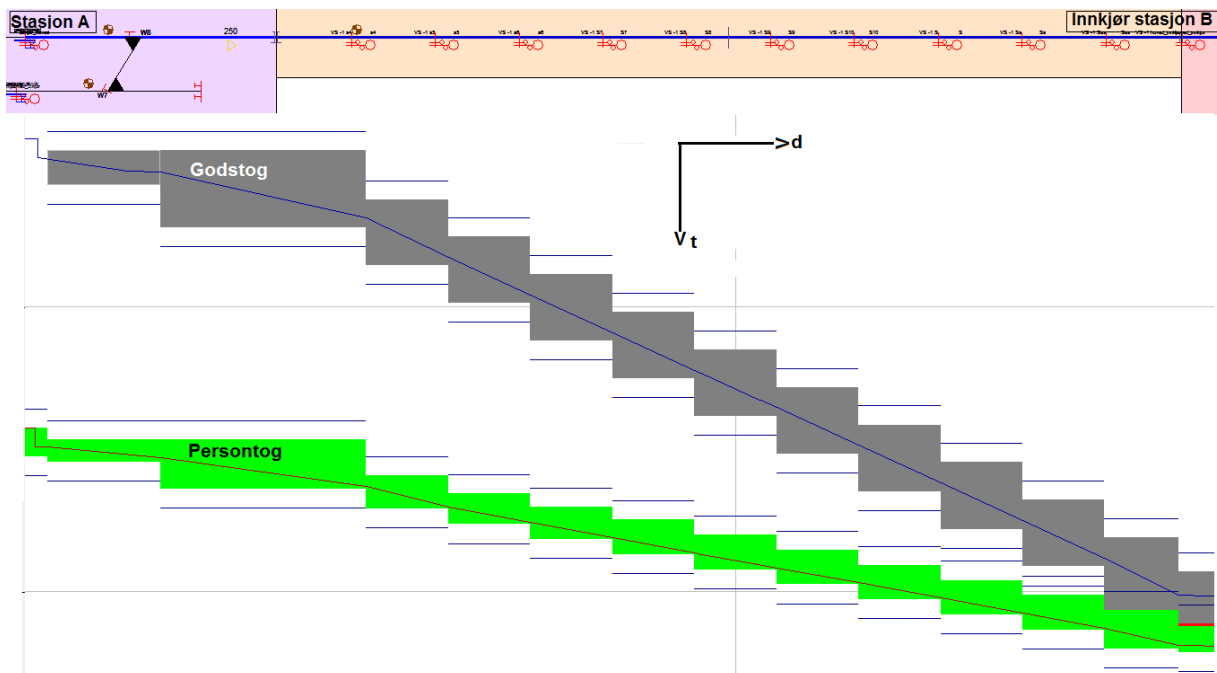
Figur 27: Hastighetsdiagram for persontoget (ICE) fra analysevariant S58



Figur 28: Hastighetsdiagram for godstoget fra analysevariant S58



Figur 29: Tangerende blokktrapper for persontog etterfulgt av godstog



Figur 30: Tangerende blokktrapper for godstog etterfulgt av persontog

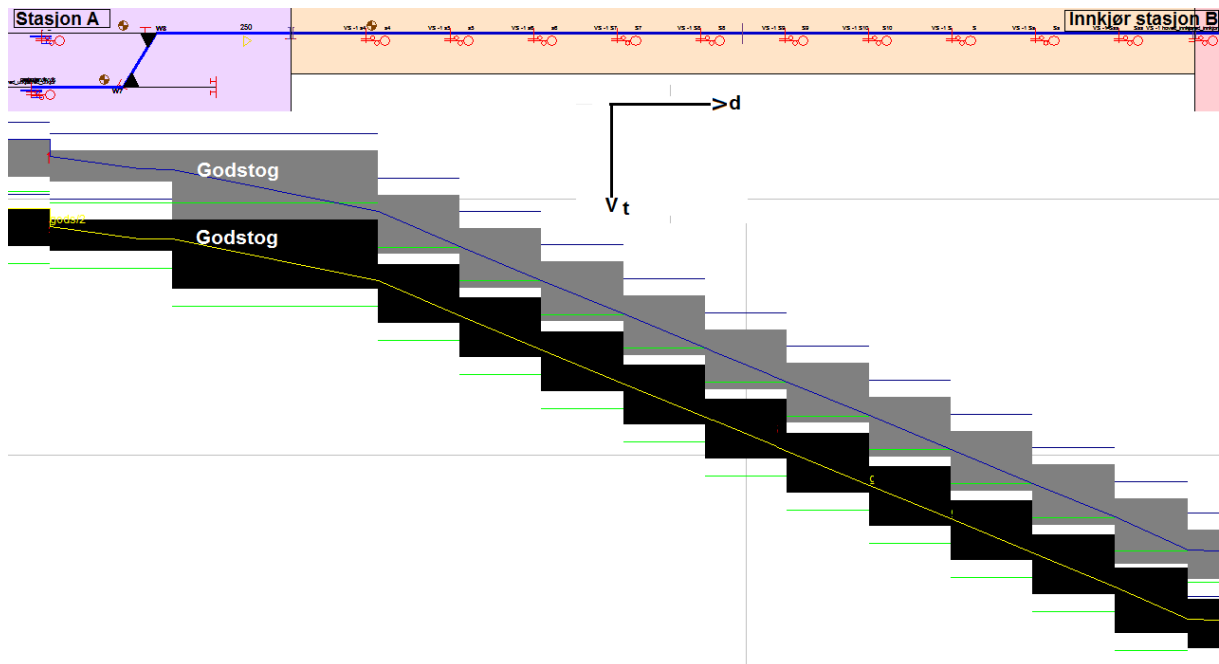
Fra Figur 27 og Figur 28 ser man at persontoget i liten grad påvirkes av stigningen, mens godstoget ikke klarer å akselerere seg opp i hastighet før det er ute av stigningen. Av Figur 29 og Figur 30 ser man at dersom et persontog følger et godstog (Figur 30), må det starte vesentlig lengre bak enn om et godstog følger et persontog (Figur 29). Dette skyldes hastighetsdifferanse. Persontoget vil ta igjen godstoget etter en stund, og må derfor starte lengre bak. For et persontog etterfulgt av et godstog vil persontoget imidlertid kjøre fra godstoget. Dette kommer til syne i Figur 29, der den dimensjonerende blokk finnes ved utkjøringssignalet, mens Figur 30 viser dimensjonerende blokk ved innkjøringssignalet.

Fra Figur 30 observeres det at blokktrappen til godstoget overlapper med blokktrappen for persontoget (nederst til høyre i figuren). Som beskrevet tidligere er analysestrekningen definert mellom hoved utkjøringssignal (ved stasjon A) og hoved innkjøringssignal (ved stasjon B). Det er dermed strekningen mellom disse to signalene som analyseres, og alt utenfor ignoreres. Det betyr at overlappingen man ser i Figur 30 ikke har noen påvirkning på resultatene.

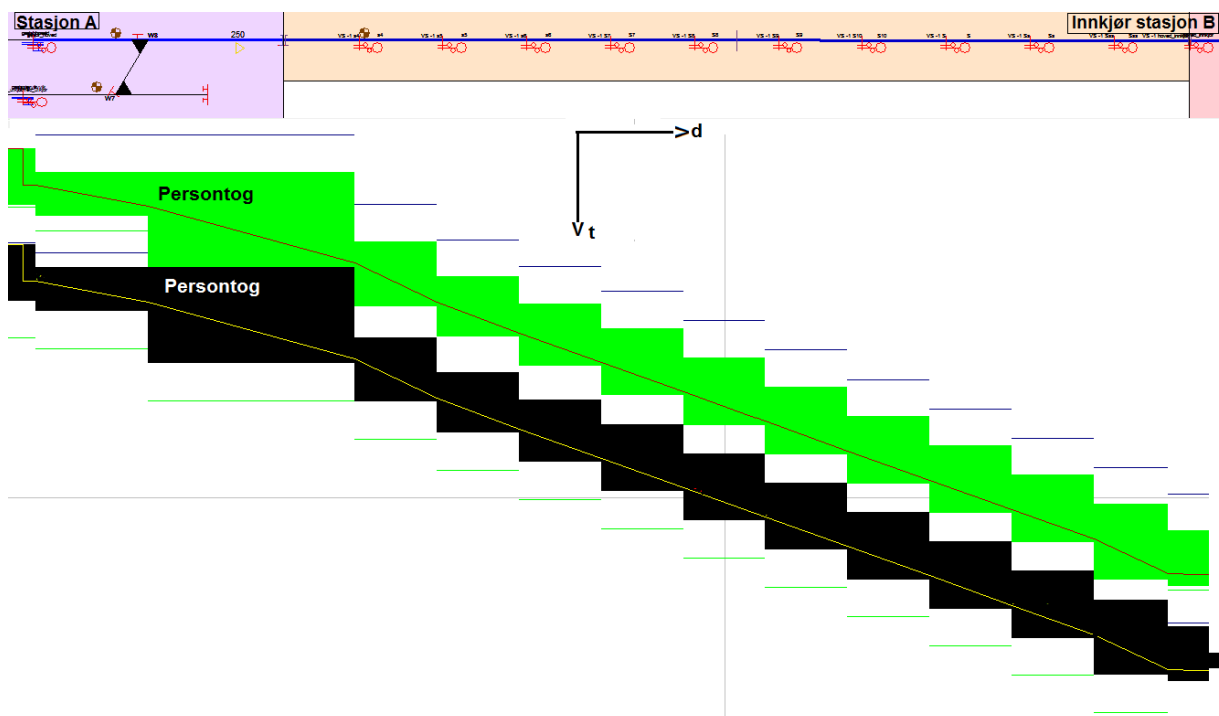
Fra blokktrappene i Figur 29 og Figur 30 observeres også en forskjell i størrelsen på blokkene, der godstoget generelt blokkerer en blokkstrekning lengre enn persontoget. BT vises som vertikal utstrekning langs tidsaksen.

MT for godstog etterfulgt av godstog og persontog etterfulgt av persontog vises i Figur 31 og Figur 32. Figurene viser tydelig at tog av samme type kan følge hverandre tettere enn hva situasjonen er ved blandet trafikk.

MT for samtlige modellkjøringer ble avlest som vist i Figur 29 til Figur 32. MMT ble videre beregnet med hensyn på de avleste MT fra LUKS og parameter X1 (togmiks) med tilhørende to nivåer.



Figur 31: Tangerende blokktrapper for godstog etterfulgt av godstog



Figur 32: Tangerende blokktrapper for persontog etterfulgt av persontog

Parameterstudie og FFD

MMT ble videre benyttet som input-verdi (respons) i FFD for beregning av hoved- og samspillseffekter (som beskrevet i kapittel 3.3). Resultatene fra beregningene vil gi svar på problemstillingen for masteroppgaven, og presenteres i kapittel 5.

For beregningen av hoved- og samspillseffekter ble det valgt å benytte MMT som respons (R) istedenfor den teoretiske kapasiteten fordi dette ga mulighet til mer presise tallsvaer i form av desimaler. Beregning av den teoretiske kapasiteten (K_{teo}) inkluderes imidlertid for drøfting av resultatene (i kapittel 5.2). MMT vil imidlertid være et mål på K_{teo} , siden K_{teo} er i direkte sammenheng med MMT (ref. Formel 12, s. 11).

Det er beregnet hovedeffekter for hver enkelt analyseparameter (X1 til X7), og samspillseffekter for interaksjonen mellom to og to parametere.

Samspillseffekter for flere enn to interaksjoner er ikke inkludert fordi effektene er svært små sammenliknet med de utslagsgivende effektene. Interaksjonseffekten mellom de tre mest utslagsgivende parameterne ble studert for å avgjøre om interaksjonen av tre eller flere parametere skulle inkluderes i studien. I tillegg ble interaksjonen mellom de to mest utslagsgivende parameterne studert i kombinasjon med stigningsgraden. Interaksjonseffekten av tre parameterne var svært liten. På bakgrunn av dette ble det ikke beregnet samspillseffekter for flere enn to parameterinteraksjoner. Denne avgjørelsen er i samsvar med Antony (2014a), som sier at interaksjon mellom tre og flere parametere ikke er viktige for situasjoner i den virkelige verden.

I FFD beregnes ofte SE (*standard error*). SE sier noe om gyldigheten til effektene. Effektene som er i størrelsesordenen SE eller mindre ofte kan være forårsaket av for eksempel støy i datasettet (Box et al., 2005). Box et al. (2005) hevder at effekter større enn to til tre ganger sin SE ikke enkelt kan forklares alene, og har dermed en dominerende innvirkning på responsen. De beregnede effektene for denne oppgaven ble framstilt i et *Normal ProbabilityPlot* (NPP). Enkelte av de beregnede effektene viste tydelige avvik fra normalfordelingen, og lå langt fra den rette linjen (beskrevet i kapittel 3.3). Siden de dominerende effektene opptrådte tydelig ble det besluttet å ikke beregne SE i denne oppgave. Hoved- og samspillseffektene blir presentert i kapittel 5.

Sensitivitetsanalyser

Hver analyseparameter ble studert på to nivåer (Tabell 12, s. 60). Ved avlesing av resultatene basert på nivåene i Tabell 12 ble kandidaten imidlertid oppmerksom på at resultatene (hoved- og samspillseffektene) var sensitive på valg av nivåer for analyseparameterne (ref. Figur 17).

Parameter X1 (togmiks) er et eksempel på en parameter hvor man ikke har mulighet til å studere hele «varianten» på kun to nivåer, siden togene kan kombineres på flere måter. For å forenkle analysene ble det i utgangspunktet valgt å studere X1 på følgende to nivåer: Nivå 1) tre persontog og ett godstog og nivå 2) ett persontog og tre godstog.

Etter at resultatene var bearbeidet ble kandidaten oppmerksom på at nivå-inndelingen til parameter X1 ikke var på et ekstremnivå. Tabell 17 viser alle kombinasjoner av togene som trafikkerer strekningen. Det konkluderes med at de to ytterpunktene av parameteren vil være tilfellet der samtlige tog er like (ingen togmiks) og situasjonen med maks blanding av tog, som vil finne sted når det er 50% av hver togtype. Ekstremnivåene er dermed nivå 1 og nivå 3 fra Tabell 17.

Togmiksen er en parameter som enkelt kan endres og studeres i analysene siden den først virker inn ved beregning av MMT. Parameteren krever dermed ingen endring av infrastrukturmodellen i LUKS. Det er derfor mulig å studere effekter som følge av endringer i denne parameteren. Det ble dermed valgt å studere flere nivåer av parameter X1 for å avgjøre om effektene av øvrige analyseparametere og interaksjoner er sensitive for endringer i en parameter.

Variantene av togmiksen som ble studert i sensitivitetsanalysene vises i Tabell 17. MT mellom togene i infrastrukturmodellen ble ikke påvirket av endring i X1, men den nye togmiksen påvirket beregningene av MMT. Nye MMT ble benyttet som respons (input-verdi) for beregning av hoved- og samspillseffekter, og ga opphav til nye NPP. Resultatene fra sensitivitetsanalysene presenteres i kapittel 5.3.

Tabell 17: Nivåer for parameter X1 – togmiks

Nivå 1*	Nivå 2	Nivå 3	Nivå 4
4P0G	3P1G	2P2G	1P3G

* Representerer situasjonen med ingen togmiks, kunne også vært studert som 0P4G

4.4 Casestudie

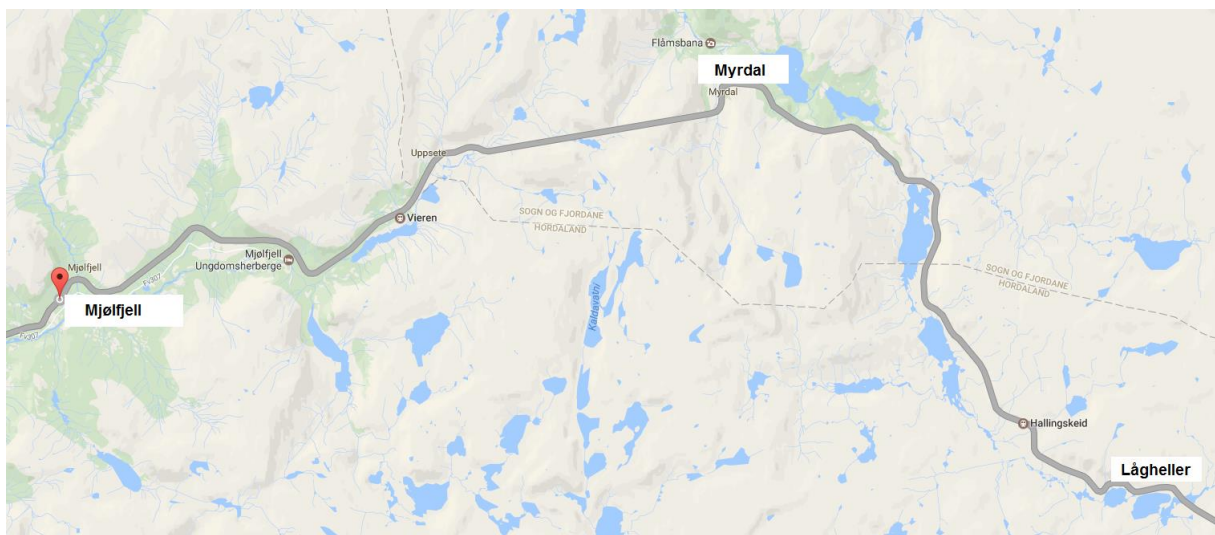
Det utføres et casestudie for å studere teorier og sammenhenger som er funnet fra de gjennomførte analysene.

Casestudiet tar utgangspunkt i en av utbedringsstrategiene som presenteres i dokumentet *Bergensbanen – utredning Lågheller-Mjølfjell sluttrapport* (Jernbaneverket, 2016). Det ble gitt tillatelse fra prosjektleder for oppdrag Utredning Lågheller-Mjølfjell til å benytte hovedrapporten og nødvendige traséfiler i arbeidet med masteroppgaven per mail 26.01.17. Utbedringsstrategien som studeres i casestudiet er strategialternativ nummer 3: Omlegging av jernbanelinjen mellom Lågheller og Mjølfjell. Bakgrunn for casestudiet og gjennomføring av caseanalysene presenteres videre.

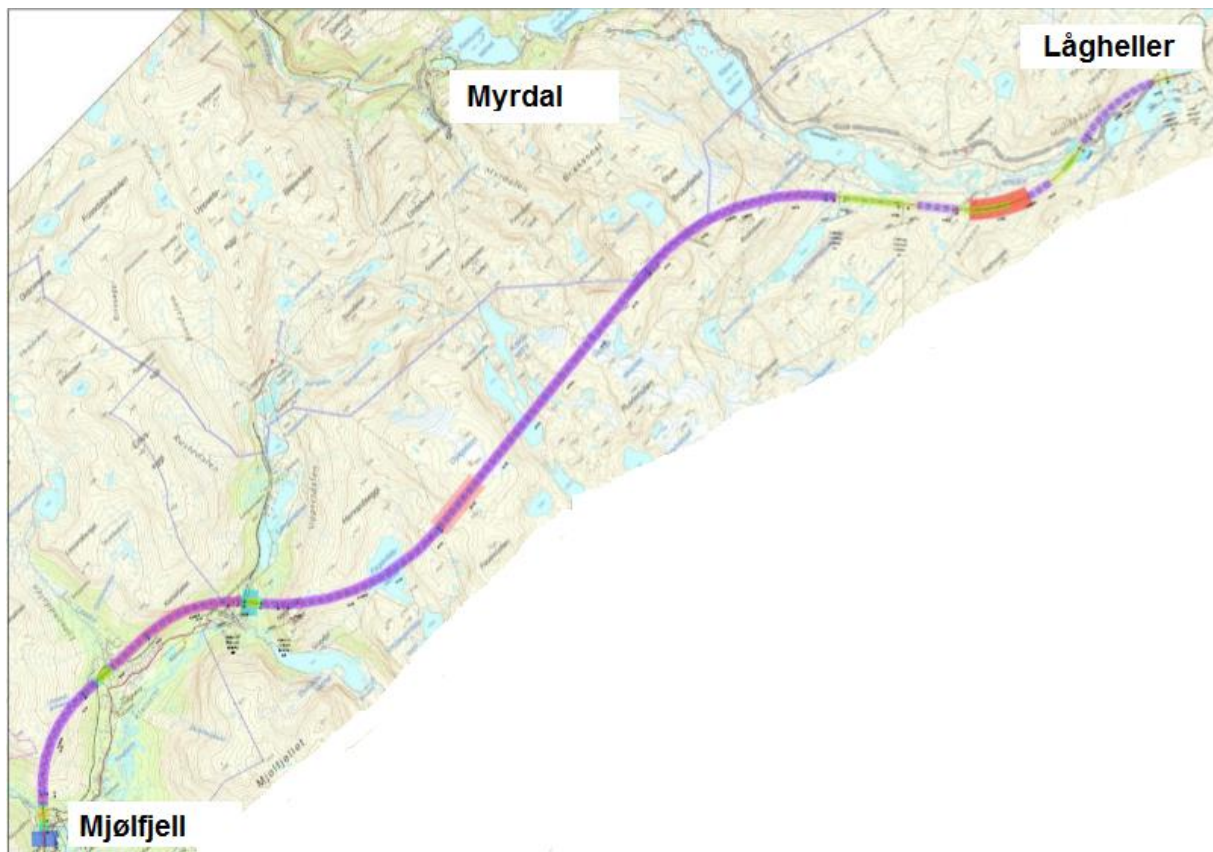
Bakgrunn

Strekningen som utredes går mellom Lågheller og Mjølfjell, og er blant de mest rasutsatte strekningene i landet, samtidig som den har dårlig oppetid og lav punktlighet. Utredningen som foreligger er en mulighetsstudie, med målsetting om bedre sikkerhet, bedre oppetid og færre feil. I utredningen vurderes alternativer til stadige sikrings- og utbedringsarbeider langs linjen, og det er sett på muligheter for å rette ut og legge om sporet.

Figur 33 viser dagens jernbanestrekning. Strategialternativ nummer 3 fra utredningsrapporten innebærer en omlegging av sporet, der ny trasé for jernbanestrekningen går utenom Myrdal. Traseen planlegges som en enkeltsporet jernbanestrekning med tillatt linjehastighet 200 km/t. En prinsipiell plassering av den nye traseen er vist i Figur 34. Store deler av den nye traseen ligger i tunnel, og strekningen inneholder to kryssingsspor hvorav ett ligger inne i tunnelen



Figur 33: Eksisterende trasé mellom Lågheller og Mjølfjell, Bergensbanen



Figur 34: Alternativ trasé mellom Lågheller og Mjølfjell (prinsippskisse). Fra Bergensbanen – utredning Lågheller-Mjølfjell sluttrapport (Jernbaneverket, 2016)

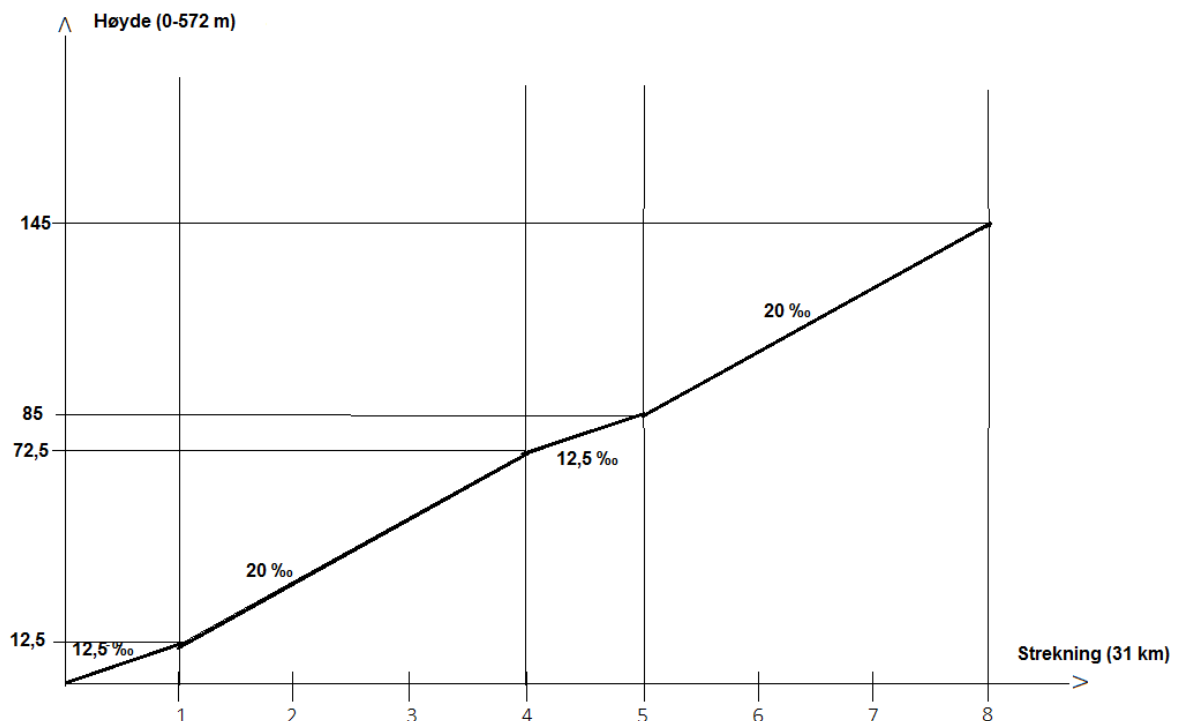
Det er 26,6 km i luftlinje mellom Lågheller og Mjølfjell, og strekningen innebærer en høydeforskjell på 572 meter. Ved å benytte normalkravene fra TR til stigning på strekningen vil det ifølge den gjennomførte utredningen være behov for en trasé på 45,7 km, som er ca. 9,4 km lengre enn dagens trasé. I utredningen er det derfor lagt opp til å benytte regelverkets minstekrav på 20‰ i tre km, med pustepartier på 12,5‰ i mellom. Rapporten sier ikke hvor lange disse pustepartiene skal være.

Casestudiet studerer de teoretiske sammenhengene fra analysene på en strekning i kontinuerlig stigning. Fall inkluderes ikke i caseanalysene fordi de gjennomførte analysene har konstante blokk lengder i infrastrukturmodellen i LUKS. De teoretiske sammenhengene reflekterer dermed ikke situasjonen for fall, siden fall på strekningen medfører lengre bremselengder og dermed større blokk lengder enn hva som er benyttet i denne oppgaven. Effekten av fall på strekningen er minimert, og reflekterer ikke den virkelige påvirkningen. Fall er derfor heller ikke inkludert i casestudien. Utvanning av fallets påvirkning diskuteres senere.

Caseanalyse

«Teknisk Regelverk» legger føringer på hvor langt (sammenhengende) partiet prosjektert ved minstekravet på 20‰ kan være. Tabell 1 (s. 4) sier at partiet maksimalt kan være tre km langt. TR sier imidlertid ikke noe om hvor langt det må være før neste parti på 20‰ kan plasseres. I dette casestudiet legges det opp til at etter hver tredje km med 20‰ kommer et pusteparti på én km med stigningen 12,5‰.

Tre km med en stigning på 20‰ vil gi en høydestigning for toget lik 60 meter, mens en stigning på 12,5‰ i én km vil gi en høydestigning for toget lik 12,5 meter. Ved å plassere disse stigningene etter hverandre annen hver gang vil man dermed nå høydeforskjellen mellom Lågheller og Mjølfjell (ca. 570 meter) etter ca. 31 km. Metoden er illustrert i Figur 35.



Figur 35: Prinsippkisse for høydeutvikling for casestrekningen

Strategialternativ 3 fra utredningen er sammenliknbar med en eksisterende modellvariant. Modellvarianten er allerede bygget i LUKS, og velges som referansestrekning for casestudiet. Referansestrekningens karakteristikk er presentert i Tabell 18. Ved å studere hastighetsdiagrammet til godstoget på referansestrekningen kan man se om godstoget når sin maksimale hastighet i løpet av stigningen på tre km (plassert 200 meter fra utgangsstasjonen). Dersom godstoget klarer å akselerere opp i sin maksimale hastighet i løpet av stigningspartiet vil ikke kapasiteten eller kjøretiden på casestrekningen i kontinuerlig stigning avvike fra resultatene fra referansestrekningen. Dette skyldes at toget ikke vil påvirkes ytterligere av gjentagende stigning siden det allerede holder sin maksimale hastighet.

Dersom toget *ikke* når sin maksimale hastighet i løpet av stigningspartiet på tre km, må situasjonen med kontinuerlig stigningsgrad studeres nærmere.

Tabell 18: Karakteristikker for referansestrekning til casestudiet

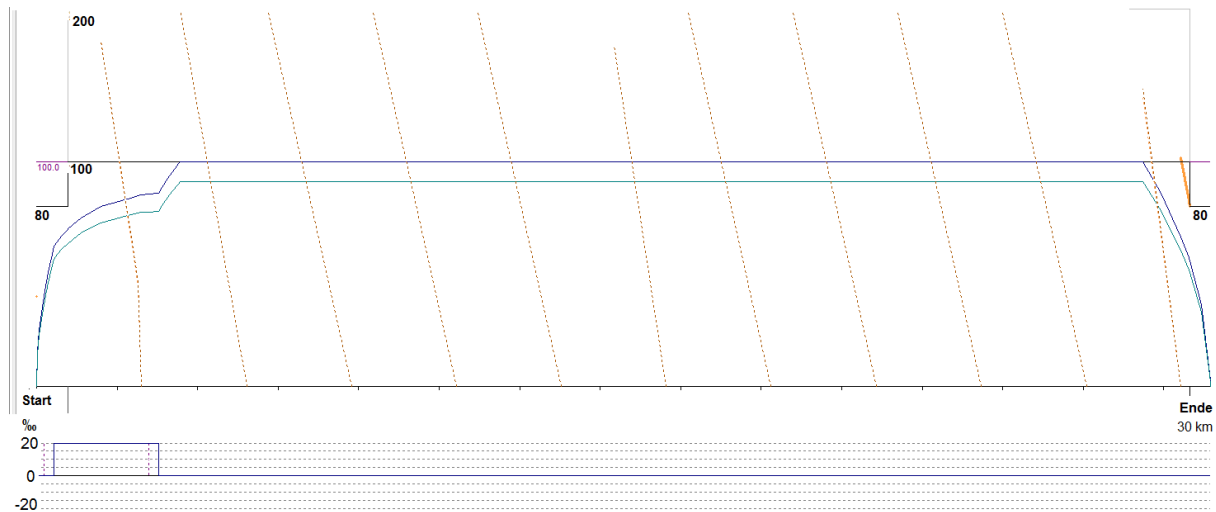
Parameter	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Nivå	-1	1	-1	1	-1	-1	1
Forklaring	2P2G	20‰	200 km/t	Stigning	stopp	akselererende	30 km

Det presiseres at strekningen fra utredningsrapporten planlegges som en enkeltsporet trasé, mens analysene som er gjennomført i denne oppgaven tar utgangspunkt i en dobbeltsporet strekning. Denne caseanalysen ser på et fremtidig scenario med tenkt dobbeltspor på strekningen. På denne måten er de to situasjonene sammenliknbare. Analyse av strekningen som en dobbeltsporet jernbane vil kunne gi svar på om det er stigningsgraden som vil begrense kapasiteten på strekningen, eller om kapasiteten begrenses av det faktum at linjen planlegges med enkeltsporet drift som maksimalt oppnår en kapasitet på 4-5 tog/time. Dette diskuteres ytterligere i kapittel 6. Casestudiet tar heller ikke hensyn til at strekningen ligger i tunnel. Tunnelen vil medføre ekstra luftmotstand (Profillidis, 2014, s. 381-401), men er sett bort fra i analysene.

En viktig forskjell mellom casestudiet og referansestrekningen er at referansestrekningen har 200 meters avstand mellom utgangsstasjonen til togene og stigningens start. I praksis vil ikke denne avstanden ha stor påvirkning på oppnådd hastighet, siden togene ikke rekker å akselerere opp i stor hastighet på 200 meter. Ved nærmere studie av kjøretidsberegningen fra LUKS ble det imidlertid observert at godstoget hadde nådd 62 km/t i løpet av de første 200 meterne. Høy oppnådd hastighet kan skyldes at LUKS forutsetter ideelle adhesjonsforhold ved sine beregninger, slik at rask akselerasjon oppnås.

Gjennomføring av analyser

Hastighetsdiagrammet for godstoget på referansestrekningen er studert, og vises i Figur 36 . Diagrammet viser at godstoget har en hastighet på 62,28 km/t ved starten av stigningen på 20%. Etter å ha kjørt i stigningen i tre km møter toget igjen «flatmark», null%. På slutten av stigningen har godstoget hastigheten 85,39 km/t. Godstoget når altså ikke sin maksimale hastighet på 100 km/t i løpet av tre km med en stigning på 20%.



Figur 36: Hastighetsdiagram for godstog på referansestrekningen

Figur 36 viser at toget akselererer opp i maksimal hastighet først etter at det har passert partiet med stigning. Det vil derfor være interessant å studere om denne situasjonen medfører et stort kjøretidstap og påvirker kapasiteten på strekningen. Dette vil som beskrevet tidligere være overførbart til strekningen som er utredet mellom Lågheller og Mjølfjell.

Referansestrekningen presentert i Tabell 18 er benyttet som basis for oppbygning av caseanalysens strekning. Karakteristikkene fra Tabell 18 ble holdt konstante, men stigningsgraden ble endret slik at hele strekningen ligger i konstant stigning, inkludert start- og stoppestedene. Godstogene starter dermed fra null km/t i en stigning på 12,5%. Det er forventet et tap i startfasen som følge av akselerasjon i stigningen, fordi togene både må overvinne en startmotstand og akselerere med stigningsmotstanden til stede. Dette påvirker tilgjengelig motorkraft for å akselerere toget opp i hastighet. Casestudiet er studert med togmiksen 2P2G og 4POG. Resultatene fra casestudiet presenteres i kapittel 5.4.

5. Resultater

MMT for hver analysevariant er benyttet for å beregne hoved- og samspillseffekter for analyseparameterne og interaksjoner mellom dem. Disse effektene gir svar på hvilke av de analyserte parameterne, eventuelt kombinasjoner av dem, som har størst påvirkning på kapasiteten på strekningen. Resultatene presenteres i dette kapitlet.

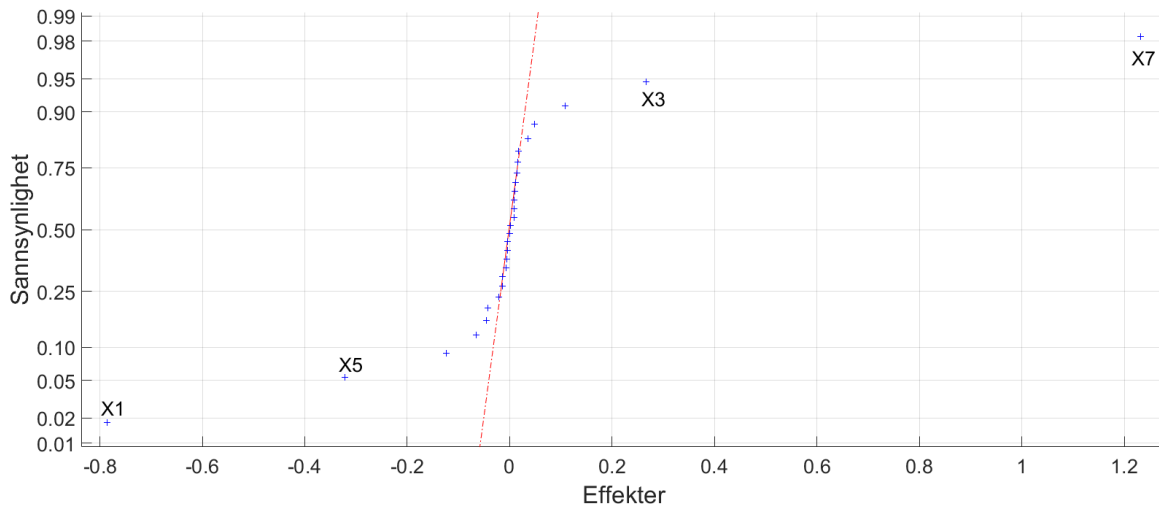
Først presenteres resultater fra «original-analysene». Analysevariantene som gir det høyeste og laveste kapasitetstallet drøftes så med hensyn på de observerte effektene, før resultater fra sensitivitetsanalysene og casestudiet presenteres til slutt.

5.1 Parameterstudie

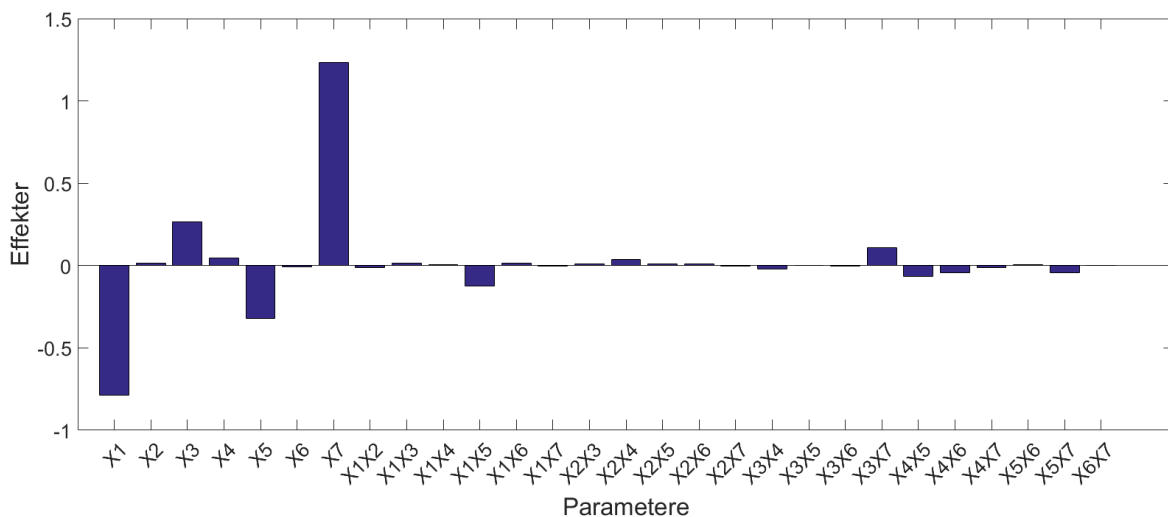
De beregnede hoved- og samspillseffektene vises i Figur 37 og Figur 38. Eksakte verdier for effektene er presentert i vedlegg 4. Parameterne som har størst effekt på kapasiteten på analysestrekningen er ifølge de gjennomførte analysene parameter X7 (strekningsslengde), X1 (togmiks), til en viss grad X5 (hastighetsprofil) og X3 (togtype).

Figur 37 viser et *Normal Probability Plot* (NPP) for de beregnede effektene. Effektene som faller utenfor den rette linjen i NPP kan ikke forklares som tilfeldigheter, og vurderes til å ha påvirkning på kapasiteten på analysestrekningen. Figur 38 viser de samme resultatene fremstilt i et stolpediagram. Figuren viser størrelsesordenen til hver hoved- og samspillseffekt. Fortegnene til effekten av hver parameter (og interaksjon) kommer tydelig fram fra diagrammet. Positive og negative verdier på effektene viser til nivå 1 og nivå 2 som hver analyseparameter er delt inn etter (ref. Tabell 12, s. 60). De beregnede effektene som vises i Figur 37 og Figur 38 indikerer dermed hvilke parametere og hvilket nivå som vil ha mest negativ påvirkning på kapasiteten på strekningen. En negativ verdi av parameter X1 (togmiks) refererer til nivå 2 i Tabell 12, dvs. at togmiksen består av tre godstog og ett persontog. En positiv verdi av X7 refererer til nivå 1 i Tabell 12, dvs. lang analysestrekning, osv. Størrelsen på effekten viser til parameterens relative påvirkning på kapasiteten, slik at en stor effekt (i absoluttverdi) tilsvarer en stor påvirkning. For Figur 37 sier avstanden fra linjen noe om hvor stor påvirkning på kapasiteten parameteren (eller interaksjonen) har, mens Figur 38 viser påvirkning i form av størrelsen på stolpen til hver parameter (og interaksjon).

Sannsynligheten på y-aksen viser akkumulert sannsynlighet.



Figur 37: NPP for hoved- og samspillseffekter



Figur 38: Stolpediagram for hoved- og samspillseffekter

Resultatene viser at stigningsgraden (parameter X2) ikke har stor påvirkning på kapasiteten på strekningen, verken alene eller i kombinasjon med øvrige analyseparametere. Dette kommer tydelig fram dersom eksakte verdier for de beregnede effektene studeres. Tabell 19 viser beregnet effekt for de dominerende parameterne X7 (strekningensleng) og X1 (togmik) sammenliknet med parameter X2 (stigningsgrad). Man observerer at effekten av X2 er svært liten sammenliknet med de utslagsgivende parameterne X7 og X1. Tabellen er framstilt med absoluttverdier for å illustrere størrelsesordenen av påvirkningen.

Tabell 19: Sammenlikning av stigningsgradens effekt med de dominerende parameterne

<i>Parameter</i>	<i>Effekt</i>
<i>X7 (strekningsslengde)</i>	1,232
<i>X1 (togmiks)</i>	0,786
<i>X2 (stigningsgrad)</i>	0,017

Videre presenteres analysevariantene med lavest og høyest kapasitet av samtlige av de 128 analysevariantene. Ved å studere parameterkombinasjonen til variantene med høyes og lavest opptredende kapasitet vil man kunne si om karakteristikene for de respektive analysevariantene er som forventet med tanke på effektene presentert i Figur 37 og Figur 38.

5.2 Drøfting og utdyping av resultatene

Fra de 128 analysevariantene er tilfellet med høyest og lavest kapasitet identifisert. Kapasitetstallene vises i Tabell 20. Kapasitetstallene for de ulike analysevariantene fremstilles med desimaltall for å skille analysevariantene fra hverandre. Dette er gjort fordi endring i kapasitet for de ulike variantene først kommer til syne i desimalene. Tabellen viser også MMT, der høy MMT gir lavt kapasitetstall.

Tabell 20: Absolutt lavest og høyest kapasitet for samtlige 128 analysevarianter med tilhørende MMT

<i>Tilfelle</i>	<i>Kapasitet [tog/time]</i>	<i>MMT [min]</i>
<i>Lavest kapasitet</i>	10,21	5,874
<i>Høyest kapasitet</i>	19,26	3,115

Analysevarianten som gir lavest kapasitetstall har karakteristikker som vist i Tabell 21. Nivåene er beskrevet i Tabell 12 (s. 60).

Tabell 21: Karakteristikker for analysevariant med lavest kapasitet

Parameter	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Nivå	-1	1	1	1	-1	-1	1
Forklaring	1P3G	20%	250 km/t	Stigning	stopp	akselererende	30 km

Denne kombinasjonen av parameteres nivåer gir som forventet den laveste kapasiteten, fordi samtlige av parameterne er på sitt «verste» nivå. Fra Tabell 21 ser man at analysevarianten har mange godstog, stor stigning, stor hastighetsdifferanse, akselererer opp i hastighet inne i stigningen og har lang analysestrekning. Tilsvarende ser man at analysevarianten som gir høyest kapasitetstall har kombinasjon av parameterne som er forventet å gi den største kapasiteten da samtlige av parameterne er på sitt «beste» nivå. Tabell 22 viser karakteristikene for analysevarianten, som har få godstog, lav stigning, lav hastighetsdifferanse, og ingen akselerasjon innenfor analysestrekningen som er kort i dette tilfellet.

Tabell 22: Karakteristikker for analysevariant med høyest kapasitet

Parameter	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Nivå	1	-1	-1	1	1	1	-1
Forklaring	3P1G	12,5‰	200 km/t	Stigning	flying	full	15 km

Ved å se på avrundede kapasitetstall ser man imidlertid at flere av de 128 analysevariantene kan klassifiseres med den laveste eller høyeste formen for kapasitet. Tabell 23 viser dette. MMT for de ulike analysevariantene varierer mellom 5,47-5,87 minutter for lavest kapasitet, og 3,11-3,14 minutter for høyest kapasitet.

Tabell 23: Lavest og høyest kapasitet og antall forekomster for samtlige 128 analysevarianter

<i>Tilfelle</i>	<i>Kapasitet [tog/time]</i>	<i>Antall forekomster</i>
<i>Lavest kapasitet</i>	10	17
<i>Høyest kapasitet</i>	19	6

Felles for de 17 forekomstene som gir lavest kapasitetstall er at de har størst hastighetsvariasjon (persontoget ICE sammen med godstoget i analysene) og lengst analysestrekning (30 km). For de 6 analysevariantene med den høyeste kapasiteten identifiseres situasjonene med *flying start*, kort analysestrekning og lavest hastighetsdifferanse (persontoget BM74 sammen med godstoget i analysene) som fellestrekk. I tillegg observeres det at situasjonene med høyest kapasitetstall har en positiv stigningsgrad. Dette kan skyldes at togene må innlede bremsing tidlig ved fremføring i fall, slik at kjøretiden øker.

Den høyeste kapasiteten opptrer kun ved togmiksen tre persontog/ett godstog, mens den laveste kapasiteten kun opptrer ved togmiksen ett persontog/tre godstog. Både strekningslengde og togmiks er dermed karakteristikk som kan knyttes til høyest og lavest opptredende kapasitet, sammen med hastighetsprofil og togtype (hastighetsdifferanse). Dette tyder på at de

identifiserte parameterne presentert i Figur 37 og Figur 38 (s. 77) stemmer overens med opptredende lavest og høyest kapasitet når analysevariantene studeres.

Av resultatene presentert ser det ut til at kombinasjon av parametere på sine «verste» og «beste» nivåer resulterer i henholdsvis lavest og høyest kapasitet. Av dette vil man forvente utslag for samspillseffekter i de gjennomførte beregningene ved 2^n FF, siden lite gunstige kombinasjoner av parameterne forventes å ha en større negativ innvirkning enn kun en enkeltstående parameter. Det observeres imidlertid svært små samspillseffekter mellom variablene (ref. Figur 37 og Figur 38, s. 77). Basert på denne observasjonen, samt ønske om å kvalitetssikre de identifiserte parameterne er det valgt å gjennomføre en sensitivitetsanalyse for en av de analyserte parameterne. Resultatene presenteres videre.

5.3 Sensitivitetsanalyser

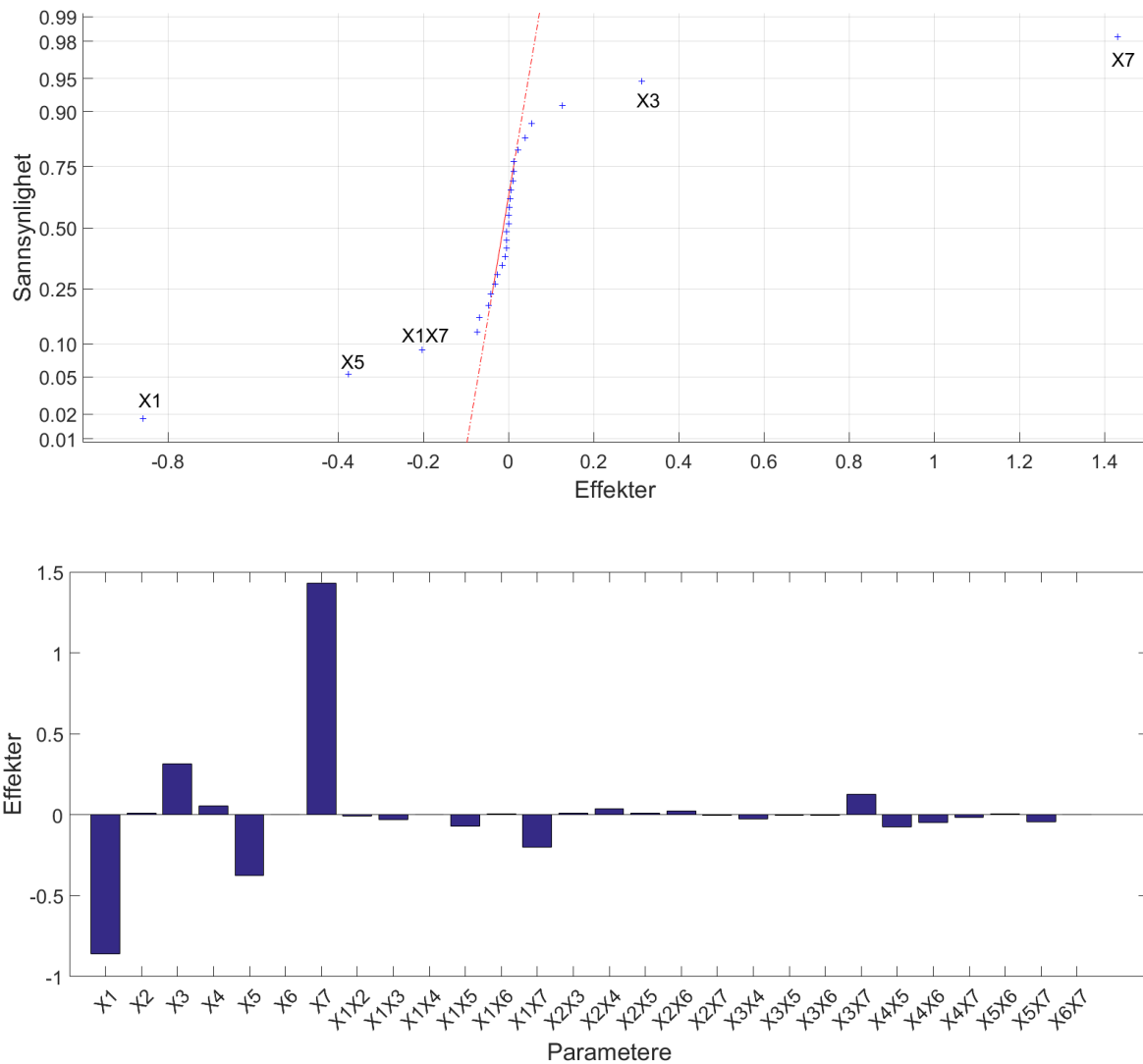
Resultatene fra sensitivitetsanalysene presenteres i det følgende. Bakgrunnen for utførelsen ble presentert i kapittel 4.3, og nivåene som benyttes for parameter X1 (togmiks) er basert på Tabell 17 (s. 70). Nøyaktige verdier for de beregnede hoved- og samspillseffektene er vist i vedlegg 4. Effektene illustreres i Figur 39 til Figur 41.

Sensitivitetsanalyse 1 (Sens. 1)

I denne analysen er togmiksen studert som følger:

- Tre persontog og ett godstog (nivå 2, kode +1)
- To persontog og to godstog (nivå 3, kode -1)

Hoved- og samspillseffektene vises i Figur 39.



Figur 39: NPP og stolpediagram for Sens. 1

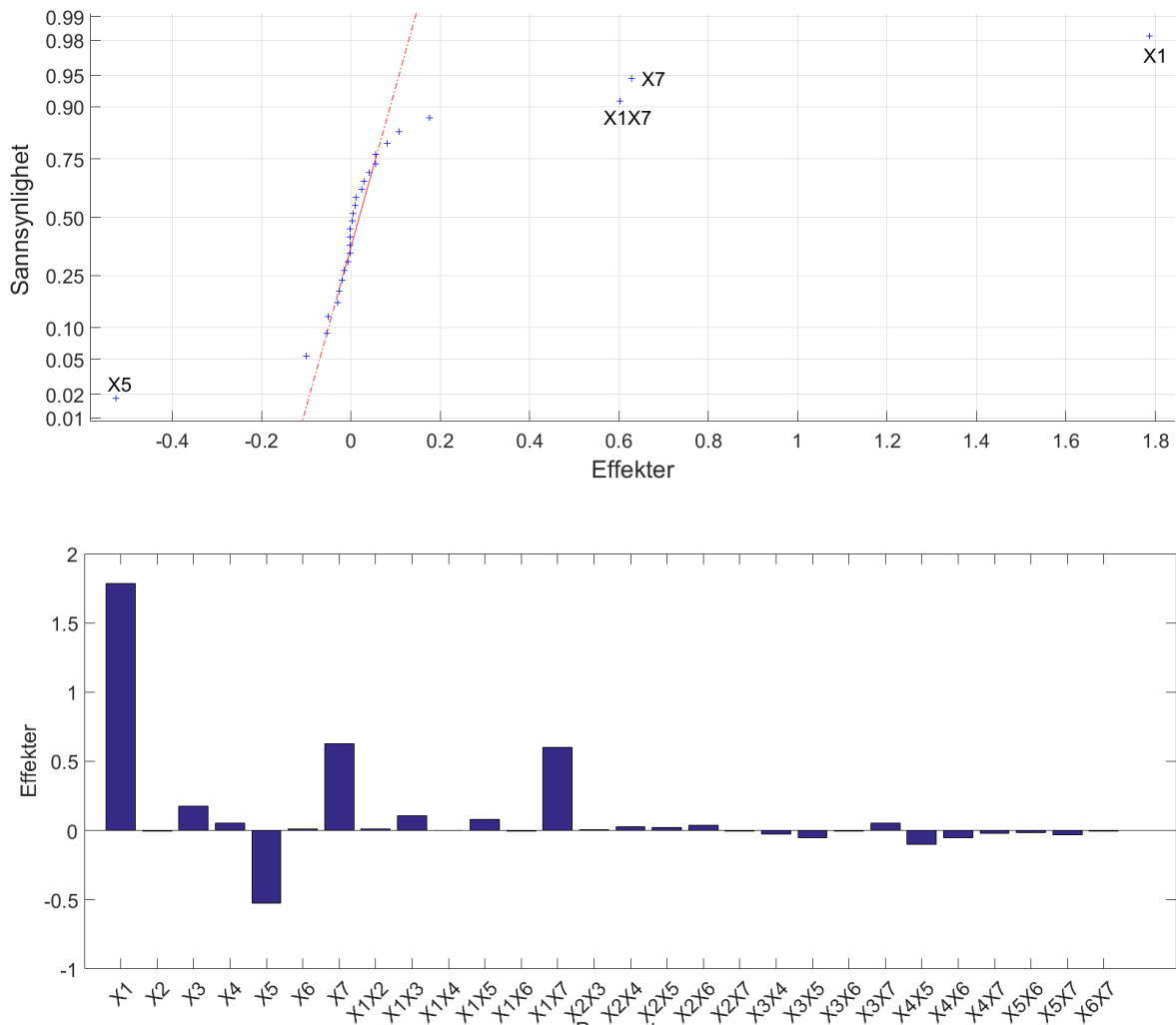
Resultatene viser at det fortsatt er parameter X7 (strekninglengde) som er den dominerende parameteren, sammen med X1 (togmiks) og til en viss grad X5 og X3 (hastighetsprofil og togtype). Man ser imidlertid at samspillseffekten av variabel X1X7 kommer mer tydelig til syne, sammen med en viss økning av effekten fra kombinasjonen X3X7.

Sensitivitetsanalyse 2 (Sens. 2)

I denne analysen er togmiksen studert som følger:

- Tre persontog og ett godstog (nivå 2, kode +1)
- Fire persontog og ingen godstog (nivå 1, kode -1)

Hoved- og samspillseffektene vises i Figur 40.



Figur 40: NPP og stolpediagram for Sens. 2

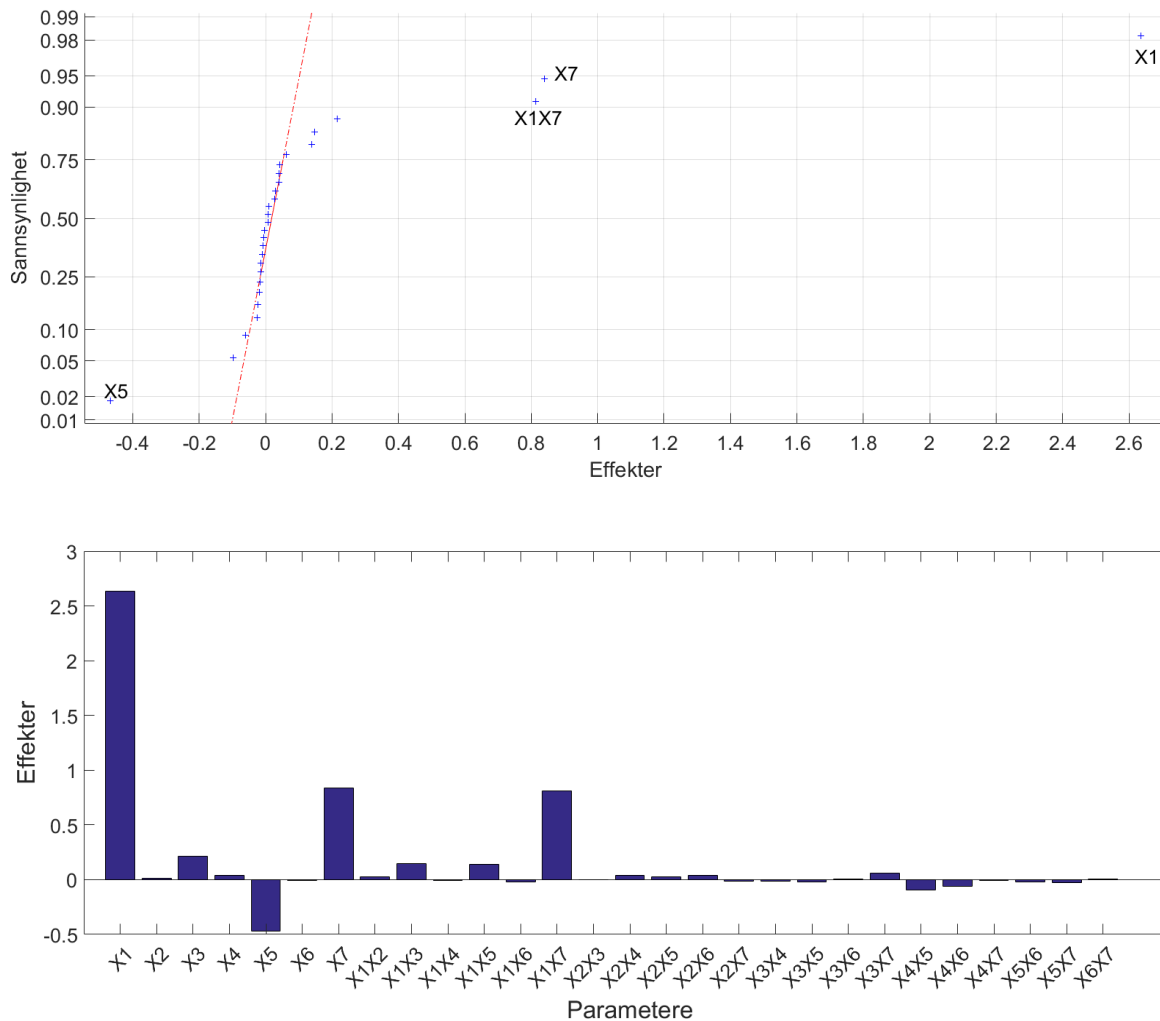
Resultatene viser nå at effekten av parameter X1 (togmiks) er større enn X7 (strekninglengde). Samspillseffekten av parameter X1 og X7 kommer tydeligere frem, og er nå større enn effekten av parameter X5 (hastighetsprofil). Øvrige samspillseffekter er fortsatt små sammenliknet med de dominerende parameterne. Resultatene viser også at effekten av X1 endres fra å ha negativt fortegn til å ha positivt fortegn. Dette gjør at samspillseffekten X1X7 kommer til syne.

Sensitivitetsanalyse 3 (Sens. 3)

I denne analysen er togmiksen studert som følger:

- To persontog og to godstog (nivå 3, kode +1)
- Fire persontog og ingen godstog (nivå 1, kode -1)

Hoved- og samspillseffektene vises i Figur 41.



Figur 41: NPP og stolpediagram for Sens. 3

Resultatene viser igjen at effekten av parameter X1 (togmiks) er større enn effekten av X7 (strekningsslengde). Sammenliknet med Sens. 2 observeres det også at størrelsen til effekten av X1 har økt fra 1,787 til 2,636. Effekten av X7 har også hatt en økning, men i mindre grad (fra 0,627 til 0,840). Samspillseffekten av X1X7 er fortsatt tydelig, mens øvrige samspillseffekter er små. X5 har holdt et jevnt nivå for samtlige analyser.

Tabell 24 viser en oversikt over kapasitetstallene for sensitivitetsanalysene, sammen med basistilfellet (Figur 37 og Figur 38, s. 77). Tabellen viser høyest og lavest kapasitetstall for de ulike situasjonene, rundet ned til nærmeste heltall.

Tabell 24: Kapasitetstall for sensitivitetsanalysene og basistilfellet

Kapasitet	Basis	Sens. 1	Sens. 2	Sens. 3
<i>Høy</i>	19	19	31	31
<i>Lav</i>	10	9	11	9

Fra tabellen ser man at det er sensitivitetsanalyse 3 som gir ytterpunktene i kapasitetstallene. En annen viktig observasjon fra sensitivitetsanalysene er at enkelte av samspillseffektene øker. For sensitivitetsanalyse 3 øker samspillseffekten mellom X1X7 fra 0,004 i basisanalysene til 0,81 i sensitivitetsanalyse 3 (gitt i absoluttverdier).

Det er interessant å se på interaksjonen mellom stigningsgraden (X2) og de to identifiserte hovedeffektene (strekningsslengde (X7) og togmik (X1)). Tabell 25 viser interaksjonseffekter mellom de tre parametere for de utførte analysene. Tallene er gitt i absoluttverdier.

Tabell 25: Utvikling av samspillseffekten mellom X1X2X3

Situasjon	Samspillseffekt X1X2X7
<i>Basis</i>	0,00117
<i>Sens. 1</i>	0,00128
<i>Sens. 2</i>	0,00126
<i>Sens. 3</i>	0,01285

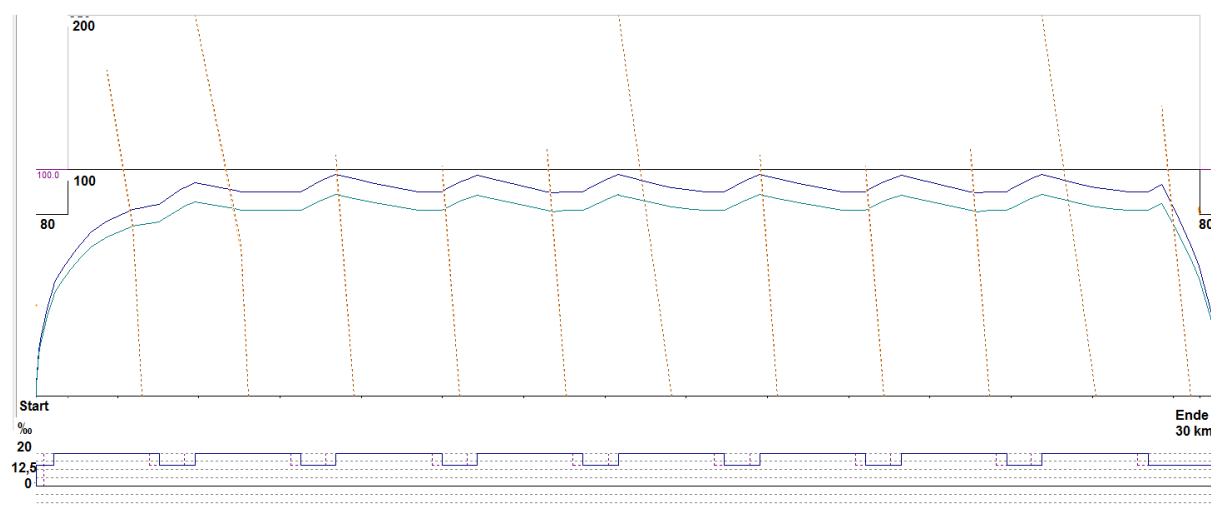
Tabell 25 viser at samspillseffektene kommer mest til syne ved sensitivitetsanalyse 3. Det samme er observert for øvrige trippelinteraksjoner av parametere. Effektene er imidlertid små sammenliknet med de dominerende parametere, og omtales ikke ytterligere.

Basert på resultatene som er presentert i dette kapitlet er det resultatene fra sensitivitetsanalyse 3 som presenteres i den vitenskapelige artikkelen, som utgjør del 2 av masteroppgaven.

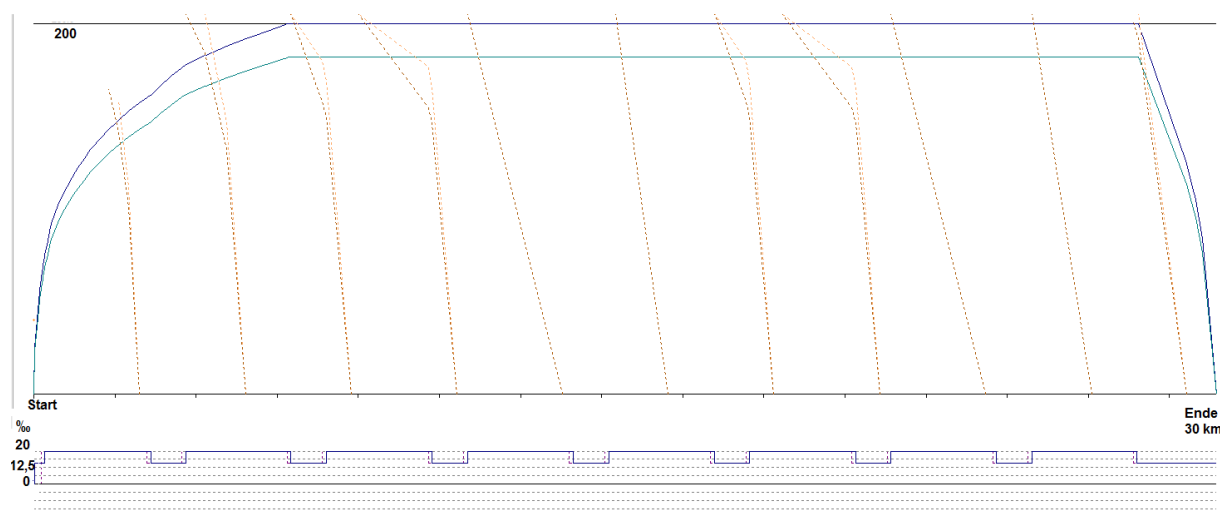
5.4 Casestudie

Figur 42 og Figur 43 viser hastighetsdiagrammene til henholdsvis godstog og persontog på strekningen i casestudiet. Av Figur 42 ser man tydelig at godstoget taper hastighet ved stigningen på 20%, og vinner hastighet i pustepartiet på 12,5%. Det når imidlertid aldri sin maksimale hastighet på 100 km/t.

For persontoget i Figur 43 ser man at stigningen ikke påvirker hastigheten i like stor grad som for godstoget. Toget akselererer opp i sin maksimale hastighet på 200 km/t, men bruker lengre tid på akselerasjonen enn i tilfellet uten kontinuerlig stigning.



Figur 42: Hastighetsdiagram for godstog i kontinuerlig stigning på casestrekningen



Figur 43: Hastighetsdiagram for persontog i kontinuerlig stigning på casestrekningen

Kapasitetsberegningene for casestudiet er utført på samme måte som for analysene beskrevet tidligere i oppgaven. Resultatene presenteres i Tabell 26, sammen med kapasitetstallene fra referansestrekningen. Tabellen inkluderer MMT og kjøretidene for de to strekningene.

Tabell 26: Kapasitetstall, MMT og kjøretid for casestudiet sammenliknet med referansestrekningen

	Kapasitet <i>[tog/time]</i>		MMT <i>[min]</i>		Kjøretid <i>godstog [min]</i>	Kjøretid <i>persontog [min]</i>
	<i>2P2G</i>	<i>4P0G</i>	<i>2P2G</i>	<i>4P0G</i>		
<i>Togmiks</i>						
<i>Referansestrekning</i>	10	22	5,79	2,64	24,43	12,47
<i>Casestudie</i>	9	22	6,44	2,68	26,40	12,54

Man ser at togfølgetiden øker og kapasiteten synker med ett tog i timen ved togframføring i konstant stigning for tilfellet med maksimal togmiks (50% av hvert togs slag). Situasjonen med homogen togtrafikk er ikke berørt av stigningen. Dette skyldes at persontoget ikke påvirkes i stor grad av stigningen (ref. hastighetsdiagrammet for persontog i Figur 43). Videre observeres et kontinuerlig kjøretidstap for godstoget. Dette skyldes at godstoget aldri når sin maksimale hastighet på strekningen.

5.5 Oppsummering av resultater

Resultatene fra 2ⁿ FF viste at strekningslengde og togmiks har størst påvirkning på kapasiteten på modellstrekningen. Stigningsgraden viste ingen tydelig effekt, verken alene eller i kombinasjon med øvrige analyseparametere. Det er gjennomført en sensitivitetsanalyse for å si noe om hvor sensitive resultatene er for valg av nivåer på analyseparametere. På bakgrunn av analysene skal resultatene fra sensitivitetsanalyse 3 benyttes i den vitenskapelige artikkelen. Sensitivitetsanalyse 3 identifiserte togmiks og strekningslengde, sammen med interaksjonen mellom togmiks og strekningslengde som dominerende. Analysevariantene med høyest og lavest kapasitetstall ble identifisert. Videre viste casestudiet et kapasitetstap på ett tog per time og et kontinuerlig kjøretidstap ved studie av en strekning i kontinuerlig stigning.

6. Diskusjon

Dette kapitlet tar for seg diskusjon av resultatene presentert i kapittel 5, samt gjennomføringen av oppgaven. Resultatene blir først vurdert med hensyn på pålitelighet og anvendbarhet. Videre diskuteres resultatene med bakgrunn i kjent teori, før de sammenliknes med liknende undersøkelser fra litteraturen. Til slutt diskuteres svakheter ved analysene, sammen med begrensninger ved metoden og gjennomføringen.

6.1 Vurdering av resultater

Pålitelighet

Denne studien har identifisert togmiks og strekningslengde som de mest dominerende parameterne for kapasiteten på strekningen. Dette er i samsvar med kjent teori, der blant annet Skartsæterhagen (1993) sier at kapasiteten på en dobbeltsporet jernbanestrekning blir vesentlig lavere med blandet trafikk enn ved ensartet trafikk. Strekningslengden vil avgjøre hvor lang tid et tog bruker på å kjøre mellom to stasjoner, og Abril et al. (2008) omtaler en lang strekning som en flaskehals på en jernbanelinje. Samsvar med litteraturen forsterker påliteligheten til resultatene i denne studien.

Resultatene i denne oppgaven baserer seg på togfølgetider hentet ut fra en infrastrukturmodell kandidaten selv har bygget opp. En modell er en forenkling av virkeligheten, og modellen er tilpasset denne studien. Infrastrukturmodellen baserer seg på faktiske krav og anbefalinger for prosjektering av jernbanelinjer i Norge fra TR. Resultatene er dermed basert på nøyaktige antagelser og valg for infrastrukturen. Resultatene baserer seg imidlertid på en manuell avlesning av MT, noe som medfører en usikkerhet vedrørende reproduserbarheten av resultatene.

De avleste MT fra LUKS er beregnet til MMT, som er benyttet i parameterstudiet. Omregningen medfører en akkumulert avrunding, noe som også kan føre til unøyaktige resultater. Formålet med denne oppgaven er imidlertid å se på trender og utvikling av kapasiteten. Endringer i desimaltallene har dermed lite å si for resultatene. I enkelte sammenhenger kan avrunding av desimaler medføre at kapasitetstallet rundes opp eller ned med ett tog i timen. Dette kan ha utslagsgivende effekt på kapasitetstallene. Situasjonen er observert i forbindelse med Tabell 23 (s. 79) som viser kapasitet som heltall. For enkelte analysevarianter er kapasitetstallene på grensen for å rundes enten opp eller ned. Dette gjelder for eksempel to analysevarianter der kapasitetstallet er henholdsvis 18,87 og 18,99 tog/time. Variantene er rundet ned til 18 tog/time, men kunne blitt rundet opp til 19 tog/time ved annen avrunding av MMT. Dette vil påvirke antall forekomster av høy kapasitet i Tabell 23. Avrundingen har imidlertid svært liten innvirkning på parameterstudiet og beregnede hoved- og samspillseffekter, siden effektene er beregnet med MMT og desimaler.

For casestudiet vil imidlertid en slik situasjon kunne ha innvirkning. Det er observert en kapasitetsendring på ett tog per time. Fra diskusjonen over ser man at en endring på ett tog kan skyldes avrundinger av desimalene. For casestudiet er imidlertid nøyaktige verdier for kapasitetstallene 10,36 tog/time for referansestrekningen og 9,32 tog/time for casestrekningen. Ingen av tallene er på grensen til å rundes av annerledes, og resultatene vurderes som pålitelige.

Anvendbarhet

Resultatene er interessante for vurderinger vedrørende optimal vertikal linjeføring. Dette er av interesse for Bane NOR som infrastrukturforvalter. Fra infrastrukturforvalterens ståsted bør strekningen designes mest mulig optimalt for fremføring av ønsket tilbudskonsept og samtidig minimalisere investerings- og driftskostnader. I tillegg må plankrav oppfylles.

Resultatene fra parameterstudien indikerer at stigningsgraden ikke har påvirkning på kapasiteten på strekningen. Denne teorien er studert i casestudiet ved å bygge en strekning i LUKS med kontinuerlig stigning. Casestudien viser heller ingen stor påvirkning fra stigningsgraden på kapasiteten, der strekningen opplever et kapasitetstap på ett tog per time sammenliknet med en referansestrekning. Ved å vurdere kapasiteten isolert sett kan det stilles spørsmål ved om TR stiller optimale krav til stigningsgraden på en jernbanelinje (ref. Tabell 1, s. 4). Det vil i enkelte tilfeller være av økonomisk interesse å følge terrenget i større grad, altså bygge i brattere terreng, eventuelt å benytte kravet til maksimal stigningsgrad lengre enn 3 km.

Det er imidlertid flere aspekter enn kapasitet som må vurderes ved fastsettelse av vertikalgeometri for en jernbanestrekning. Kjøretidsmessig har den kontinuerlige stigningen liten innvirkning på passasjertogene, mens godstogene erfarer et kjøretidstap på strekningen som følge av at maksimal hastighet ikke oppnås. Det vil være mulig å finne en optimal stigningsgrad, der samtlige tog når sin maksimale hastighet. I denne studien er kun stigningsgradene 12,5‰ og 20‰ studert, mens ideell stigningsgrad med tanke på hastighet kan ligge et sted imellom. Hva som er optimalt vil variere fra situasjon til situasjon.

Videre er det interessant å se på optimaliserte stigningsgrader med tanke på økonomi både for infrastrukturforvalter og godsoperatør. Fra de identifiserte parameterne i kapittel 4.1 så man at togenes lengde og tonnasjen er viktige aspekter for godsoperatørene. Som beskrevet tidligere påvirkes disse parameterne av stigningsgraden på strekningen. En stor stigning kan føre til at et ekstra lokomotiv er nødvendig for godstogene som taper hastighet i stigningen (som observert ved casestudiet i denne oppgaven). Dette medfører en ekstra kostnad for godsoperatørene. Ved elektrifiserte linjer vil økende antall lokomotiver ha en konsekvens for kontaktledningsanlegget, som må dimensjoneres for å håndtere flere strømvaktakere. Denne situasjonen er omtalt i en rapport utarbeidet av Trafikkverket og Jernbaneverket (2014) som ser på kapasitetsutfordringer på Malmbanen/Ofofbanen.

Videre kan et bratt terreng medføre erosjon ved togframføring i stigning, og mer slitasje på skinner og materiell som følge av nedbremsing i fall (Bababeik og Monajjem, 2012). Dette vil medføre økte drifts- og vedlikeholdskostnader for infrastrukturforvalter. Ved å følge terrenget i større grad kan imidlertid byggekostnadene reduseres betraktelig, da man for eksempel vil ha mindre skjæringer og fyllinger, samt færre tunneller. I andre tilfeller, slik som i casestudiet, kan strekningslengden reduseres og rasutsatte områdes unngås ved at det bygges en innkorting av banen med høyere stigning.

Kim et al. (2013) har som beskrevet i litteraturgjennomgangen sett på vertikal linjeføring i sammenheng med energiforbruk og kostnader. Ved å sørge for at togene starter i/nære et fall vil man kunne oppnå raskere akselerasjon, noe som er positivt for både kjøretid og blokkering av strekningen. Ved å legge en stigning i nærheten av stoppestedet for et tog vil man også redusere bremselengden, og bremsing kan innledes senere. Det presiseres at stigning på stoppestedet og i akselerasjonssonen vil være negativt for kapasiteten som følge av økt kjøremotstand. Økonomiske konsekvenser og betraktninger tilknyttet energibruk som følge av stigningsgraden er utenfor oppgavens problemstilling og diskuteres ikke ytterligere.

Fra casestudiet ser man at konsekvensen av en kontinuerlig stigning, inkludert start og stopp inne i stigningen, medfører en reduksjon i kapasiteten på ett tog per time. For analysevariantene vil en reduksjon på ett tog per time utgjøre et tap på mellom 5 og 11%, og vurderes som relativ liten.

Casestrekningen som er studert er imidlertid planlagt som et enkeltspor. En enkeltsporet strekning vil oppleve tilsvarende nedsatt framføringshastighet og kjøretidstap som den dobbeltsporede strekningen som er studert i casestudiet. Enkeltsporet drift kan imidlertid ikke sammenliknes direkte med kapasitetsberegninger for en dobbeltsporet jernbanestrekning siden togene kjører annen hver gang i hver retning (og ikke etter hverandre som på et dobbeltspor). Det er avstand og kjøretid mellom kryssingsspor som er avgjørende for kapasiteten på et enkeltspor, og man kan si det er den enkeltsporede driften i seg selv om er kapasitetshemmende. Det er viktig å se den analyserte strekningen i sammenheng med resten av kryssingssporene på Bergensbanen, og se på kjøretiden mellom disse. Dersom det er stort avvik i kjøretidene mellom kryssingssporene som følge av økt stigning på et parti, vil dette kunne være en begrensende faktor for kapasiteten for en enkeltsporet jernbanestrekning. Dersom det ved en stor stigning for eksempel kun kan kjøre to tog i timen, istedenfor tre vil dette ha store konsekvenser for driften. Situasjonen kan løses ved å bygge flere kryssingsspor. Siden denne oppgaven forutsetter dobbeltsporet drift vil ikke konsekvenser for enkeltspor omtales ytterligere.

Siden casestudiet tar for seg en strekning som kun finnes i planstadiet kan resultatene og teoriene dannet fra denne oppgaven benyttes til å vurdere kapasiteten til den planlagte strekningen, og si noe om begrensninger og muligheter for strekningen.

Resultatene i kapittel 5 indikerer at stigningsgraden har minimal påvirkning på kapasiteten på strekningen. Casestrekningen ligger i kontinuerlig stigning, og viser kun et relativt lite kapasitetstap. Ifølge disse resultatene vil strekningen som er planlagt på Bergensbanen kunne bygges med TR sine minstekrav til stigningsgraden basert på kapasitetsmessige vurderinger. Et spørsmål som kan stilles er hvor langt det er mulig å kjøre med en stor stigning før virkelige tap inntreffer for kapasiteten på strekningen. Dette er ikke studert i denne oppgaven.

Det må imidlertid foretas en vurdering for flere aspekter enn kapasitet, som diskutert tidligere. Den kontinuerlige stigningen på strekningen medfører for eksempel et kontinuerlig kjøretidstap på strekningen, og energibruk og energitilførsel må vurderes.

Et interessant moment angående optimalisering av linjeføringen er muligheten for å benytte ulik signalplassering avhengig av hvilken retning togene kjører. Signalavstanden for konvensjonelle, optiske signaler vil som beskrevet tidligere påvirkes av bremselengden til toget, og øker ved økende bremselengde. Bremselengden i stigning vil imidlertid reduseres, som følge av gravitasjonskomponenten. På en dobbeltsporet strekning vil det følgelig være behov for større signalavstand ved kjøring i fall enn når toget trafikkerer strekningen i motsatt retning (stigning). Signaleringen er per dags dato lik for begge spor i begge retninger, til tross for at bremselengden er vesentlig større for retningen med fall. En optimal plassering av signalene per retning vil kunne redusere blokkklengdene, og følgelig BT. Dette kan øke kapasiteten på strekningen. Situasjonen vil medføre at dersom strekningen skal trafikkeres i motsatt retning enn hva som er normal drift (for eksempel som følge av vedlikehold på det ene sporet), vil blokkstrekningene være for korte eller for lange i forhold til hva maksimal linjehastighet tillater. Det er kritisk hvis trafikken går i retningen som medfører for korte blokkstrekninger. I slike situasjoner må en lavere hastighet enn linjehastigheten kreves. Denne situasjonen er ikke studert i denne oppgaven, men kom opp som et diskusjonsmoment ved bearbeidelse av resultatene. Problemstillingen kan være interessant for fremtidig arbeid.

Planlegging av linjeføring for nye jernbanestrekninger innebærer vurderinger fra situasjon til situasjon, og hva som er tilfellet for strekningen som studeres. Det må bygges for trafikken strekningen skal håndtere, samtidig som at det er en økonomisk avveining.

6.2 Forventinger til resultater i forhold til kjent teori

Diskusjonen som følger tar utgangspunkt i resultatene fra kapittel 5 og teorien presentert i kapittel 2. Resultatene blir vurdert og diskutert opp mot forventinger til resultater.

Det observeres svært små effekter av stigningsgraden og interaksjonseffekt av stigningsgraden i kombinasjon med øvrige analyseparametere. Basert på teorien beskrevet i kapittel 2.1 og drøftingen av analysevariantene i kapittel 5.2 vil man forvente at disse effektene er større enn hva som er observert. Dette danner grunnlaget for diskusjonen videre.

Stigningsgraden (X2)

Basert på litteraturgjennomgangen i kapittel 2.1 vet man at stigningsgraden på strekningen påvirker togets framføring. Parameterstudiet viser imidlertid at stigningsgraden på strekningen ikke har påvirkning på kapasiteten. Denne teorien er forsterket fra resultatene fra casestudiet.

Fra drøftingen av resultatene i kapittel 5.2 ser man at den laveste kapasiteten oppstår ved den høyeste formen for hastighetsdifferanse (mellom godstog og persontog type ICE med hastighet 250 km/t). Dette er som forventet, basert på tidligere omtale av togmiks og hastighetsvariasjon på strekningen. Ved å studere hver analysevariant observeres imidlertid at en av analysevariantene avviker fra situasjonen for opptredende høyest og lavest kapasitet som beskrevet i resultatene. Den avvikende analysevarianten trafikkeres av persontog BM74 (hastighet 200 km/t) sammen med godstoget, og har dermed den laveste formen for hastighetsdifferanse. Analysevarianten oppnår imidlertid den laveste formen for kapasitet, altså 10 tog/time (for basisanalysene). Det som skiller denne varianten fra de øvrige variantene som oppnår 10 tog/time er at hastighetsdifferansen er mindre, noe man ville forventet var positivt for kapasiteten. Analysevarianten har en stigning på 20%, noe som indikerer at stigningsgraden kan ha en påvirkning på kapasiteten på strekningen. Dette kommer imidlertid ikke fram fra parameterstudiet, ei heller casestudiet. Påvirkningen kan dermed ikke bekreftes.

Fra kapasitetsstudiene av hver analysevariant vil man også forvente større interaksjonseffekter enn hva som observeres, basert på karakteristikene til variantene med høyest og lavest kapasitet. Forventninger til interaksjonseffekter mellom X2 (stigningsgrad) og øvrige analyseparametere diskuteres videre.

Stigningsgrad (X2) og togmiks (X1) eller togtype (X3)

Fra teorien i kapittel 2.1 vil en økt positiv stigningsgrad føre til økt motstand for toget, ref. Figur 3 (s. 6). Dette skyldes tyngdekraftens påvirkning, og fører til at det er mindre trekraft tilgjengelig til blant annet å akselerere toget. Dette vil føre til en tregere akselerasjon, som igjen fører til lengre kjøretid og blokkering av strekningen (Lindahl, 2001).

Lengre kjøretid på strekningen gjelder i stor grad godstoget, som har størst problemer med å overvinne stigningen. Dette fører til større hastighetsdifferanse mellom persontog og godstog, som man fra litteraturen vet har stor, negativ påvirkning på kapasiteten. På bakgrunn av dette forventes en interaksjonseffekt mellom parameter X2 (stigningsgrad) og X3 (togtype). Resultatene viser at togtypen vil ha en viss effekt på kapasiteten alene, men ikke i kombinasjon med stigningsgraden. Togmiksen (X1) sier også noe om hastighetsdifferanse mellom togene. Heller ikke denne viser stor effekt i kombinasjon med stigningsgraden, men er identifisert som en dominerende parameter alene.

Dersom hastigheten til persontoget reduseres i områder hvor godstoget taper hastighet (som følge av stigning), vil togfølgetiden mellom godstog og persontog kunne reduseres som følge

av lavere hastighetsdifferanse mellom togene. Dette kan øke kapasiteten på strekningen. Tiltaket vil imidlertid redusere gjennomsnittlig hastighet på strekningen. Fra de identifiserte parameterne presentert i kapittel 4.1 vet man at gjennomsnittlig hastighet er en kapasitetspåvirkende parameter, siden høyere hastigheter reduserer gjennomkjøringstiden av og blokkeringen av strekningen. Tilsvarende, dersom hastigheten til godstogene øker vil hastighetsdifferansen på strekningen reduseres. Boysen (2014) sier at dersom hastigheten til et godstog på en linje med blandet trafikk (der persontrafikken er høyhastighetstog) øker fra 100 km/t til 120 km/t, kan det potensielt legges til en godstogruteleie per time. Dette er et argument for at godstoget ikke skal tape hastighet på strekningen som følge av økt stigning. Landex og Kaas (2005) sier at det må vurderes en optimal hastighet, da økt hastighet også vil påvirke bremselengdene, som vil medføre økt togfølgetid. Dette vil føre til lavere kapasitet på strekningen. Skartsæterhagen (1993) hevder imidlertid at det er kjøretidsdifferansen som er den mest kapasitetspåvirkende parameteren. Det er dermed viktig å sørge for at godstog opprettholder hastigheten på strekningen. Alternativt der det er et godt tiltak å øke kjøretiden til persontoget for å redusere hastighetsdifferansen på strekninger hvor godstoget taper hastighet.

Stigningsgrad (X2), hastighet ved møte av stigningsgraden (X6) og hastighetsprofil (X5)

Effekten av stigningsgrad (X2) i kombinasjon med hastighet ved møte av stigningsgraden (X6) er forventet å ha en effekt fordi akselerasjonsegenskapene til togene påvirkes av stigningsmotstanden. Dette gjelder også for hastighetsprofilet (X5). Dersom togene møter en stigning mens de fortsatt akselererer seg opp i hastighet vil dette føre til en større samlet kjøremotstand, og det er mindre motorkraft tilgjengelig til å akselerere toget. Dette kan som beskrevet tidligere føre til at toget bruker lengre tid på å akselerere, slik at strekningen blokkeres lengre. Denne situasjonen vil i teorien innebære en interaksjon mellom de tre parameterne stigningsgrad (X2), hastighetsprofil (X5) og hastighet ved møte av stigningsgraden (X6). Trippelinteraksjoner er ikke inkludert i denne oppgaven. Det observeres ingen interaksjon mellom stigningsgrad og hastighetsprofil, heller ikke stigningsgrad og hastighet ved møte av stigningsgraden.

Dersom togene møter et parti med fall mens de fortsatt er i akselerasjon vil det imidlertid bidra til hastighetsøkningen, slik at togene når sin maksimale hastighet raskere. Dette er omtalt av Kim et al. (2013), som sier at fall på strekningen vil føre til kortere kjøretid på strekningen. Dersom togene møter strekningen med fall etter at de har nådd linjehastigheten må de imidlertid innlede bremsing for å ikke overstige tillatt linjehastighet. Videre forventes det at kapasiteten reduseres som følge av fall, siden bremselengden øker og fører til større signalavstand. Økt signalavstand vil føre til at minste togfølgetid øker (Abril et al., 2008). Økt blokk lengde og signalavstand som følge av fall på strekningen er illustrert i Figur 21 (s. 50). Effekten av fall er imidlertid minimert i denne oppgaven, som følge av at modellen ble bygget med faste blokk lengder for samtlige analysevarianter. Dette diskuteres i kapittel 6.4.

Hastighetsprofilen (X5) alene har en synlig effekt på kapasiteten, og fra kapittel 5.2 ser man at samtlige av forekomstene med høyest kapasitet opptrer ved situasjonen *flying start*. Hastighet ved møte av stigningsgraden (X6) har ingen synlig effekt.

Stigningsgrad (X2) og strekningens lengde (X7)

Stigningsgraden (X2) er også forventet å ha interaksjonseffekt med strekningens lengde (X7). For den korte strekningen (15 km) utgjør partiet med stigning/fall (3 km) 20% av strekningens lengde. For den lange strekningen (30 km) utgjør samme parti 10% av lengden. En større andel av den korte strekningen ligger i stigning eller fall enn ved lang strekning.

Fra det gjennomførte casestudiet ser man imidlertid at kontinuerlig stigning (altså 100% av strekningen i stigning) har minimalt å si for kapasiteten på strekningen, og man observerer ingen interaksjoner mellom de to parameterne. Strekningslengden alene virker inn på kapasiteten, som omtalt tidligere.

Stigningsgrad (X2), togmiks (X1) og strekningens lengde (X7) – flere interaksjoner

Interaksjonseffekten mellom de tre parameterne stigningsgrad (X2), togmiks (X1) og strekningslengde (X7) er beregnet for å studere om stigningsgraden i kombinasjon med de to dominerende parameterne har en effekt på kapasiteten. Interaksjonseffekten mellom de tre faktorene er svært liten (ref. Tabell 25, s. 84), og underbygger valget om å utelate interaksjonene for mer enn to parametere fra denne studien.

Basert på drøftingen av resultatene som er presentert i kapittel 5.2 ser man som beskrevet at det er analysevarianten med kombinasjoner av de forventet «dårligste» nivåene som også oppnår lavest kapasitet, mens analysevarianten med «best» kombinasjon også oppnår høyest kapasitet. Analysene viser imidlertid svært små interaksjonseffekter for samtlige av analyseparameterne bortsett fra interaksjonen X1X7.

6.3 Sammenlikning med eksisterende forskning

Videre diskuteres resultatene sett i sammenheng med studier rundt samme tema. Som beskrevet i kapittel 2.2 finnes det få studier som er direkte sammenliknbare med temaet som er undersøkt i masteroppgaven. Det er derfor vanskelig å trekke direkte paralleller mellom denne studien og andre kapasitetsstudier. Flere studier ser som beskrevet tidligere på energiforbruk og kostnader, der stigningsgraden har en klar påvirkning. Et konkret eksempel fra casestudien er at det vil være et konstant kjøretidstap som følge av konstant stigning. I følge Bababeik og Monajjem (2012) kan økt kjøretid betegnes som en økt brukerkostnad. Lindahl (2001) har sett på konsekvensen av at et godstog trafikkerer en strekning med tanke på akselerasjons- og bremseegenskaper, men har ikke sett direkte på konsekvenser for kapasiteten på strekningen.

Hu et al. (2014) har studert stigningens påvirkning på kapasiteten, og er den eneste studien kandidaten er kjent med som har sett på denne sammenhengen. Hu et al. (2014) sier at det er flere parametere enn stigningsgraden alene som påvirker kapasiteten. Dette støtter valget om å gjennomføre en parameterstudie for mulige kapasitetspåvirkende parametere i masteroppgaven.

Hu et al. (2014) konkluderer med at stigningen alene ikke påvirker kapasiteten på en strekning. Dette samsvarer med denne studien, der man ser at parameter X2 (stigningsgrad) ikke har en stor effekt på kapasiteten alene. Hu et al. (2014) sier imidlertid at stigningen sammen med strekningslengde og hastighet vil kunne føre til økt kapasitetstap på strekningen. Denne effekten kommer ikke til syne i denne studien. Effektene av stigningsgraden i kombinasjon med øvrige analyseparametere er som diskutert er svært liten.

Resultatene som er presentert i kapittel 5 avhenger i stor grad av forutsetningene som er definert og valgene som er gjort for oppgaven. Dette kan føre til variasjoner i forhold til studien til Hu et al. (2014). Man kan imidlertid se enkelte likhetstrekk mellom de to studiene. Strekningslengde og hastighet er parametere som er studert i begge studiene. Parameterne har vist seg å ha en tydelig effekt i denne studien, men ikke i kombinasjon med stigningsgraden. Videre finner Hu et al. (2014) at strekningslengden har en større innvirkning enn gjennomsnittshastigheten på strekningen, som også er observert i denne studien (der parameter X3-togtype med ulike hastigheter har mindre innvirkning enn X7-strekningslengde).

Denne studien skiller seg fra studien til Hu et al. (2014) ved at det er inkludert flere analyseparametere. En mulig forklaring på forskjellene i resultatene mellom studiene er dermed at denne studien inkluderer parametere som har en *større* påvirkning på kapasiteten enn parametere som er studert av Hu et al. (2014). Dette kan føre til at mulige effekter av stigningsgraden ikke kommer like tydelig frem i denne studien. Hu et al. (2014) har for eksempel kun ett togslag som trafikkerer strekningen. Fra denne studien er togmiksen den mest utslagsgivende parameteren på kapasiteten. Videre tar den gjennomførte studien kun for seg stigningsgraden på to nivåer (12,5‰ og 20‰). Hu et al. (2014) har sett på stigninger opp til 35‰, og finner at kapasitetstapet er størst ved størst stigning. Ved å studere større stigningsgrader vil man dermed forvente større utslag på kapasiteten. En stigningsgrad på 12,5‰ eller 20‰ i realiteten er svært lavt.

6.4 Svakheter og begrensninger

Videre presenteres svakheter og begrensninger knyttet til resultatene og metodene som er benyttet for å besvare problemstillingen i denne oppgaven.

Modell og valg av infrastruktur

Som beskrevet i kapittel 3.5 vil en modell alltid være en forenkling av virkeligheten. Infrastrukturmodellen er bygget opp av kandidaten, og baserer seg på valg, avveining og tolkninger av regelverket.

Det er for eksempel benyttet en 1:14 veksler, som kan passeres med en hastighet på 80 km/t. Dersom en mindre veksler blir benyttet medfører det en lavere hastighet over vekselen, og toget må innlede bremsing på et tidligere stadium. Dette vil føre til en lengre blokkering av strekningen, som kan påvirke MT.

Som beskrevet i kapittel 4.2 er det observert en situasjon ved avlesning av MT som medfører variasjon i output-resultatene. En slik situasjon utgjør en svakhet ved infrastrukturmodellen, da den ikke fungerer optimalt. Siden kandidaten er oppmerksom på variasjonen i output-resultatene, og har tatt hensyn til den ved uthenting av MT vil det imidlertid ikke medføre store unøyaktigheter for denne oppgaven. Ved å konsekvent benytte såkalt *høy* verdi for MT vil den relative endringen være den samme som om *lav* verdi benyttes.

Ved å benytte en analytisk modul av programmet ville resultatene blitt hentet ut lettere, og ved å få togfølgetider og kapasitet fra programmet ville man også unngått avrundning av resultatene. Siden det er benyttet en deterministisk prosess er det heller ikke tatt hensyn til tilfeldige innvirkninger. Ved å benytte en stokastisk modell (simuleringsmodell) blir slike innvirkninger tatt hensyn til. Det er imidlertid viktig å huske på at infrastrukturmodellen har som formål å få frem eventuelle innvirkninger av stigningsgraden på strekningen. En slik infrastrukturmodell kan ikke benyttes i virkelig planlegging av jernbaneinfrastruktur, men vil være detaljert nok for oppgavens formål.

Parameterstudie: Valg av analyseparametere og forskningsdesign

Denne studien har kun inkludert syv analyseparametere. I kapittel 4.1 er det beskrevet flere parametere som kan ha en påvirkning på kapasiteten på en jernbanestrekning, enten alene eller i kombinasjon med andre. Valg av andre analyseparametere vil medføre andre hoved- og samspillseffekter, der stigningsgraden kan tenkes å påvirke i større grad enn ved parameterne som er valgt i denne oppgaven.

Et annet viktig punkt i forbindelse med parameterstudiet er at hver parameter kun er studert på to nivåer. Figur 17 (s. 36) viser at valg av nivåer vil være avgjørende for effektene man observerer. Enkelte av parameterne i denne oppgaven kunne vært studert på flere nivåer. Dette ser man fra sensitivitetsanalysene presentert i kapittel 5.3, der resultatene er sensitive for valg

av nivåer for parameter (X1). Dette kunne vært løst ved å benytte et annet forskningsdesign, som for eksempel *fractional factorial design*. Designet tar hensyn til at analyseparameterne kan studeres på ulike nivåer, og analyserer effekter av parametere med et minimalt antall eksperimentkjøringer.

2^n FFD som er benyttet som forskningsdesign innebærer 128 analysevarianter, med endinger i modellstrekningen samt en manuell avlesning av MT. Dette er en tidkrevende prosess. Et *fractional factorial design* representeres ved $2^{(k-p)}$, der k representerer antall parametere og $1/2^p$ er fraksjonen av FFD (Antony, 2014b). Ved eksempelvis å benytte en $1/4$ fraksjon av 2^5 FFD vil man kunne studere 5 parametere på 2 nivåer ved $2^{(5-2)} = 2^3 = 8$ modellkjøringer, istedenfor $2^5=32$ som ved en 2^n FFD (Antony, 2014b). Designet tar ikke hensyn til interaksjoner mellom flere enn to parametere.

Siden denne oppgaven har sett bort fra interaksjoner for er enn to parametere og forskningsdesignet medførte mange modellkjøringer, kunne et *fractional factorial design* vært benyttet. Designet gir også mulighet til å studere parametere på flere enn to nivåer. Designet er ikke benyttet i denne oppgaven fordi en studie på to nivåer er vurdert til nøyaktig nok for en innledende studie som denne oppgaven.

Utvasking av effekten av fall

Som omtalt tidligere reflekterer ikke resultatene presentert i kapittel 5 effekten av fall på strekningen. Dette skyldes at blokkleddene er holdt på et konstant nivå i modellen. Økt bremselengde som følge av større hastighet og fall vil dermed ikke komme til syne. Dette er en svakhet ved oppgaven. Utviklingen i blokkledder som følge hastigheten til togene og størrelsen på fallet på strekningen er illustrert i Figur 21 (s. 50). For en fullstendig analyse av fallets påvirkning på kapasiteten kreves modellstrekninger med ulike blokkledder og signalplassering. På grunn av lange blokkstrekninger ved høy hastighet og stort fall er det behov for en lengre analysestrekning for å få plass til et visst antall signaler.

Analysevariantene hvor togene møter fallet mens de fortsatt er i akselerasjon vil påvirke kjøretiden på strekningen, der fallet bidrar til raskere akselerasjon. Det konkluderes imidlertid med at forenklingen med konstante blokkstrekninger minimerer ut effektene av fallet, og det anbefales en studie som inkluderer effekten slik at analysene gjennomføres på en mer helhetlig måte ved senere studier.

7. Konklusjon og videre arbeid

I dette kapitlet oppsummeres resultatene sammen med diskusjonen fra forrige kapittel. Problemstillingen definert i rapportens innledning vil besvares med grunnlag i de gjennomførte analysene. Avslutningsvis diskuteres aspekter som er interessante å utforske videre innenfor stigningsgradens påvirkning på kapasitet og andre aspekter.

7.1 Oppsummering og konklusjon

Som følge av prosjektering og arbeid med utvikling av jernbanenettet i Norge er det stilt spørsmål ved konsekvensen av avvik fra normalkravet for vertikal stigningsgrad gitt i Bane NORs «*Tekniske Regelverk*». Oppgaven har studert hva konsekvensene av bruk av minstekravet gitt i Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» er for kapasiteten på strekningen. Sammenhengen mellom stigningsgraden på en jernbanestrekning og kapasiteten på strekningen er studert ved bruk av en deterministisk infrastrukturmodell med en dummy-strekning og et parameterstudie hvor forskningsdesignet *full factorial design* ble anvendt. Syv analyseparametere ble valgt ut til studien på bakgrunn av et litteraturstudie hvor 27 kapasitetspåvirkende parametere ble identifisert.

Parameterstudiet viste at stigningsgraden ikke har noen tydelig effekt på kapasiteten på jernbanestrekningen, verken alene eller i kombinasjon med øvrige analyseparametere. Dette kan skyldes at stigningsgraden som er studert i realiteten er svært liten. Videre er resultatene avhengige av hvilke analyseparametere som inkluderes i studien, og hvilke nivåer som velges for hver parameter.

Parameterstudiet identifiserte strekningslengde, togmiks og til en viss grad hastighetsprofil og togtype som de dominerende parametere for kapasiteten på strekningen. Det ble ikke observert noen tydelige interaksjonseffekter mellom analyseparametere. Det ble gjennomført en sensitivitetsanalyse for analyseparameteren togmiks. Sensitivitetsanalysene viste at resultatene er sensitive for valg av nivåer på forskningsdesignet. Dette gjelder både antall nivåer parameteren studeres på, samt hvilke verdier som benyttes på tilhørende nivåer. Ved å ta hensyn til sensitivitetsanalysene ble parametere togmiks og strekningslengde, samt to-faktor-interaksjonen mellom togmiks og strekningslengde identifisert som dominerende parametere.

Teoriene fra parameterstudiet er benyttet for å vurdere kapasiteten til en planlagt delstrekning på Bergensbanen. Strekningen ble inkludert i infrastrukturmodellen med kontinuerlig stigning på strekningen. Casestudiet viste at en kontinuerlig stigning ikke påvirker kapasiteten i stor grad. Sammenlikning av analysestrekningen i casestudiet med en referansestrekning fra parameterstudiet viste et kapasitetstap på ett tog i timen, noe som vurderes til relativt lite. Casestudiet viste imidlertid et kontinuerlig kjøretidstap for godstog på strekningen som følge av at de ikke når sin maksimale hastighet. Dette skyldes stigningen på strekningen.

Ved å studere analysevariantene enkeltvis ble analysevarianten med de forventet «dårligste» karakteristikkene (kombinasjoner av analyseparameterens nivåer) identifisert som tilfellet med lavest kapasitet. På tilsvarende måte ble analysevarianten med de forventede «beste» karakteristikkene identifisert som tilfellet med høyest kapasitet. Til tross for dette viste parameterstudiet at interaksjonseffektene mellom parameterne var små.

De identifiserte hovedeffektene er i samsvar med litteraturen som er studert, der særlig togmiks er kjent som en parameter med stor påvirkning på kapasiteten. Det er imidlertid utført få studier som ser på sammenhengen mellom stigningsgrad og vertikal linjeføring, slik at sammenlikning av resultater direkte er vanskelig.

Det konkluderes med at stigningsgraden på den analyserte modellstrekningen har relativt liten påvirkning på kapasiteten på strekningen under forutsetningene som er gjort for denne oppgaven. Dersom kun kapasitet vurderes, kan stigningsgraden økes i forhold til normalkravene fra «*Teknisk Regelverk*».

Det er imidlertid flere aspekter som må vurderes vedrørende stigningsgradens avvik fra normalkravene, siden stigningsgraden kan ha større påvirkning på andre egenskaper enn på kapasiteten på strekningen. Det ble for eksempel observert et kontinuerlig kjøretidstap for casestrekningen i kontinuerlig stigning, og det er forventet større energiforbruk i en slik situasjon. Den vertikale linjeføringen kan optimaliseres, men det forutsetter en helhetlig vurdering av jernbanen som et system.

7.2 Videre arbeid

Det er interessant å studere flere parametere enn de syv som er inkludert i denne studien. Ved å inkludere flere parametere, og studere hver parameter på flere nivåer vil en mer detaljert analyse av stigningsgradens påvirkning oppnås. Til dette anbefales det å benytte et *fractional factorial design* for å minimere antall modellkjøringer. Videre er denne studien basert på krav fra «*Teknisk Regelverk*». Det er interessant å studere andre stigningsgrader enn de som er presentert i «*Teknisk Regelverk*» (ref. Tabell 1, s. 4) for å se en generell sammenheng, og også avgjøre hvilken stigningsgrad som er optimal med tanke på hastighet, økonomi, robusthet og energiforbruk. Videre anbefales det en studie som tar for seg konsekvensen av fall på strekningen. Effekten av fall er minimert i denne studien, som følge av konstante blokk lengder.

Som beskrevet er det knyttet en større motstand til togframføring i stigning, og det forventes et større energiforbruk i slike situasjoner. Tilsvarende kan et fall på strekningen redusere energiforbruket. Energiforsyningen til strekningen må også vurderes. Fra denne studien er det konkludert med at stigningsgraden kan økes sett fra et kapasitetsmessig ståsted, men det kreves en helhetlig vurdering for å sikre en optimal drift. En studie vedrørende energiforbruk og stigningsgrad anbefales. Videre så denne oppgaven på et casestudie der strekningen ligger i konstant stigning. Samme strekning er i realiteten planlagt med store deler av strekningen lagt

i tunnel. Dette vil medføre økt motstand og energiforbruk, og det er interessant å studere denne situasjonen videre.

Resultatene fra den gjennomførte studien viste at kjøretiden på strekningen påvirkes av stigningsgraden, men ikke kapasiteten. Et spørsmål som er stilt er hvor langt man kan kjøre med 20‰, eventuelt med større stigning, før virkelige tap inntreffer.

Et annet interessant moment angående optimalisering av strekningen er muligheten for å benytte ulik signalplassering avhengig av hvilken retning togene kjører. På en dobbeltsporet strekning vil det være behov for større signalavstand ved kjøring i fall enn når toget trafikkerer strekningen i motsatt retning (stigning). Signaleringen for strekningen er per dags dato lik for begge spor i begge retninger, til tross for at bremselengden er vesentlig større for retningen med fall.

8. Avslutning

Dette kapitlet inneholder personlige erfaringer og refleksjoner over arbeidet med masteroppgaven gjennom prosessrapporten og den vitenskapelige artikkelen. Kapitlet omhandler kun arbeidsprosessen, og har ikke faglig innhold.

Ved oppstarten med arbeidet bestemte jeg, i samråd med mine veiledere, å skrive en to-delt oppgave med prosessrapport og vitenskapelig artikkel. Bakgrunnen for oppgaven, samt delvis formålet, var definert gjennom prosjektoppgaven som ble utarbeidet høsten 2016. Dette gjorde det lettere å vite omfanget av masteroppgaven på et tidlig stadium av arbeidsprosessen, og planlegge hovedaktiviteter som var viktige å få på plass på et tidlig tidspunkt.

Arbeidet med infrastrukturmodellen var mer omfattende og tok lengre tid enn opprinnelig planlagt. Infrastrukturmodellen ble endret flere ganger underveis i arbeidet, og det var krevende å jobbe i et nytt program. Da infrastrukturmodellen var ferdig, var det også en omfattende jobb å lese ut samtlige resultater manuelt. Analysen medførte 64 forskjellige modellvarianter, der fire ulike MT skulle leses av på riktig sted og regnes om til 128 midlere minste togfølgetider. Som beskrevet i oppgaven ble det også oppdaget en situasjon i modellen slik at resultatene varierte, noe som medførte at resultatene måtte hentes ut to ganger. Dette var en tidkrevende prosess, og gjorde at arbeidet ble forsinket. Dersom jeg skulle gjort denne delen av oppgaven på nytt ville jeg tatt kontakt med utviklerne av programmet på et tidlig tidspunkt og forsøkt å avtale en hospitering der jeg kunne lært programmet, og de ulike modulene av det. På denne måten kunne jeg utarbeidet en modell uten manuell avlesning av resultatene. Dette ville vært mer effektivt og nøyaktig.

Parameterstudiet og valg av forskningsdesign er videreutviklet fra prosjektoppgaven gjennom arbeidet med masteroppgaven. Metoden med *full factorial design* ble valgt som metode, og er et verktøy jeg tror jeg kan dra nytte av ved senere anledninger. Gjennom arbeidet med masteroppgaven har det dukket opp flere interessante problemstillinger. Disse er omtalt som videre arbeid, og jeg håper noen vil studere problemstillingene videre.

Arbeidet med masteroppgaven har vært krevende, og det er benyttet mye tid på teoretiske sammenhenger. Da det finnes lite forskning som omhandler samme tema som oppgaven, er det også benyttet mye tid til litteratursøk.

Alt i alt har det vært spennende og veldig lærerikt å jobbe med masteroppgaven. Arbeidet med den vitenskapelige artikkelen har vært spesielt motiverende.

9. Kilder

- Teknisk linjeføring* (2013). [Online]. Tilgjengelig fra: http://jernbanekompetanse.no/wiki/Teknisk_linjef%C3%B8ring [Hentet: 01/2017].
- Samvirke mellom rullende materiell og spor* (2015) [Online]. Tilgjengelig fra: http://jernbanekompetanse.no/wiki/Samvirke_mellom_rullende_materiell_og_spor#Kontaktpunktsgeometri [Hentet: 06/2017].
- ABRIL, M., BARBER, F., INGOLOTTI, L., SALIDO, M. A., TORMOS, P. & LOVA, A. (2008) An assessment of railway capacity, *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 44, s. 774-806.
- ADLINGTON, M. 2017. *Multi-Aspect Main Signals* [Online]. Tilgjengelig fra: http://www.wbsframe.mste.co.uk/public/Signals_BR.html [Hentet: 05/2017].
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION (2003). *Practical guide to railway engineering*, 2. utg. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association.
- AMERICAN SOCIETY FOR QUALITY (2017) *Design of experiments (DOE) tutorial* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://asq.org/learn-about-quality/data-collection-analysis-tools/overview/design-of-experiments-tutorial.html> [Hentet: 05/2017].
- ANTONY, J. (2014a). Chapter 6 - Full Factorial Designs, *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 2. utg. Elsevier Ltd.
- ANTONY, J. (2014b). Chapter 7 - Fractional Factorial Designs, *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 2. utg. Elsevier Ltd.
- BABABEIK, M. & MONAJJEM, M. S. (2012). Optimizing Longitudinal Alignment in Railway with Regard to Construction and Operating Costs. *Journal of Transportation Engineering*, 138, s. 1388-1395.
- BANE NOR (2017a). *Teknisk Regelverk: Felles bestemmelser/Generelle bestemmelser* [Online]. Tilgjengelig fra: https://trv.jbv.no/wiki/Felles_bestemmelser/Generelle_bestemmelser [hentet: 02/2017].
- BANE NOR (2017b). *Teknisk regelverk: Om* [Online]. Tilgjengelig fra: https://trv.jbv.no/wiki/Teknisk_regelverk:Om [Hentet: 02/2017].
- BANE NOR (2017c). *Teknisk Regelverk: Overbygning/Prosjektering/Sporets trasé* [Online]. Tilgjengelig fra: https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporets_tras%C3%A9#Vertikaltras.C3.A9 [Hentet: 02/2017].
- BANE NOR (2017d). *Teknisk Regelverk: Signal/Prosjektering/ATC* [Online]. Tilgjengelig fra: https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/ATC#Fullstendig_utrustet_omr.C3.A5de_.28FATC.29 [Hentet: 02/2017].

- BOX, G. E. P., HUNTER, J. S. & HUNTER, W. G. (2005). Chapter 5: Factorial Design at Two Levels. *Statistics for Experimenters. Design, Innovation and Discovery*. 2. utg. ed. Hoboken: N.J: John Wiley & Sons, Inc.
- BOYSEN, H. E. (2014). Øresund and Fehmarnbelt high-capacity rail corridor standards updated. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 4, s. 44-58.
- BURDETT, R. L. & KOZAN, E. (2006). Techniques for absolute capacity determination in railways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40, s. 616-632.
- CHANDRA, S. & AGARWAL, M. M. (2013). *Railway Engineering*. 2. utg. India: Oxford University Press.
- DINGLER, M., LAI, Y.-C. & BARKAN, C. (2009a). Impact of train type heterogeneity on single-track railway capacity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2117, s. 41-49.
- DINGLER, M., LAI, Y. & BARKAN, C. P. (2009b). Impact of operational practices on rail line capacity: a simulation analysis. *Proceedings of the 2009 Annual AREMA conference*. Chicago, IL.
- EGGUM, D. (2016). *The relationship between gradient and capacity on a railway line*. Project thesis. Norwegian University of Science and Technology.
- EUROPEAN UNION AGENCY FOR RAILWAYS. (2017). *Technical specifications for interoperability* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.era.europa.eu/core-activities/interoperability/pages/technicalspecifications.aspx> [Hentet: 12/2016].
- FWA, T., CHAN, W. & SIM, Y. (2002). Optimal vertical alignment analysis for highway design. *Journal of transportation engineering*, 128, s. 395-402.
- HANDSTANGER, A. C. T. (2009). *Scheduled waiting time from crossing on single track railway lines*. Ph.D, Norwegian University of Science and Technology.
- HANSEN, I. & PACHL, J. (2014). *Railway Timetabling & Operations*. 2. utg. Hamburg, Germany: Eurailpress.
- HU, S. R., HUANG, S. S. & IEEE (2014). Effects of Vertical Alignment on Rail Line Capacity Loss for HSR Operation. *2014 Ieee 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (Itsc)*. Qingdao, China.
- INSTITUTT FOR BYGG ANLEGG OG TRANSPORT (2013). *Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjekt- og masteroppgaver*. Trondheim: Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet.
- INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (2004). *UIC Code 406 Capacity*. Paris, Frankrike: UIC International Union of Railways.
- JANECEK, D. & WEYMANN, F. (2010). LUKS-Analysis of lines and junctions. *Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research (WCTR)*. Lisbon, Portugal.

- JERNBANEVERKET (2014). *ERTMS for Dummies 1* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.banenor.no/globalassets/documents/ertms/1-ertms-for-dummies-grunnleggende-001.pdf> [Hentet: 03/2017].
- JERNBANEVERKET (2015a). *Jernbanen mot 2050 : perspektiver for transport i byområder og mer gods på skinner* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.banenor.no/contentassets/3b8f6db0edf44b35b659d05fbe1a10ff/perspektiv-analyse--jernbanen-mot-2050.pdf> [Hentet: 05/2017].
- JERNBANEVERKET (2015b). *Konseptdokument for IC-strekningene*. Bane NOR.
- JERNBANEVERKET 2016. *Bergensbanen utredning Lågheller - Mjølfjell Sluttrapport*. Sandvika, Norge: Jernbaneverket.
- KAAS, A. (2000). Punctuality model for railways. *WIT Transactions on The Built Environment*, 50, s. 853-860.
- KAAS, A. H. (1998). *Metoder til beregning af Jernbanekapacitet*. Ph. D, Danmarks Tekniske Universitet, DTU.
- KIM, M. E., SCHONFELD, P. & KIM, E. (2013). Comparison of vertical alignments for rail transit. *Journal of Transportation Engineering*, 139, s. 230-238.
- KRUEGER, H., FARRINGTON, P. A., NEMBHARD, H. B., EVANS, G. W. & STURROCK, D. T. (1999). Parametric modeling in rail capacity planning. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 2, s. 1194-1200.
- LAI, Y.-C. & BARKAN, C. (2009). Enhanced parametric railway capacity evaluation tool. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2117, s. 33-40.
- LANDEX, A. (2008). *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*. Ph.D, Technical University of Denmark (DTU).
- LANDEX, A. (2011). Station Capacity. *Proceedings of 4th International Seminar on Railway Operations Research*. Rome, Italy
- LANDEX, A. & KAAS, A. H. (2005). Planning the most suitable travel speed for high frequency railway lines. *1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis : RailDelft2005*, 2005. Delft, The Netherlands
- LANDEX, A., SCHITTENHELM, B., KAAS, A. H. & SCHNEIDER-TILLI, J. (2008) Capacity measurement with the UIC 406 capacity method. *WIT Transactions on The Built Environment*, 103, s. 55-64.
- LILLESTØL, J. (2000). *Statistisk forsøksplanlegging og analyse: for forbedring av produkter og prosesser*. Bergen, Norge: NFKL, Fagstyret for statistiske metoder : Norges handelshøyskole.
- LINDAHL, M. (2001). *Track geometry for high-speed railways: A literature survey and simulation of dynamic vehicle response*. Ph. D, Royal Institute of Technology

- LINDFELDT, O. (2011). An analysis of double-track railway line capacity. *Transportation Planning and Technology*, 34, s. 301-322.
- LUKASZEWICZ, P. 2001. *Energy Consumption and Running Time for Trains: modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing*. Ph.D, Royal Institute of Technology
- MELD. ST. 33 (2016–2017) (2016). *Nasjonal transportplan 2018–2029*. Oslo: Samferdselsdepartementet
- MITRA, S., TOLLIVER, D. & MITRA, S. (2010). Estimation of railroad capacity using parametric methods. *Journal of the Transportation Research Forum*, 49, s. 111-126.
- PACHL, J. (2015). *Railway Operation and Control*, 3. utg. USA: VTD Rail Publishing.
- PAWAR, S. P. S. (2011). *An analysis of single track high speed rail operation*. Masteroppgave, University of Birmingham
- PROFILLIDIS, V. A. (2014). *Railway management and engineering*, 4. utg. Farnham, Surrey England: Ashgate Publishing Limited
- PROKOPY, J. C. & RUBIN, R. B. (1975). Parametric analysis of railway line capacity. Northwestern University.
- SCHWANHÄÜBER, W. (1974). *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. Ph.D, Technischen Hochschule Aachen
- SKARTSÆTERHAGEN, S. 1993. *Kapasitet på jernbanestrekninger*. Norge: NSB.
- SOGIN, S. L., BARKAN, C. P., LAI, Y.-C. & SAAT, M. R. (2012) Impact of passenger trains in double track networks. *Proceedings of the 2012 Joint Rail Conference*, Pennsylvania, USA
- SPÖNEMANN, J. & WENDLER, E. (2010). Synthesis of railway infrastructure. *WIT Transactions on The Built Environment*, 114, s. 395-405.
- STATENS VEGVESEN (2014). 3.2 Vertikalkurvatur. *Håndbok VI20: Premisser for geometrisk utforming av veier*. Norge: Vegdirektoratet.
- TRAFIKKVERKET & JERNBANEVERKET (2014). *Kapasitetsutfordringer Narvik - Kiruna*. Bane NOR
- VIA CONSULTING AND DEVELOPMENT (2016). *LUKS manual*.
- WHITE, T. A. (2006) Examination of Use of Delay as Standard Measurement of Railroad Capacity and Operation. *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*, Washington, D.C, USA

Del II:
Vitenskapelig artikkel

Effects of gradient on railway capacity:

A study on gradient related parameters

Eggum, Dina Sofie H.¹, Kassa, Elias¹, Handstanger, Anne Christine Torp^{1,2}

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU)

² Norconsult

Summary

The standard requirements for the vertical gradient on a railway line with mixed traffic is 12,5‰, while the maximum allowed gradient on such a line is 20‰. The gradient affects the accelerating and breaking characteristics of the trains. This study investigates the consequences of deviation from the standard requirements of 12,5‰ in terms of capacity. An infrastructure model of a dummy section of a rail line is built in a microscopic software tool (LUKS) to calculate the mean minimum headway time and the theoretical capacity of the section. Seven selected analysis parameters have been implemented in the infrastructure model, where different combinations of the parameters are studied. Design of Experiment methodology with full factorial design at two levels has been used to study the relationships of the capacity related parameters and to identify the dominant parameters. The results indicate that the main effect of gradient does not have a distinct effect on the capacity of the railway section, neither as single parameter nor in combination with the other studied parameters. The main effects of train mix, section length and the two-factor interaction effect between the train mix and the section length are identified to have the most significant impact on the capacity of the studied section. To investigate the theoretical relationships found from the parameter study, a case study has been conducted concerning a railway section in constant incline. A capacity loss of one train per hour and a constant driving time loss for freight trains was observed compared to a reference scenario from the existing analysis. The study concludes that the gradient does not affect the capacity in a significant way, but may influence on other aspects.

Keywords: Railway capacity, gradient, parameter study, factorial design, minimum headway time

1 Introduction

The Norwegian national railway regulations [1] states that the standard requirements for the vertical gradient on a railway line with mixed traffic is 12,5‰, while the maximum allowed gradient on such a line is 20‰. For the 20‰ gradient, the length of the gradient is restricted to a maximum 3 km. These requirements are set to avoid bottlenecks on the line, where freight trains in particular have difficulty overcoming large positive gradients. The breaking distance will also increase in a negative gradient [2]. The gradient affects the accelerating and breaking characteristics of the trains on the line. However, the exact impact of using the maximum

gradient needs to be analyzed in depth. This paper analyzes the consequences of deviation from the standard requirements of 12,5‰ in terms of capacity.

Depending of the magnitude, length and frequency of the gradient, the operational characteristics of the railway line may be affected. Several parameters that affect the capacity have been studied in previous research, but excluding the gradient as a variable of interest [3, 4, 5]. Kim et al. [6] studied the longitudinal alignment regarding energy consumption and economic considerations. Bababeik and Monajjem [7] states that an improper vertical alignment may cause extravagant construction costs and future operating issues such as limitations in freight transportation and loss of capacity. Lindahl [2] says that the following requirements of an alignment needs to be considered as they affect the railway operation: 1) power supply and energy loss will increase in large gradients, 2) heavy trains may have problems climbing up the gradient and 3) breaking distance will increase in an ascending gradient. As seen from 1) and 2) the trains must be able to produce enough traction power to overcome resistances and to give the trains a decried acceleration. Thus, large positive gradients may result in slower acceleration of the freight trains which may block the line for a long time and reduces the line capacity. From 3) a long negative gradient usually results in increased signaling distance in order to stop the train with normal brakes on the prescribed breaking distances [2]. Increased signal distances affect the capacity as a result of increased headway times between consecutive trains [3].

The effect of a vertical positive gradient on the capacity of the rail line is studied by Hu et al. [8]. However, little research has been done in order to highlight the relationship between gradient and line capacity. To the authors' best knowledge no other research than the one of Hu et al. [8] has been done to model the impact of gradient on rail line capacity loss.

This study aims to identify important parameters that may affect railway capacity in a grade. It also aims to study the effects of multiple parameters on railway capacity. In this study capacity is regarded as number of trains passing a rail stretch per hour, and only the theoretical capacity is studied. A literature review has been performed in order to identify the main parameters that are believed to have an impact on the capacity on the railway line. Seven parameters were selected for parameter investigation. The selected parameters have been implemented in a numerical infrastructure model, where different combinations of the parameters are studied through a deterministic process. Design of Experiment methodology with full factorial design at two levels has been used to study these relationships and to identify the dominant parameters. In this way, one can determine if the gradient is a capacity affecting parameter or not.

2 Literature review

In this section, a theoretical background defining the concept of capacity and other capacity related issues, as well as the basics of rail alignment and train motion are given.

Railway capacity

The basic parameters underpinning capacity are the infrastructure characteristics themselves and these include the signaling system, the transport schedule and the imposed punctuality level, and is a loosely defined concept [9,10]. Different definitions for capacity are proposed, and in this study capacity is regarded as number of trains passing a rail stretch per hour.

Previous researches have studied capacity affecting parameters. Prokopy and Rubin [11] developed the first parametric model [12], aiming to evaluate the potential capacity of a wide variety of rail line haul facilities under a number of operating conditions and policies [11]. Krueger et al. [4] applied a similar method to develop a parametric model, and divides the parameters affecting capacity into plant parameters, traffic parameters and operating parameters. The model developed by Krueger is enhanced by Lai and Barkan [12]. Abril et al. [3] considers a similar concept as of Krueger et al. [4], but assess infrastructure-, traffic- and operating parameters. The study of Abril et al. [3] also exemplifies the influence of some of the capacity affecting parameters. Dingler et al. [13] describes railroad capacity as influenced by a complex relationship of infrastructure and operational parameters. The operational includes among others average and variability in operating speed, whereas the infrastructure parameters includes among others siding length and spacing, number of tracks, grade and curvature. According to Dingler's description, geometry alignment parameters such as gradients are capacity impact parameters.

The capacity can be discussed in terms of theoretical and practical capacity. The UIC code 406 [10] states that a theoretical maximum capacity is expressed in terms of the maximum number of trains can be calculated by defining ideal circumstances. Conditions like these are not to be found in a realistic operation. Instead, a practical approach is used, which considers the quality and robustness a railway operation requires. Further, the capacity of a railway network is constrained by the capacity of nodes, lines and station tracks [14]. This study considers the line capacity.

Mussone and Calvo [14] used the concept of theoretical capacity from [10], and describes that the capacity C of a line l depends on the traffic composition (number and categories of trains). They define the capacity C^l on the line as

$$C^l = \frac{T}{h^l + \Delta h^l}$$

where T is the reference period, \bar{h}^1 is the average time headway between trains on the line l and $\overline{\Delta h^1}$ is the average of its variation. The value $\bar{h}^1 + \overline{\Delta h^1}$ can be obtained as an average depending on the composition of the traffic found on the line and will change according to the number and category of trains running on the line tracks [14]. Burdett and Kozan [15] developed an approach to calculate the absolute capacity, which refers to a theoretical value of capacity that is realized when only critical section(s) are saturated [15]. Their approach considers the section running time and number of trains in each direction as a measure of occupancy and to calculate the theoretical capacity. In this study, the calculation from Mussone and Calvo [14] are used to determine the theoretical capacity on the model section.

Rail alignment and train motion

The vertical alignment defines the rise and fall of the track. The railway alignment will affect the dynamics of train motion [16], and it is important to have knowledge about the interactions between rail and terrain. This study concerns the vertical gradients effect on the capacity, and horizontal alignment will be out of the scope of this study.

The running resistances, F_{RT} , can be defined as the forces acting on trains against their direction of motion [17], and will affect the train speed and ability to accelerate. Lukaszewicz [17] defines the total running resistances F_{RT} as the sum of mechanical rolling resistances including curve resistance, aerodynamic drag and resistance due to grades. Further, a train must be able to produce enough traction power (F) so that $F \geq F_{RT}$. After the train has been brought to motion, the acceleration of the train can be determined [2].

Lindahl [2] described the gradient resistance F_G as the component of the train load against the direction of travel, and it has a positive value for uphill gradients and a negative value for downhill gradients. This means that a positive gradient leads to increased resistances due to gravitational forces, whereas a negative gradient will “push” the train forward.

3 Model description

The selected analysis parameters have been implemented in a numerical infrastructure model, where different combinations of the parameters are studied. A deterministic process is used to investigate the actual influence of multiple parameters on the capacity. An infrastructure model of a dummy section of a rail line is built in a microscopic software tool named LUKS (*Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken – analysis of lines and junctions*) to calculate the mean minimum headway time and the theoretical capacity of the section. The outputs from the infrastructure model are minimum headway time between consecutive trains. The minimum headway times from the model are used for further analysis in order to identify the parameters with a highest influence on capacity, and to analyze if there exist significant interaction effects of multiple parameters.

Representative rail line

A hypothetical dummy section is developed intended to represent the characteristics for a Norwegian mainline subdivision. The selected train characteristics represent future traffic scenarios in Norway, and are presented in table 1.

The dummy section containing two passing loops with switches and crossings allowing speed of 80 km/h for trains running through the diverging track. The passing loops are separated with a straight line, and contain stopping positions for both freight and passenger trains. The model section is equipped with ETCS level 2 signaling with a constant block length of 3 km, a line speed of 250 km/h and a gradient with varying incline with a length of 3 km. The length of 3 km is based on the requirements from the Norwegian national railway regulations [1]. The dummy section represents a double line, where all traffic is defined to be either ascending or descending direction. The ascending direction represents scenarios with trains going uphill (positive gradient), while the descending direction represents the downhill situation (negative gradient). The section is operated with two different train types, a freight train (locomotive EL19) combined either with a passenger train type BM74 or type ICE.

Table 1: Train characteristics

	Freight train EL19	Passenger train BM74	Passenger train ICE
Train type	LDFT*, Cargo	LDPT*, IC	LDPT*, ICE
Length (m)	600	212	200
Weight (tons)	800	-	-
Max speed (km/h)	140**	200**	330**
Braking position	G	P+Mg	P+Mg
Brake percentage	80	200	200

**Long distant freight train/Long distant passenger train*

*** v_{max} from the traction unit is 330 km/h for the ICE train, but the trains maximum speed is limited to the line speed 250 km/h. For BM74, the maximum speed is 200 km/h. v_{max} from the traction unit for the freight train is 140 km/h, but is limited to 100 km/h.*

A sketch of the model section is shown in figure 1. The analysis area is between the exit and entrance signals. The model section and traffic composition is a simplification, and is only applicable for this study. The purpose is to provide a consistent basis for relative comparison for different scenarios of interest under a reasonably set of operating conditions. The results presented in this study do not represent absolute predictive measurements for a set of conditions.

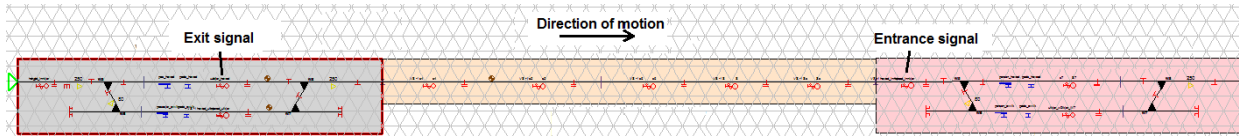


Figure 1: A sketch of the infrastructure model. Screenshot from LUKS

Minimum headway time

In order to calculate the theoretical capacity, minimum headway time (i.e. the temporal interval between two consecutive trains [3]) is required. On a line with fixed block system, as in this study, the minimum headway depends on the blocking time (i.e. the time interval in which a section of track is exclusively allocated to a train movement and therefore blocked for other trains [18:254]). The blocking time principle is illustrated in figure 2. The figure shows a time-over-distance diagram illustrating the blocking times of all block sections train i followed by train j passes from station A to B. This is called blocking time stairways, and enables a determination of the minimum headway of two trains [18:61].

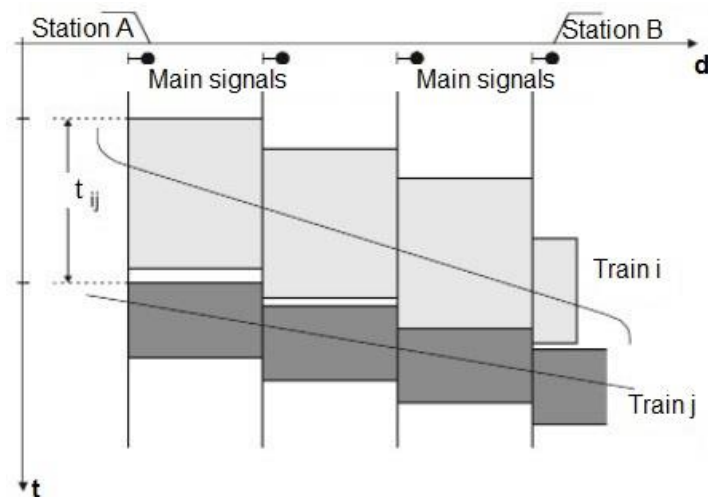


Figure 2 Principle of blocking time model and minimum headway time. Based on [19].

The blocking time stairways are pushed so that they are tangent to each other but don't overlap. The minimum headway is found from the beginning of the blocking time of the first block section between the two stations [20:35], and is the output from the infrastructure model.

Calculations of mean minimum headway times and theoretical capacity

Because of the heterogeneous traffic on the line, a calculation of the mean minimum headway times must be performed. This study does not have a fixed timetable for the trains occupying the infrastructure. Because of this property, all possible orders ij of trains i and j are considered and weighted with probabilities p_{ij} of the event that train i is followed by train j [19]. This relationship is shown below, where x_i represents the number of trains of type i , x_j is the number of train of type j , and N is the total number of trains.

$$p_{ij} = \frac{x_i}{N} * \frac{x_j}{N} = \frac{x_i * x_j}{N^2}$$

This results in a mean minimum headway time \bar{t}_{ij} :

$$\bar{t}_{ij} = \sum_i \sum_j p_{ij} * t_{ij} \text{ [min]}$$

where t_{ij} is the headway time between train i and j . The theoretical capacity is calculated as follows:

$$C_t = \frac{T}{\bar{t}_{ij}} \left[\frac{\text{trains}}{\text{hour}} \right]$$

where \bar{t}_{ij} is analogous to the $\bar{h}^1 + \Delta\bar{h}^1$ from Mussone and Calvo [14] presented earlier.

4 Parameter study

In order to identify the parameters that have the biggest influence on capacity, and to analyze if there exists any correlation among the parameters, a parameter study has been conducted. Design of Experiment methodology with full factorial design at two levels has been used to study these relationships and to identify the dominant parameters. This section presents the studied parameters and their associated levels, followed by the full factorial design.

4.1 Parameters to be studied

This section provides a description of the seven analysis parameters and their associated levels. The parameters are both qualitative and quantitative, and the levels are based on extremes with realistic values. The analysis parameters and their associated levels are presented in table 2, followed by a parameter description.

Table 2: Analysis parameters at two levels

Parameter	abbreviation	Level 1	Level 2
Coding		+1	-1
Train mix	X1	Maximum	None
Gradient (‰)	X2	20	12,5
Train type	X3	ICE	BM74
Direction of motion	X4	Ascending	Descending
Speed profile	X5	Flying start	From stop
Speed at gradient entrance	X6	Maximum	Accelerating
Section length (km)	X7	30	15

Parameters description

X1 Train mix: The parameter is studied at the two levels maximum train mix (i.e. 50% fast and slow trains) and none train mix (i.e. homogeneous operation). *X2 Gradient*: The parameter is studied at the two levels 20‰ and 12,5‰, in accordance to the Norwegian national railway regulations. *X3 Train type*: The two passenger train types BM74 or ICE are operated with two different speed levels and combined with the freight train. This results in two different speed intervals. *X4 Direction of motion*: This parameter is derived as a result of the predefined conditions of this study, where both a positive and a negative gradient are to be studied. An ascending (positive gradient) and a descending (negative gradient) direction are defined in the infrastructure model. *X5 Speed profile*: Speed profile as an analysis parameter represents the trains starting condition. “Flying start” means that the current train enters and leaves the analysis section at its maximum speed (no acceleration or deceleration inside the analysis section). “From stop” meaning that the current train must accelerate and decelerate on the analysis section. *X6 speed at gradient entrance*: Level 1 “Maximum” meaning that all trains have reached their maximum speed when facing the gradient (i.e. no acceleration in the gradient). Level 2 “accelerating” meaning that none of the train has reached their maximum speed level when facing the gradient, and entails acceleration inside the gradient. Note: The combination of parameter X5 at level 1 (flying start) and X6 at level 2 (accelerating) are not applicable, since the flying start scenario requires no acceleration. *X7 Section length*: The section length is measured between stations where overtaking’s are allowed. The lengths between the stations is 15 or 30 km.

4.2 Analyses of parameters

The seven analysis parameters and their associated levels from table 2 are combined in unique ways, which results in $2^7=128$ analysis scenarios. The calculated mean minimum headway times are used as a response in the full factorial design.

To study all possible combinations, a coded design matrix is provided. The level 1 and 2 from table 2 are coded with +1 and -1 respectively, which forms the basis for calculations of main and interaction effects among the parameters.

A principled design of a 2^7 full factorial design matrix is shown in table 3. The matrix provides all possible combinations of the seven main parameters. The interaction among the parameters are also included. The coding for the interactions are based on the product of the column for the combined main parameters. Each analysis scenario (S1-S128) contains a unique combination of the analysis parameters and their associated levels. The calculation of main and interaction effects will reveal the most dominant parameters.

Table 3: Principled design of a 2^7 - design matrix with interactions of parameters

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X1X2	X1X3	...	X1X2X3X4X5X6X7
S1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1		-1
S2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1		+1
S3	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1		+1
S4	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1		-1
...											
S128	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1		+1

5 Results and discussion

The results from the parameter analysis are presented below. Only the two-factor interaction effects are included. Figure 3 shows a normal probability plot, identifying the most significant impact parameters. The effects which fall off the line are not easily explained as chance occurrences. Hence, the effects furthest from the line have the most significant effect on capacity. Figure 4 expounds the calculated effects in a bar chart.

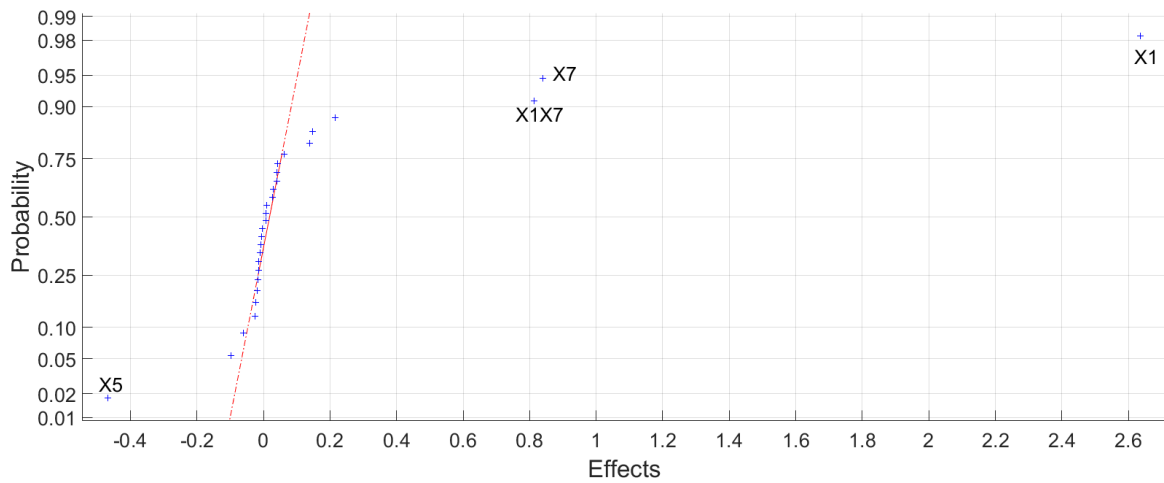


Figure 3: A normal probability plot of the estimated main- and interaction effects

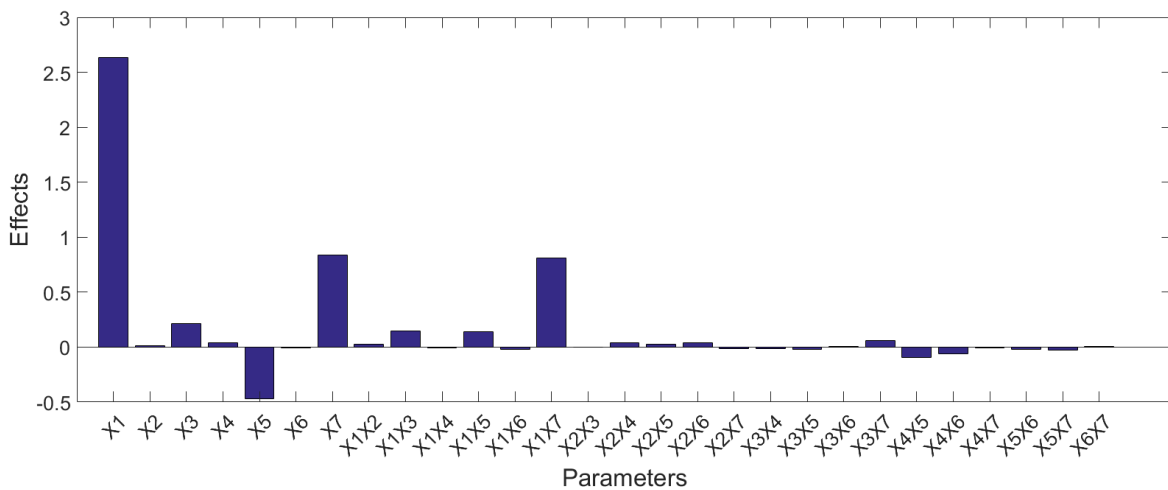


Figure 4: A bar chart of the estimated main- and interaction effects

The full factorial analysis identified the main effects of train mix (X1), section length (X7) and the two-factor interaction effect between the train mix and the section length (X1X7) to have the most significant impact on the capacity of the studied section. In addition, the speed profile (X5) has a noticeable effect. The interaction of X1 and X7 are expected, as both X1 and X7 have a significant effect. The positive or negative values of the effects refer to level 1 and level 2 respectively from table 2. The computed effects in figure 3 and 4 indicate which associated levels that will affect the capacity the most (negatively). As an example, the positive value of parameter X1 in figure 4 refers to a maximum train mix on the line, which will have a large influence on the line capacity.

Train mix and section length as the most capacity affecting parameters are expected results based on existing research [3, 4, 5], and the UIC code 406 [10] states that when the differences in running time between different train types worked on the same track are great, the capacity consumption will increase.

The main effect of gradient (X2) does not have a distinct effect on the capacity of the railway line, neither as single parameter nor in combination with the other studied parameters. The main effect of gradient (i.e. gradient as a single parameter) are in correspondence to the results from Hu et al. [8], who found that there are other factors than the gradient alone causing capacity loss. However, Hu et al. also found that gradient in a multivariate model with section length and average speed does affect the capacity loss. No interactions of parameter X2 and the remainder parameters appear in the present study.

The results are based on predefined conditions. Hu et al. used gradients up to 35%, whereas this study has an upper value of 20%. This study also include more parameters than the study of Hu et al. . Their study included the positive gradient, section length and average speed, but excluded among other train mix on the line. This means that the study presented in this paper may have included parameters that affect capacity more than the parameters included in the study from Hu et al.

Further, this study has provided a full factorial design on two levels. However, the results are sensitive to the chosen levels. One of the assumptions made for a two-levels full factorial design is that the response is approximately linear over the range of the factor settings chosen. This property implies that effects beyond the linearity are not captured. If a three or four level factorial design is used, a wider and more accurate analyze is conducted. Some of the analysis parameters in this study are affected by the situation described. The train mix is studied by its extremes (full train mix, e.g. 50% of each train type/no train mix, e.g. 100% of one train type), but it could also be the situation where the train mix is 25% of one train type and 75% of the other. This may also affect the results.

It should be noted that this study has assumed constant blocking lengths, which means that the effect of a negative gradient is underestimated. Figure 5 shows the relationship between the negative gradient on the line and block sections for different speed levels.

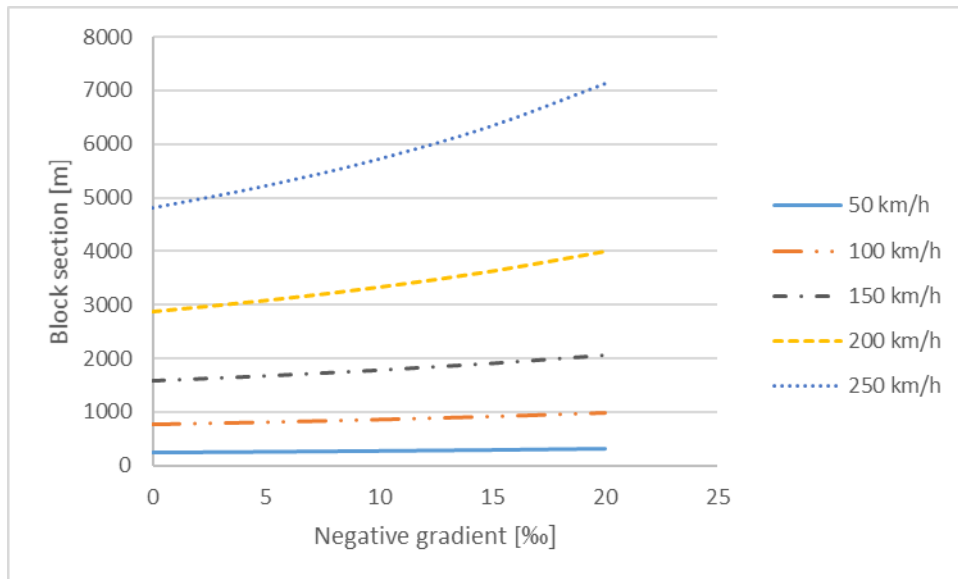


Figure 5: Development in block sections from speeds and gradients

As seen from the figure, an increased negative gradient will lead to greater block section, which are expected to affect the capacity.

6 Case study

To investigate the theoretical relationships found from the parameter study, a case study has been conducted. The case study addresses a planned railway line in Norway. There is a proposal that an existing section of a line should be relocated to reduce the driving time on the line and to reduce line outages due to landslides. The difference in elevation from station A to station B is about 570 meters, and the proposed train path involves a constant positive gradient. To achieve the shortest possible route, the line exploits the regulations for vertical alignment [1] by using a repetitive gradient. To reach the elevation of 570 meters, the line make use of the maximum allowed gradient of 20‰ for 3 km followed by 1 km of 12,5‰ and so on. This structure results in a total length of the line from station A to station B of about 30 km. The planned line speed is 200 km/h.

The line section consists of two passing loops, involving a stopping position for the deviating trains in an ascent of 12,5‰. This property causes an increased starting resistance for the trains, and the trains will accelerate in the incline. This requires more tractive effort from the locomotive.

The case study section is represented by one of the analysis scenarios from the parameter study. The gradient is included on the entire line section, while other characteristics remain constant. This makes the capacity from the case study comparable to the existing analysis scenario, which is used as a reference scenario. The exact characteristics for the reference scenario are presented in table 4.

Table 4: Characteristics of the reference scenario from the parameter study

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Code	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
Explanation	Maximum train mix	20‰	BM47 train type	Ascending (positive gradient)	Starting from 0 km/h	Accelerating meeting of the gradient	30 km section length

The velocity diagram for the freight train operating on the case study section is shown in figure 6. The velocity diagram illustrates that the freight train loses velocity when driving upwards in 20‰. The velocity is restored in the area with 12,5‰, but decreasing when reaching a new area of 20‰.

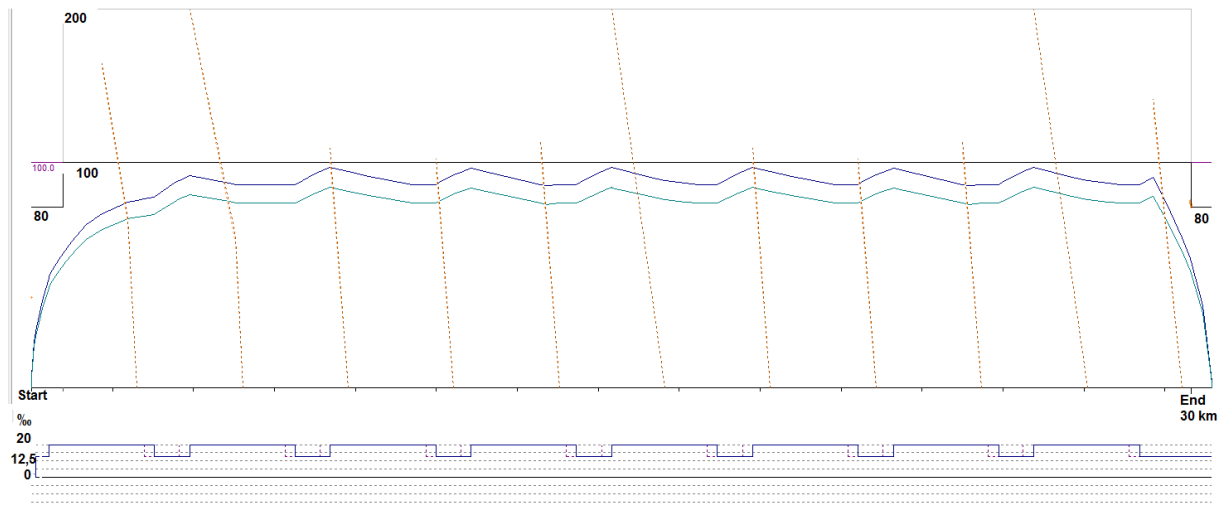


Figure 6: Velocity diagram for the freight train in the case study

As for the parameter study, the minimum headway time from the infrastructure model is measured from the blocking time stairways, and the mean minimum headway time are calculated. The results from the case study are presented in table 5 and compared to the reference scenario from the parameter study. The running time on the line section is included.

Table 5: Results from the case study

	Capacity [trains/hour]	Mean minimum headway time [min]	Driving time freight train [min]	Driving time passenger train [min]
Case study	9	6,44	26,4	12,54
Reference scenario	10	5,79	24,43	12,47

The results from the case study show that the capacity is affected in a very slight way. The constant incline causes a loss of one train per hour. However, the gradient on the line will lead to a constant driving time loss because of the lower speed achieved on the line.

7 Conclusion

Design of Experiment methodology with full factorial design at two levels has been used to study the relationship between seven parameters and to identify the dominant parameters. The examined parameters include 1) train mix, 2) gradient, 3) train type, 4) direction (ascending or descending), 5) speed profile, 6) speed at gradient entrance and 7) section length. A case study concerning a rail section in constant ascent has been performed to investigate the theoretical relationships found from the parameter study.

The main effect of gradient does not have a distinct effect on the capacity of the modelled section, neither as single parameter nor in combination with the other studied parameters. The full factorial analysis identified the main effects of train mix, section length and the two-factor interaction effect between the train mix and the section length to have the most significant impact on the capacity of the studied section. The case study revealed a capacity loss of one train per hour compared to a reference scenario from the existing analysis. Also, a constant driving time loss due to the lower speed achieved on the line was observed.

The study concludes that the gradient on the line does not have a distinct effect on the capacity of the railway line under the predefined assumptions in this study. However, an increased gradient will influence other aspects on the line such as the driving time. An overall evaluation for the railway line are required to ensure an efficient and economical operation.

An increased gradient may result in increased energy consumption on the railway line. Further research is suggested to study the effect of gradient on energy consumption. Also, a study of the full effect of a negative gradient is suggested.

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the assistance of Dipl.-Inform. David Janecek in the LUKS model setup. Bane NOR provided financial support for the master student work.

Authors



Eggum, Dina Sofie Hänninen

Master of science student from Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.

References:

- [1] Bane NOR. (2017) *Teknisk Regelverk: Overbygning/Prosjektering/Sporets trasé*. Available: [https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporets tras%C3%A9](https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporets_tras%C3%A9)
- [2] M. Lindahl, "Track geometry for high-speed railways: A literature survey and simulation of dynamic vehicle response," Ph. D, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2001.
- [3] M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M. A. Salido, P. Tormos, and A. Lova, "An assessment of railway capacity," *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, vol. 44, pp. 774-806, Sep 2008.
- [4] H. Krueger, P. A. Farrington, H. B. Nembhard, G. W. Evans, and D. T. Sturrock, "Parametric modeling in rail capacity planning," in *WSC '99* vol. 2, ed: ACM, 1999, pp. 1194-1200.
- [5] S. Mitra, D. Tolliver, and S. Mitra, "Estimation of railroad capacity using parametric methods," in *Journal of the Transportation Research Forum*, vol. 49, pp. 111-126, 2010.
- [6] M. E. Kim, P. Schonfeld, and E. Kim, "Comparison of vertical alignments for rail transit" *Journal of Transportation Engineering*, vol. 139, p. 230, 2013.
- [7] M. Bababeik and M. S. Monajjem, "Optimizing Longitudinal Alignment in Railway with Regard to Construction and Operating Costs," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, pp. 1388-1395, 2012.
- [8] S. R. Hu, S. S. Huang, and Ieee, "Effects of Vertical Alignment on Rail Line Capacity Loss for HSR Operation," in the 2014 Ieee 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (Itsc), Qingdao, China, 2014. pp. 2062-2067
- [9] A. H. Kaas, "Metoder til beregning af Jernbanekapacitet," Ph. D, Danmark: Institut for planlægning, Danmarks Tekniske Universitet, DTU, 1998.
- [10] International Union of Railways, "UIC Code 406," in *Capacity*, ed: International Union of Railways, 2004.
- [11] J. C. Prokopy and R. B. Rubin, "Parametric analysis of railway line capacity," FRA-OPPD 75-1 Final Rpt, 1975.
- [12] Y.-C. Lai and C. Barkan, "Enhanced parametric railway capacity evaluation tool," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2117, pp. 33-40, 2009.
- [13] M. Dingler, Y. Lai, and C. P. Barkan, "Impact of operational practices on rail line capacity: a simulation analysis," in the Proceedings of the 2009 Annual AREMA conference, Chicago, IL, 2009.
- [14] L. Mussone and R. W. Calvo, "An analytical approach to calculate the capacity of a railway system," *European Journal of Operational Research*, vol. 228, pp. 11-23, 2013.

- [15] R. L. Burdett and E. Kozan, "Techniques for absolute capacity determination in railways," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 40, pp. 616-632, 2006.
- [16] American Railway Engineering Maintenance of Way Association (AREMA), *Practical guide to railway engineering*, 2nd ed. Landover, Md: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2003.
- [17] P. Lukaszewicz, "Energy Consumption and Running Time for Trains: modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing," Ph. D, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2001.
- [18] J. Pachl, *Railway Operation and Control*, 3th ed VTD Rail Publishing, 2015.
- [19] J. Spönemann and E. Wendler, "Synthesis of railway infrastructure," *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 114, pp. 395-405, 2010.
- [20] I. Hansen and J. Pachl, *Railway Timetabling & Operations*, 2nd ed. Hamburg, Germany: Eurailpress, 2014.

Vedlegg

- Vedlegg 1: Oppgavetekst
- Vedlegg 2: Fremgangsmåte for beregning av midlere minste togfølgetid (MMT)
- Vedlegg 3: Blokk lengder – beregningsbakgrunn og beregnede blokk lengder
- Vedlegg 4: Hoved- og samspillseffekter – beregningsbakgrunn og beregnede effekter
- Vedlegg 5: Valg av sporveksel og utforming av forbikjøringsspor
- Vedlegg 6: Plassering av stigningsgraden i infrastrukturmodellen
- Vedlegg 7: MATLAB-script og designmatrise for parameterstudiet

Vedlegg 1: Oppgavetekst

Vedlegg 1: Oppgavetekst

MASTEROPPGAVE

(TBA4955 JERNBANE, masteroppgave)

VÅREN 2017
for
Dina Sofie Hänninen Eggum

Effekten av stigningsgrad på jernbanekapasitet: En parameterstudie

BAKGRUNN

Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» setter føringer for maksimal tillatt stigningsgrad på en jernbanelinje. Normalkrav for vertikal stigningsgrad på en linje med blandet trafikk er 12,5 ‰ mens ved bruk av minstekrav kan det tillates en stigningsgrad på 20 ‰ dersom lengden begrenses til 3 km. Kravene er satt for å unngå flaskehals på strekningen, der stigningsgraden påvirker akselerasjons- og bremseegenskapene til et tog.

I forbindelse med prosjektering av jernbanelinjens vertikalgeometri er stilt spørsmål vedrørende konsekvensen av økt stigningsgrad og avvik fra normalkravene med tanke på kapasiteten på strekningen, robusthet og kjøretid, og i forbindelse med kostnader for operatører og infrastrukturforvalter. Ved bruk av minstekravet for baner med blandet trafikk må gjøres en inngående vurdering. Det er imidlertid ikke utarbeidet retningslinjer for hva denne vurderingen skal inneholde. Det er viktig at vurderingen tar hensyn til at godstog vil ha vanskeligheter med å overvinne en stor stigning, og at bremselengdene til togene øker ved fall. Ved avvik fra normalkravene må det planlegges slik at det ikke oppstår en flaskehals på strekningen ved at for eksempel godstog blokkerer strekningen lenge som følge av økt stigning. Denne oppgaven studerer en økt stigningsgrad i form av avvik fra normalkravene på 12,5 ‰ fra Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» og konsekvensen av dette for kapasiteten på strekningen.

OPPGAVE

Formålet med masteroppgaven er å studere hva konsekvensene av bruk av minstekravet gitt i Bane NORs «*Tekniske Regelverk*» for stigning og fall på en jernbanestrekning er for kapasiteten på strekningen.

På bakgrunn av dette er det definert følgende problemstilling:

Hva er sammenhengen mellom stigningsgraden på en jernbanestrekning og kapasiteten på strekningen?

For å løse denne problemstillingen skal følgende forskningsspørsmål besvares:

- Hvilke parametere kan ha en påvirkning på kapasiteten på en dobbeltsporet jernbanestrekning med blandet trafikk?
- Hvilke sammenhenger viser et utvalg av de identifiserte parameterne når de modelleres i dataprogrammet LUKS og inkluderes i et parameterstudie?
- Hva er konsekvensen av de teoretiske funnene fra LUKS og parameterstudiet for kapasiteten og kjøretiden på en planlagt jernbanestrekning?

Målsettingen for masteroppgaven er å kunne si noe om hvilke av parameterne som er identifisert og analysert som vil ha stor påvirkning på kapasiteten på strekningen som studeres når stigningsgraden inkluderes som en parameter. Ved å gjennomføre et parameterstudie kan man si noe om hvilke av de utvalgte parametere som har en dominerende påvirkning på kapasiteten, og avgjøre om stigningsgraden er dominerende.

For å besvare det siste forskningsspørsmålet skal det gjennomføres et casestudie. Casestudiet tar for seg en strekning som er planlagt i konstant stigning. På denne måten kan man studere om de teoretiske sammenhengene funnet fra LUKS og parameterstudiet er overførbare til en mindre idealisert strekning. Da strekningen fortsatt er i planstadiet kan teorien fra denne oppgaven benyttes til å si noe om muligheter og begrensninger ved strekningen.

Masteroppgaven ser på kapasitet og kjøretid på strekningen. Analyser vedrørende kostnader, energiforbruk og robusthet inkluderes ikke.

Videre forutsettes det situasjoner som omhandler nybygging og ombygging av jernbanestrekninger med dobbeltspor og blandet trafikk. Horisontalgeometrien til jernbanelinjen er rettstrekninger, og tog lengde og motorkraft tilsvarende dagens nivå der ikke annet er oppgitt.

GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på [student ved IBM wikiside](#))
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på [student ved IBM wikiside](#)

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Masteroppgaven regnes ikke som ferdig levert før kandidaten har levert innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i Sentralbygg II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.
Oppgaven er skrevet i samarbeid med Bane NOR.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/iv/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til kontakt@ibm.ntnu.no

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Elias Kassa

Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner:

Anne Christine Torp Handstanger (NTNU/Norconsult) og Alf Helge Løhren (Bane NOR)

Institutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU

Dato: 15.01.2017, revidert 06.06.2017

Underskrift



Faglærer

Vedlegg 2: Fremgangsmåte for beregning av midlere minste togfølgetid (MMT)

Vedlegg 2:
Fremgangsmåte for beregning av midlere minste togfølgetid
(MMT)

Vedlegg 2: Fremgangsmåte for beregning av midlere minste togfølgetid (MMT)

Togfølgetidene t_{ij} for togene på strekningen er vist i tabell V.2.1. Her viser i til foregående tog, j til etterfølgende tog, og t_{ij} til minste togfølgetid mellom tog i og j .

Tabell V.2.1: Togfølgetider

Foregående (i) Etterfølgende (j)	Gods (Gt, i)	Person (Pt, i)
Gods (Gt, j)	$t_{Gt,i-Gt,j}$	$t_{Pt,i-Gt,j}$
Person (Pt, j)	$t_{Gt,i-Pt,j}$	$t_{Pt,i-Pt,j}$

Formelverk:

$$p_{ij} = \frac{x_i}{N} * \frac{x_j}{N} = \frac{x_i * x_j}{N^2} \quad \text{Sannsynlighet}$$

$$\bar{t}_{ij} = \sum_i \sum_j p_{ij} * t_{ij} \quad \text{MMT}$$

x_i representerer antall tog av type i , x_j er antall tog av type j og N er totalt antall tog.

Beregningene kan gjennomføres i matriseform, der summetegn i formel for \bar{t}_{ij} viser til summen av hele matrisen. Dette vises i tabell V.2.2.

Tabell V.2 1: Beregningsmatrise for MMT

Foregående (i) Etterfølgende (j)	Gods (Gt, i)	Person (Pt, i)
Gods (Gt, j)	$\frac{x_i * x_j * t_{Gt,i-Gt,j}}{N^2}$	$\frac{x_i * x_j * t_{Pt,i-Gt,j}}{N^2}$
Person (Pt, j)	$\frac{x_i * x_j * t_{Gt,i-Pt,j}}{N^2}$	$\frac{x_i * x_j * t_{Pt,i-Pt,j}}{N^2}$

Vedlegg 3:
Blokk lengder – beregningsbakgrunn og beregnede
blokk lengder

Vedlegg 3: Blokk lengder – beregningsbakgrunn og beregnede blokk lengder

Beregning av blokk lengder for modellen som er bygget i LUKS baserer seg på teorien presentert i kapittel 2.1. Alle typer bremsesystemer som er i bruk i Norge benytter avhengige av adhesjonsforholdene. For beregning av bremselengder og bestemmelse av blokkstrekninger benyttes svært lave adhesjonsverdier (verst tenkelige forhold med tanke på bremselengde, f.eks. løv på skinnene). Praktiske erfaringer tilsier at man kan benytte en adhesjonskoeffisient på $\mu=0,07^1$.

Videre beregnes retardasjonen som vist formel V.3.1

$$r = \mu * g \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Formel V.3. 1}$$

$$r = 0,07 * 9,81 = 0,69 \approx 0,7 \frac{m}{s^2}$$

Dette er bakgrunnen for grunnretardasjonen som står oppgitt i Bane NORs Tekniske Regelverk².

Videre kan retardasjonen R for aktuell banestrekning beregnes som vist i formel V.3.2 og V.3.3.

Dersom linjehastigheten på aktuell linje er større enn 150 km/t benyttes formel V.3.2, mens dersom linjehastigheten på aktuell linje er mindre enn 150 km/t benyttes formel V.3.3.

$$R = -0,2 * \frac{L - 150}{150} - \frac{C}{100} + 0,7 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Formel V.3. 2}$$

$$R = -\frac{C}{100} + 0,7 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Formel V.3. 3}$$

der L betegner linjehastigheten (km/t) og C betegner fall i ‰. For linjer uten fall og med linjehastighet $L < 150$ km/t vil man dermed få grunnretardasjonen $r=0,7$ m/s².

¹Etter samtale med medveileder Alf Helge Løhren

²Beregningene og grunnretardasjonen er basert på følgende side fra TR: https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/ATC#Generelt_2

Vedlegg 3: Blokk lengder – beregningsbakgrunn og beregnede blokk lengder

Videre beregnes blokk lengden som vist i formel V.3.4, gjengitt fra kapittel 2.1.

$$MA = \frac{L}{3,6} * T + \frac{L^2 - MH^2}{2 * R * 3,6^2} [m] \quad \text{Formel V.3. 4}$$

der T er et tillegg for hvor lang tid det tar før man ser signalet. Fra TR benyttes T=8 sekunder. MA viser til målavstand, eller blokk lengde som det er omtalt som i denne oppgaven. MH er målhastighet, som her er 0 km/t (full stopp), L er linjehastigheten (km/t) og R er retardasjonen beskrevet over.

Beregninger for blokk lengder for situasjonen i masteroppgaven fremkommer i tabell V.3.1.

Tabell V.3. 1: Beregnede blokk lengder for ulike situasjoner av linjehastighet og fall

Situasjon	1	2	3	4	5	6	7	8
L (km/t)	200,00	250,00	200,00	250,00	200,00	250,00	200,00	250,00
v (m/s)	55,56	69,44	55,56	69,44	55,56	69,44	55,56	69,44
C (‰)	0,00	0,00	12,50	12,50	15,00	15,00	20,00	20,00
R (m/s²)	0,63	0,57	0,51	0,44	0,48	0,42	0,43	0,37
MA (m)	2881,05	4810,77	3480,22	6015,07	3637,25	6342,64	4005,65	7131,78

Man ser at dersom hver analysesituasjon skal vurderes, kreves flere ulike signalplasseringer og blokk lengder. For å forenkle arbeidet er det valgt å benytte en fast blokk lengde lik 3 km, som vil tilsvare situasjon 1 i tabellen over.

Vedlegg 4:
Hoved- og samspillseffekter – beregningsbakgrunn og
beregnete effekter

Vedlegg 4: Hoved- og samspillseffekter – beregningsbakgrunn og beregnede effekter

Hoved- og samspillseffekter beregnes med formelen:

$$Effekt = \frac{\sum R_+}{2^{n-1}} - \frac{\sum R_-}{2^{n-1}} = \overline{R_+} - \overline{R_-},$$

$$n = 1, 2, \dots, n$$

Der R er responsverdien og n er antall parametere som inkluderes.

Eksakte verdier for hoved- og samspillseffektene for basisanalysene og sensitivitetsanalysene er vist på de neste sidene.

Vedlegg 4: Hoved- og samspillseffekter – beregningsbakgrunn og beregnede effekter

<i>Basisanalyse</i>		<i>Sensitivitetsanalyse 1</i>	
Parametere og kombinasjoner	Hoved- og samspillseffekter	Parametere og kombinasjoner	Hoved- og samspillseffekter
X1	-0,786	X1	-0,85799805
X2	0,017	X2	0,01098633
X3	0,267	X3	0,3137207
X4	0,048	X4	0,05469727
X5	-0,321	X5	-0,3765918
X6	-0,007	X6	0,00108398
X7	1,232	X7	1,43049805
X1X2	-0,014	X1X2	-0,0075293
X1X3	0,016	X1X3	-0,03104492
X1X4	0,008	X1X4	0,00149414
X1X5	-0,124	X1X5	-0,06885742
X1X6	0,014	X1X6	0,00584961
X1X7	-0,004	X1X7	-0,20223633
X2X3	0,010	X2X3	0,01200195
X2X4	0,036	X2X4	0,03864258
X2X5	0,009	X2X5	0,01180664
X2X6	0,012	X2X6	0,02264648
X2X7	-0,005	X2X7	-0,00536133
X3X4	-0,021	X3X4	-0,02612305
X3X5	-0,00037	X3X5	-0,00370117
X3X6	-0,004	X3X6	-0,0046582
X3X7	0,108	X3X7	0,1259668
X4X5	-0,066	X4X5	-0,07268555
X4X6	-0,045	X4X6	-0,04680664
X4X7	-0,014	X4X7	-0,01508789
X5X6	0,008	X5X6	0,00385742
X5X7	-0,042	X5X7	-0,04227539
X6X7	0,002	X6X7	0,00071289

Vedlegg 4: Hoved- og samspillseffekter – beregningsbakgrunn og beregnede effekter

Sensitivitetsanalyse 2



Parametere og kombinasjoner	Hoved- og samspillseffekter
X1	1,78704102
X2	-0,00686523
X3	0,17493164
X4	0,05418945
X5	-0,52631836
X6	0,00956055
X7	0,62709961
X1X2	0,01032227
X1X3	0,10774414
X1X4	0,00200195
X1X5	0,08086914
X1X6	-0,00262695
X1X7	0,60116211
X2X3	0,00446289
X2X4	0,02891602
X2X5	0,02379883
X2X6	0,03987305
X2X7	-0,00282227
X3X4	-0,02647461
X3X5	-0,05061523
X3X6	-0,00227539
X3X7	0,05538086
X4X5	-0,09991211
X4X6	-0,05458008
X4X7	-0,02051758
X5X6	-0,01563477
X5X7	-0,03020508
X6X7	-0,00182617

Sensitivitetsanalyse 3

Parametere og kombinasjoner	Hoved- og samspillseffekter
X1	2,63566406
X2	0,00972656
X3	0,21535156
X4	0,04238281
X5	-0,46777344
X6	-0,00660156
X7	0,83996094
X1X2	0,02722656
X1X3	0,14785156
X1X4	-0,01011719
X1X5	0,13910156
X1X6	-0,01910156
X1X7	0,81371094
X2X3	-0,00339844
X2X4	0,04097656
X2X5	0,02863281
X2X6	0,04152344
X2X7	-0,01472656
X3X4	-0,01371094
X3X5	-0,02277344
X3X6	0,00730469
X3X7	0,06308594
X4X5	-0,09714844
X4X6	-0,06097656
X4X7	-0,00863281
X5X6	-0,01738281
X5X7	-0,02425781
X6X7	0,00847656

Vedlegg 5: Valg av sporveksel og utforming av forbikjøringsspor

Vedlegg 5:
Valg av sporveksel og utforming av forbikjøringsspor

Vedlegg 5: Valg av sporveksel og utforming av forbikjøringsspor

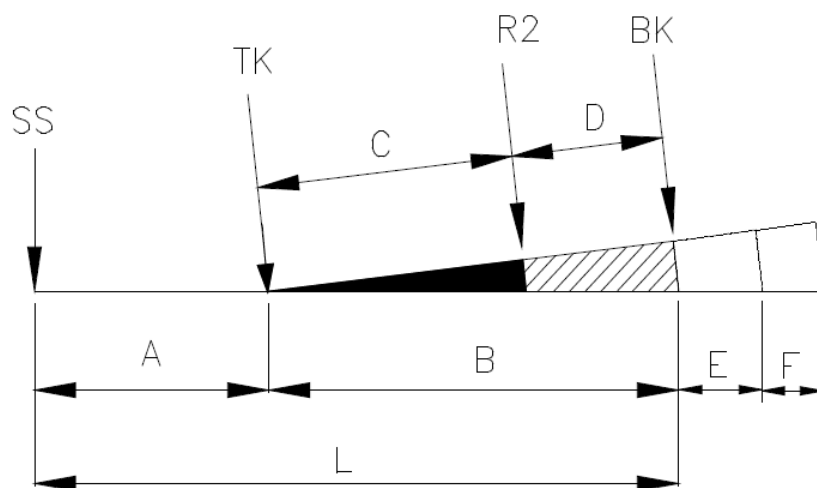
Forbikjøringssporene i infrastrukturmodellen har en enkel sporveksel. Sporvekselen trafikkeres med en hastighet på 80 km/t. Tabell 5 fra Bane NORs Tekniske Regelverk *Overbygning/Prosjektering/Sporveksler* kapittel 7¹ gir sporvekseltype 1:14 R760, og er gjengitt i figur V.5.1.

Tabell 5: Hastighet i avvik enkle sporveksler

Sporvekseltype (stigning, radius)	Hastighet i avvik [km/h]
1:9 R190	35
1:9 R300	40
1:12 R500	60
1:14 R760	80
1:15 R760	80
1:18,4 R1200	100
1:26,1 R2500	140

Figur V.5. 1: Sporvekseltype og hastighet i avvik

For å finne nødvendige mål i tilknytning til sporvekselen ble skissen med tilhørende hovedmål fra TR benyttet. Skissen vises i figur V.5.2. Verdier for hovedmålene for aktuell sporveksel (1:14 R760) er gjengitt i figur V.5.3. Det antas bevegelig skinnekryss. Figur V.5.2 og V.5.3 er fra Teknisk Regelverk: *Overbygning/Prosjektering/Sporveksler* kapittel 4. Det er gitt en tegnforklaring i tabell V.5.1.



Figur V.5. 2: Enkel veksler, hovedmål

¹ Fra: <https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporveksler> (Hentet: 03/2017)

Vedlegg 5: Valg av sporveksel og utforming av forbikjøringsspor

Tabell 3: Sporveksler med bevegelig skinnekryss, hovedmål

Profil	Sviller	Stigning Radius	A	B	C	D	L	E	F	Total masse	Tegn.nr
60E1	Betong	1:9 R300	16615	19760	16615	3145	36375	1750	2950		OB.800099
	Betong	1:12 R500	20797	23306	20797	2509	44103	5994	-		OB.800090
	Betong	1:14 R760	27108	27108	27108	-	54216	10825	9000		OB.800108
	Betong	1:15 R760	25305	28911	25305	3606	54216	2400	9600		OB.800164
	Betong	1:18,4 R1200 ¹	32829	34429	34429	-	67257	10781	-		OB.800081
	Betong	1:26,1 R2500 ¹	48109	46491	46491	-	94600	17400	-		Sk 3800

Alle mål er i mm.

1) Klotoideveksel

Figur V.5. 3: Sporveksler med bevegelig skinnekryss, hovedmål

Tabell V.5. 1: Tegnforklaring hovedmål

Tegn	Forklaring
<i>SS</i>	Stokkskinneskjøt
<i>BK</i>	Bakkant sporveksel
<i>R2</i>	Sirkelkurvens endepunkt i avvik
<i>TK</i>	Teoretisk kryss
<i>L</i>	Byggelengde
<i>D</i>	Rettlinjet parti i avvik
<i>E</i>	Lengde av parti med langsviller utenfor BK
<i>F</i>	Lengde av parti med kortsviller utenfor BK

Vedlegg 6:
Plassering av stigningsgraden i infrastrukturmodellen

Vedlegg 6: Plassering av stigningsgraden i infrastrukturmodellen

Plassering av stigningsgraden baserer seg på beregning med konstant akselerasjon. Beregningene tar utgangspunkt i bevegelseslikningene:

$$v = v_0 + a * t$$

$$s = v_0 * t + \frac{1}{2} * a * t^2$$

$$2 * a * s = v^2 + v_0^2$$

Videre gjøres følgende antagelser¹:

- Akselerasjon godstog: 0,4 m/s²
- Akselerasjon persontog: 1,0 m/s²

Bevegelseslikningene benyttes slik at strekningen s identifiseres. s beregnes ved å først beregne tiden t det tar å akselerere til hastigheten v fra utgangshastigheten v_0 (0 km/t).

$$t = \frac{v}{a}$$

$$s = \frac{1}{2} * a * t^2$$

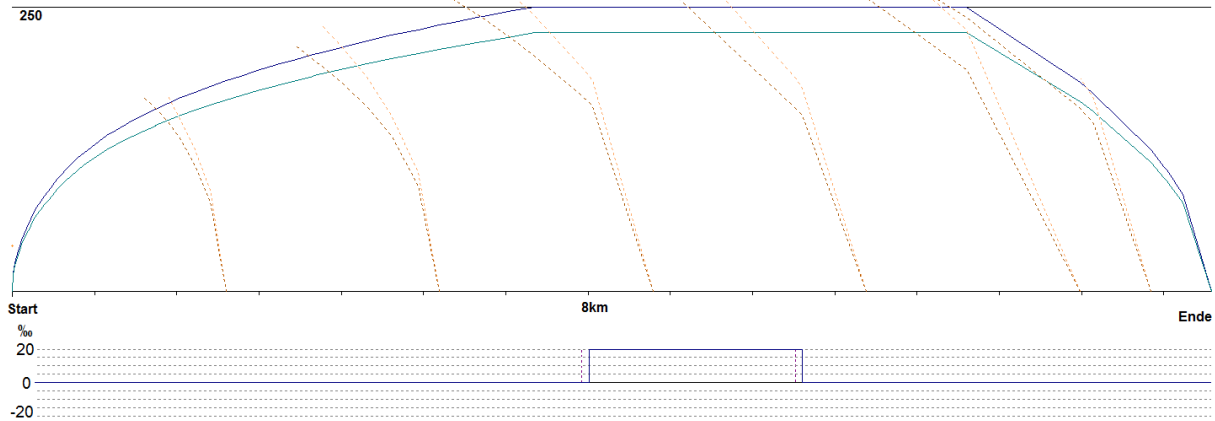
De to situasjonene som studeres er som følger:

- Situasjon A: Samtlige tog har nådd sin maksimale hastighet (henholdsvis 100 km/t, 200 km/t eller 250 km/t)
- Situasjon B: Samtlige tog er fortsatt akselererende – beregningene baseres på at togene har nådd 50% av sin maksimale hastighet

¹ Antagelsene er basert på http://jernbanekompetanse.no/wiki/Teknisk_linjef%C3%B8ring

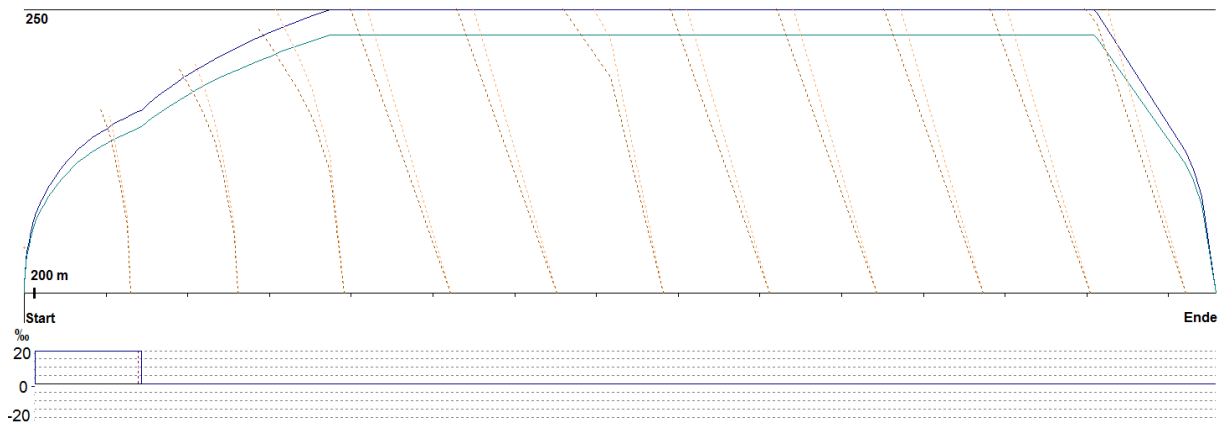
Vedlegg 6: Plassering av stigningsgraden i infrastrukturmodellen

Figur V.6.1 viser plasseringen ved situasjon A, med hastighetsdiagrammet for et persontog av type ICE. ICE-toget skal akselerere til 250 km/t, og krever nesten 8 km for å nå sin maksimale hastighet. Stigningsgraden plasseres dermed etter 8 km, der samtlige av togene har nådd sin maksimale hastighet.



Figur V.6. 1: Hastighetsdiagram persontog ICE. Plassering av stigningsgrad situasjon A

Figur V.7.2 viser plasseringen ved situasjon B, med hastighetsdiagram for et persontog av type ICE. Plasseringen av stigningsgraden er 200 meter fra utgangsstasjonen, der samtlige tog fortsatt er i akselerasjon ved møte av stigningsgraden.



Figur V.6. 2: Hastighetsdiagram persontog ICE. Plassering av stigningsgrad situasjon B

Vedlegg 7:
MATLAB-script og designmatrise for parameterstudiet

Vedlegg 7: MATLAB-script og designmatrise for parameterstudiet

MATLAB-scriptet som er benyttet for å generere en designmatrise for 2^7 kombinasjoner av analyseparameterne med tilhørende to nivåer presenteres under. Tabell V.7.1 viser en oversikt over analyseparameterne med tilhørende koder (+1 og -1). Den genererte designmatrisen vises på neste side.

```
function x = ff2n_mod(n)
%FF2N Two-level full-factorial design.
% X = FF2N(N) creates a two-level full-factorial design, X.
% N is the number of columns of X. The number of rows is 2^N.

% B.A. Jones 2-17-95
% Copyright 1993-2004 The MathWorks, Inc.

rows = 2.^(n);
ncycles = rows;
x = -1*ones(rows,n);

for k = 1:n
    settings = (-1:2:1);
    ncycles = ncycles/2;
    nreps = rows./(2*ncycles);
    settings = settings(ones(1,nreps),:);
    settings = settings(:);
    settings = settings(:,ones(1,ncycles));
    x(:,n-k+1) = settings(:);
end

>> ff2n_mod(7)
```

```
ans =
```

Analyseparametere med koder:

<i>Parameter</i>	<i>Kode</i>	<i>Nivå 1</i>	<i>Nivå 2</i>
		<i>+1</i>	<i>-1</i>
<i>Togmiks</i>	X1	3P1G	1P3G
<i>Stigningsgrad (%)</i>	X2	20	12,5
<i>Type persontog</i>	X3	ICE	BM74
<i>Retning</i>	X4	Stigning	Fall
<i>Hastighetsprofil (starttilstand)</i>	X5	Flying	Stopp
<i>Plassering av stigning</i>	X6	Full	Akselererende
<i>Lengde av analysestrekningen (km)</i>	X7	30	15

Designmatrise:

Vedlegg 7: MATLAB-script og designmatrise for parameterstudiet

Run								
Factors	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
5	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
6	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
7	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
8	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
9	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
10	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
11	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
12	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1
13	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
14	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
15	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
16	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
17	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
18	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
19	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
20	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
22	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
23	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
24	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
25	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
26	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
27	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1
28	-1	-1	1	1	-1	1	1	1
29	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
30	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
31	-1	-1	1	1	1	1	1	-1
32	-1	-1	1	1	1	1	1	1
33	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
34	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
35	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
36	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
37	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
38	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
39	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1
40	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
41	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
42	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
43	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
44	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
45	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
46	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1
47	-1	1	-1	1	1	1	1	-1
48	-1	1	-1	1	1	1	1	1
49	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
50	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
51	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
52	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
53	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
54	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
55	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
56	-1	1	1	-1	1	1	1	1
57	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
58	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
59	-1	1	1	1	-1	1	1	-1
60	-1	1	1	1	-1	1	1	1
61	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
62	-1	1	1	1	1	-1	-1	1
63	-1	1	1	1	1	1	1	-1
64	-1	1	1	1	1	1	1	1

Vedlegg 7: MATLAB-script og designmatrise for parameterstudiet

65	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
66	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
67	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
68	1	-1	-1	-1	-1	1	1
69	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
70	1	-1	-1	-1	1	-1	1
71	1	-1	-1	-1	1	1	-1
72	1	-1	-1	-1	1	1	1
73	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
74	1	-1	-1	1	-1	-1	1
75	1	-1	-1	1	-1	1	-1
76	1	-1	-1	1	-1	1	1
77	1	-1	-1	1	1	-1	-1
78	1	-1	-1	1	1	-1	1
79	1	-1	-1	1	1	1	-1
80	1	-1	-1	1	1	1	1
81	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
82	1	-1	1	-1	-1	-1	1
83	1	-1	1	-1	-1	1	-1
84	1	-1	1	-1	-1	1	1
85	1	-1	1	-1	1	-1	-1
86	1	-1	1	-1	1	-1	1
87	1	-1	1	-1	1	1	-1
88	1	-1	1	-1	1	1	1
89	1	-1	1	1	-1	-1	-1
90	1	-1	1	1	-1	-1	1
91	1	-1	1	1	-1	1	-1
92	1	-1	1	1	-1	1	1
93	1	-1	1	1	1	-1	-1
94	1	-1	1	1	1	-1	1
95	1	-1	1	1	1	1	-1
96	1	-1	1	1	1	1	1
97	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
98	1	1	-1	-1	-1	-1	1
99	1	1	-1	-1	-1	1	-1
100	1	1	-1	-1	-1	1	1
101	1	1	-1	-1	1	-1	-1
102	1	1	-1	-1	1	-1	1
103	1	1	-1	-1	1	1	-1
104	1	1	-1	-1	1	1	1
105	1	1	-1	1	-1	-1	-1
106	1	1	-1	1	-1	-1	1
107	1	1	-1	1	-1	1	-1
108	1	1	-1	1	-1	1	1
109	1	1	-1	1	1	-1	-1
110	1	1	-1	1	1	-1	1
111	1	1	-1	1	1	1	-1
112	1	1	-1	1	1	1	1
113	1	1	1	-1	-1	-1	-1
114	1	1	1	-1	-1	-1	1
115	1	1	1	-1	-1	1	-1
116	1	1	1	-1	-1	1	1
117	1	1	1	-1	1	-1	-1
118	1	1	1	-1	1	-1	1
119	1	1	1	-1	1	1	-1
120	1	1	1	-1	1	1	1
121	1	1	1	1	-1	-1	-1
122	1	1	1	1	-1	-1	1
123	1	1	1	1	-1	1	-1
124	1	1	1	1	-1	1	1
125	1	1	1	1	1	-1	-1
126	1	1	1	1	1	-1	1
127	1	1	1	1	1	1	-1
128	1	1	1	1	1	1	1