

Kryss i plan for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor

Karina Rangnes Bøe

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Elias Kassa, IBM

Medveileder: Anne Christine Torp Handstanger, Infraplan

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel:	Dato: 02.06.18		
Kryss i plan for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor	Antall sider (inkl. bilag): 138		
	Masteroppgave	x	Prosjektoppgave
Navn:	Karina Rangnes Bøe		
Faglærer/veileder:	Elias Kassa		
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:	Anne Christine Torp Handstanger		

Ekstrakt:
<p>Som en del av InterCity-prosjektet vil jernbanenettet på Østlandet gjennomgå store endringer i årene framover for å håndtere den forventede befolkningsveksten. Andelen rullende materiell vil måtte øke i takt med etterspørselen etter togreiser. Dermed vil også hensettingsbehovet øke, og nye hensettingsanlegg trengs. Noen av de nye hensettingsanleggene planlegges bygd langs dobbeltsporene av InterCity der dimensjonerende hastighet er 250 km/t.</p> <p>Et av kryssutformingsalternativene som vurderes fra hensettingsanlegg og inn på dobbeltspor, er kryss i plan med midtstilt ventespor. Formålet med denne oppgaven var å finne ut hvordan påkoblingsløsningen kryss i plan med ventespor vil fungere i praksis på en InterCity-strekning for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor. Kapasitetsverktøyet LUKS ble brukt til kapasitets- og ruteplananalyser gjennom en selvbygd infrastrukturmodell av en dummy-strekning. Infrastrukturmodellen ble brukt til å analysere forhåndsdefinerte analysescenarier i definerte ruteplaner. Resultatene fra kapasitets- og ruteplanstudiet ble brukt til å vurdere de foreslåtte anleggene fra utredningen <i>Hensetting Østlandet delrapport 3</i> i en casestudie. De viktigste resultatene fra kapasitets- og ruteplanstudiet er forventet ventetid på ventesporet for de ulike analysescenariene. Parametere som ble forventet å ha betydning for ventetiden ble identifisert gjennom litteraturstudiet, og fem av de identifiserte parameterne ble studert i en sensitivitetsanalyse. Sensitivitetsanalysen ble utført for å finne svar på hvilke av de studerte parameterne som har størst utslag for ventetiden.</p> <p>Oppgaven konkluderer med at kryss i plan med ventespor er egnet ved opptil ca. 60 % kapasitetsutnyttelse, eller ett til to tog i timen fra hensetting ved fire til seks tog i timen på dobbeltsporet. Ved lavere kapasitetsutnyttelse enn 45 % er kryss i plan uten ventespor tilstrekkelig. Dette tilsvarer ett, eller maksimalt to, tog fra hensetting og opptil fire tog i timen på dobbeltsporet. Basert på resultatene fra sensitivitetsanalysen konkluderes det med at å redusere antall tog per time, fra hensetting eller på dobbeltsporet eller å fjerne godstog, som er ruteplanendringer, gir større effekt enn infrastrukturendringer, som å redusere blokk lengden eller innføre planskilt kryssløsning.</p>

Stikkord:

1. Jernbanekapasitet
2. Kapasitetsanalyse
3. Hensetting
4. InterCity
5. Ruteplan

Karina Rangnes Bøe
(sign.)

FORORD

Denne masteroppgaven er utført av Karina Rangnes Bøe ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU. Oppgaven er skrevet i løpet av vårsemesteret 2018 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Oppgaven er skrevet innenfor spesialiseringen jernbane, og tar for seg kapasitetsanalyser i forbindelse med bruk av kryss i plan med ventespor for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor. Et sammendrag av oppgaven ble sendt inn til *Nordic Railway Seminar 2018* i Göteborg. Oppgaven ble godtatt, og skal presenteres under seminaret 12.-13.juni i år.

Denne oppgaven hadde ikke blitt realisert uten hjelp fra hovedveileder Elias Kassa og medveileder Anne Christine Torp Handstanger.

Jeg ønsker å takke hovedveileder Elias Kassa ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU for veiledning, hjelp med utarbeidelsen av sammendraget til *Nordic Railway Seminar* og gode innspill underveis.

En stor takk rettes til medveileder Anne Christine Torp Handstanger i Infraplan for hjelp med arbeidet i LUKS, faglige diskusjoner og veiledning underveis, samt gjennomlesing av utkast og forslag til forbedringer gjennom hele prosessen.

En stor takk rettes også til RWTH Aachen University og Jernbanedirektoratet. RWTH Aachen University har bidratt ved å arrangere kurs i bruk av LUKS som jeg fikk mulighet til å delta på. Jernbanedirektoratet har gitt økonomisk støtte i form av et stipend som ble brukt til å dekke utgiftene for reisen til Aachen. Jeg vil også takke familie og venner for støtte og hjelp underveis, samt for korrekturlesing ved ferdigstillelse av oppgaven.

Til slutt vil jeg presisere at denne oppgaven kun er ment som en teoretisk studie av kryss i plan som påkoblingsløsning for hensettingsanlegg på InterCity, oppgaven er ikke en fasit.

Trondheim, juni 2018

Karina Rangnes Bøe

Karina Rangnes Bøe

ABSTRACT

Single-lead junctions for merging from rail yards onto double tracks

In the years to come, the railway network in the eastern part of Norway will go through great developments as part of the InterCity-project to handle the expected population growth. With the entire InterCity-project completed, the number of travellers per year is expected to increase from today's 8.8 million to 17.8 million according to Samferdselsdepartementet (2016-2017). The quantity of rolling stocks will need to increase as a response to the increased demand. Hence, the demand for train stabling will increase, and new rail yards will be needed. Some of the new rail yards are considered to be built along the double tracks of InterCity, which are designed for speeds of 250 km/h.

Single-lead junctions with waiting tracks is one of the options being considered along the InterCity tracks for the merging from rail yards onto double tracks. The aim of this study is to address how single-lead junctions with waiting tracks will function on InterCity lines. The capacity analysis tool LUKS have been used for a capacity and timetable analysis through a dummy infrastructure model. Predefined analysis scenarios and defined timetables have been analysed in the infrastructure model. The results from the analysis have been used to evaluate the suggested areas for rail yards from the report *Hensetting Østlandet delrapport 3*, as part of a case study. The most important results from the capacity and timetable analysis are the expected waiting times at the waiting track for all scenarios. Parameters that are expected to affect the waiting time have been identified through a literature review. Five of the identified parameters were studied in a sensitivity analysis.

The study concludes that single-lead junctions with waiting tracks are suited if the capacity utilization is less than 60 %, which corresponds to one or two trains per hour from the rail yard and four to six trains per hour on the double track. With capacity utilizations less than 45 % single lead junctions without waiting track will be sufficient. Based on the results from the sensitivity analysis, changes in the timetable, as reducing the number of trains per hour or omitting freight trains from the line, are more effective for reducing the waiting time than infrastructural changes, as reducing the block length or introducing grade-separated junctions.

SAMMENDRAG

Kryss i plan for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor

Som en del av InterCity-prosjektet vil jernbanenettet på Østlandet gjennomgå store endringer i årene framover for å håndtere den forventede befolkningsveksten. Med full utbygging av InterCity forventes det 17,8 millioner årlig reisende, i motsetning til dagens 8,8 millioner ifølge Samferdselsdepartementet (2016-2017). Andelen rullende materiell vil måtte øke i takt med etterspørselen etter togreiser. Dermed vil også hensettingsbehovet øke, og nye hensettingsanlegg trengs. Noen av de nye hensettingsanleggene planlegges bygd langs dobbeltsporene av InterCity der dimensjonerende hastighet er 250 km/t.

Et av kryssutformingsalternativene som vurderes fra hensettingsanlegg og inn på dobbeltspor, er kryss i plan med midtstilt ventespor. Formålet med denne oppgaven var å finne ut hvordan påkoblingsløsningen kryss i plan med ventespor vil fungere i praksis på en InterCity-strekning for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor. Kapasitetsverktøyet LUKS ble brukt til kapasitets- og ruteplananalyser gjennom en selvbygd infrastrukturmodell av en dummy-strekning. Infrastrukturmodellen ble brukt til å analysere forhåndsdefinerte analysescenarier i definerte ruteplaner. Resultatene fra kapasitets- og ruteplanstudiet ble brukt til å vurdere de foreslåtte anleggene fra utredningen *Hensetting Østlandet delrapport 3* i en casestudie. De viktigste resultatene fra kapasitets- og ruteplanstudiet er forventet ventetid på ventesporet for de ulike analysescenariene. Parametere som ble forventet å ha betydning for ventetiden på ventesporet ble identifisert gjennom litteraturstudiet, og fem av de identifiserte parameterne ble studert i en sensitivitetsanalyse. Sensitivitetsanalysen ble utført for å finne svar på hvilke av de studerte parameterne som har størst utslag for ventetiden.

Opgaven konkluderer med at kryss i plan med ventespor er egnet ved opptil ca. 60 % kapasitetsutnyttelse, eller ett til to tog i timen fra hensetting ved fire til seks tog i timen på dobbeltsporet. Ved lavere kapasitetsutnyttelse enn 45 % er kryss i plan uten ventespor tilstrekkelig. Dette tilsvarer ett, eller maksimalt to, tog fra hensetting og opptil fire tog i timen på dobbeltsporet. Basert på resultatene fra sensitivitetsanalysen konkluderes det med at å redusere antall tog per time, fra hensetting eller på dobbeltsporet eller å fjerne godstog, som er ruteplanendringer, gir større effekt enn infrastrukturendringer, som å redusere blokk lengden eller innføre planskilt kryssløsning.

INNHOILDSFORTEGNELSE

FORORD	iii
ABSTRACT	v
SAMMENDRAG	vii
DEFINISJONER OG FORKORTELSER	xv
1. INNLEDNING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål og problemstilling	3
1.3 Avgrensninger	4
1.4 Rapportens oppbygning.....	5
2. LITTERATURGJENNOMGANG	7
2.1 Kapasitet for jernbanelinjer	7
2.2 Minste togfølgetid	15
2.3 Togseparasjon ved bruk av blokkstrekninger.....	18
2.4 Ruteplan og takting	22
2.5 Hensetting.....	25
2.6 Oppsummering av benyttet litteratur.....	32
3. METODE	35
3.1 Litteraturstudie	35
3.2 Modellering av infrastruktur i LUKS.....	36
3.3 Analyse av forhåndsdefinerte scenarioer	37
3.4 Casestudie av anleggene fra utredningen Hensetting Østlandet	43
3.5 Vurdering av metode	44
4. MODELLERING	47
4.1 Oppbygging av infrastrukturmodellen i LUKS.....	47

4.2	Parametere som påvirker innflettingsprosessen	56
4.3	Casestudie.....	58
5.	RESULTATER	65
5.1	Ett tog fra hensetting	65
5.2	To og tre tog fra hensetting per time	69
5.3	Uten godstog	70
5.4	Halvert blokk lengde	72
5.5	Planskilt løsning	72
5.6	Sensitivitetsanalyse	73
5.7	Casestudie.....	75
5.8	Sammendrag og konklusjon for casestudien	85
6.	DISKUSJON.....	87
6.1	Gjennomgang og tolkning av presenterte resultater.....	87
6.2	Sensitivitetsanalysen	94
6.3	Casestudien: pålitelighet og usikkerhet.....	97
6.4	Pålitelighet og anvendbarhet	98
7.	KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID	101
7.1	Konklusjon	101
7.2	Videre arbeid	102
8.	REFERANSER	104
VEDLEGG		

TABELLISTE

Tabell 1: Anbefalte påkoblingsløsninger (Jernbaneverket et al., 2015a).....	2
Tabell 2: Utnyttelsesgrader av teoretisk kapasitet. Fra UIC (2013).....	9
Tabell 3: Ingen vridning (grå) og vridning på 10 min (blå).....	24
Tabell 4: Togmateriell for InterCity (Jernbaneverket, 2015).....	29
Tabell 5: Togbevegelser til og fra hensettingsanlegg.....	31
Tabell 6: Egenskaper for togene i infrastrukturmodellen.....	51
Tabell 7: Aktuelle arealer for casestudiet. Basert på (Bøe, 2017).....	59
Tabell 8: Tilbudskonsept 2050 for Dovrebanen/Gardermobanen (Jernbaneverket, 2016a)	60
Tabell 9: Tilbudskonsept 2050 for Østfoldbanen (Jernbaneverket, 2016a).....	61
Tabell 10: Tilbudskonsept 2050 for Ringeriksbanen (Jernbaneverket, 2016a)	61
Tabell 11: Tilbudskonsept 2040 for Gulskogen-Hokksund (Bane NOR & Norconsult, 2017)62	
Tabell 12: Tilbudskonsept 2050 for Vestfoldbanen (Jernbaneverket, 2016a)	63
Tabell 13: Ruteplaner (ingen vridning) for alle scenarioene.....	65
Tabell 14: Nøkkeltall for analysen med ett tog fra hensetting	66
Tabell 15: Resultater fra sensitivitetsanalysen	74
Tabell 16: Rangering av analyseparametere	75
Tabell 17: Vurderingskriterier for casestudien.....	76
Tabell 18: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Borghyttholen	77
Tabell 19: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Kjølstadskogen.....	78
Tabell 20: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Diling og Såstadsbogen	79
Tabell 21: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Valle.....	80
Tabell 22: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Tolpinrud	81
Tabell 23: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Kleggen og Ryggkollen	83
Tabell 24: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Tuft og Tønsberg nord	84
Tabell 25: Konklusjon for casestudien.....	85

FIGURLISTE

Figur 1: InterCity-utbyggingen. Hentet fra Bane NOR Prosjekter: InterCity	1
Figur 2: Sammenhengen mellom kapasitet og pålitelighet. Fra Abril et al. (2008).....	9
Figur 3: Flytdiagram for komprimeringsmetoden. Basert på Landex (2008)	11
Figur 4: Illustrasjon av komprimeringsmetoden. Hentet fra Landex (2008)	11
Figur 5: Tog med lavere prioritet får lengre kjøretid. Fra Handstanger (2009).....	12
Figur 6: Sammenhengen mellom kapasitet og forsinkelse. Basert på Handstanger (2009).....	13
Figur 7: Sammenhengen mellom punktlighet og kapasitetsutnyttelse. Basert på Kaas (2000)	13
Figur 8: Minste togfølgetid og hastighet. Basert på Landex (2008)	16
Figur 9: Blandet trafikk reduserer kapasiteten på en jernbanelinje. Fra Pawar (2011).....	16
Figur 10: 3-aspekts signalering. Fra The Railway Technical Website (2018).....	19
Figur 11: Elementene som inngår i okkupasjonstiden. Fra Handstanger (2009).....	21
Figur 12: Minste togfølgetid fra blocking time model. Fra Spönemann og Wendler (2010) ..	22
Figur 13: Sekkeanlegg for hensetting ved Tolpinrud (Jernbaneverket et al., 2015c)	27
Figur 14: Hensetting med to påkoblingspunkter, Rishagen (Jernbaneverket et al., 2015b) ...	27
Figur 15: Togtettheter forbi Lillestrøm stasjon	30
Figur 16: Togbevegelser fra hensetting (positive tall) og til hensetting (negative tall)	32
Figur 17: Illustrasjon av metoden for oppgaven	35
Figur 18: Avlesning av minste togfølgetid fra LUKS.....	41
Figur 19: Forhåndsdefinerte maler fra LUKS	48
Figur 20: Modellstrekning laget i LUKS	48
Figur 21: Hastighetsdiagram for flying start for godstog.....	50
Figur 22: Ventesporløsningen i infrastrukturmodellen	54
Figur 23: Spornummereringen på stasjon 1 og 2	55
Figur 24: Sammenhengen mellom utnyttet kapasitet og forventet ventetid.....	67
Figur 25: Sammenhengen mellom vridning og ventetid.....	67

Figur 26: Vektet forsinkelse for ulike vridninger.....	68
Figur 27: Ventetider for ett, to og tre tog fra hensetting	69
Figur 28: Gjennomsnittlig total innkjøringstid for ett, to og tre tog fra hensetting.....	70
Figur 29: Sammenligning av opprinnelig analyse og analysen uten godstog	71
Figur 30: Total innkjøringstid for tre tog fra hensetting	71
Figur 31: Sammenligning av blokk lengde på 5 km og 2,5 km	72
Figur 32: Planskilt kryss i forhold til kryss i plan	73
Figur 33: Tilnærmet lineært og eksponentielt område. Basert på Pachl (2014)	94
Figur 34: Forventet ventetid og antall tog fra hensetting per time for scenario 1 til 5	96

VEDLEGG

Vedlegg 1: Oppgavetekst

Vedlegg 2: Beregning av blokk lengder

Vedlegg 3: Beregning av midlere minste togfølgetid vha. ruteplanuavhengig metode

Vedlegg 4: Ruteplaner benyttet i analysene

Vedlegg 5: Nøkkeltall for analysene

DEFINISJONER OG FORKORTELSER

I dette kapittelet defineres viktige begreper og forkortelser som benyttes i oppgaven. Noen av begrepene som presenteres er hentet fra kapasitetsverktøyet LUKS som bruker engelsk som programspråk. De engelske begrepene fra LUKS er derfor brukt, og begrepene er skrevet i kursiv.

Ascending: I retning mot stigende kilometer. Brukes som retningsangivelse i LUKS.

ATC: *Automatic Train Control.* ATC er et sikkerhetssystem for togframføring.

Blokkstrekning og blokk lengde: Strekningen mellom to hovedsignaler på en jernbanelinje.

Buffertid: Ekstra tid som skal kompensere for små forsinkelser. Den planlagte følgetiden mellom to tog består av minste togfølgetid i tillegg til buffertid.

Descending: I retning mot synkende kilometer. Brukes som retningsangivelse i LUKS.

ERTMS: *European Rail Traffic Management System.* ERTMS er et standardisert automatisert signalsystem for jernbanen i Europa.

ETCS: *European Train Control System.* ETCS er hastighetsovervåknings- og signaleringskomponenten av ERTMS.

FLIRT: *Flinker Leichter Innovativer Regional Triebzug.* En togtype som blant annet brukes for InterCity- og regiontog på norske jernbanelinjer. Togtypen er utviklet av det sveitsiske selskapet Stadler Rail.

Flying start: Tog med flying start entrer og forlater analysestrekningen i sin maksimale hastighet. *Flying start* brukes for godstogene i analysene i denne oppgaven.

Følsomhetsstudie / Sensitivitetsstudie: En analyse der det undersøkes hvor følsom resultatvariabelen er for endringer i faktorene som inngår i beregningene eller analysen.

Hensettingsanlegg: Brukes for oppbevaring, vask og rengjøring av togmateriell, og består av et system av sidespor (Pachl, 2015).

Kapasitet: Det maksimale antallet tog som kan trafikkere en jernbanestrekning i løpet av en time (teoretisk kapasitet). Det skilles mellom teoretisk og praktisk kapasitet.

Kjøretid: Tiden et tog bruker på å kjøre gjennom analysestrekningen i infrastrukturmodellen.

Kryss i plan / *single-lead junction*: Et kryss der trafikken krysser i samme plan.

LDFT: *Long Distance Freight Train*. Godstogtypene som er valgt i LUKS.

LDPT: *Long Distance Passenger Train*. Passasjertogtypen som er valgt i LUKS.

LUKS: *Leistungsuntersuchungen von Knoten und Strecken*. Et kapasitetsverktøy for jernbane som kan brukes til ruteplanlegging, kapasitetsanalyser og simuleringer.

Minste togfølgetid: Tiden tog j minst må vente før det kan kjøre inn på en delstrekning som er okkupert av et annet tog i (Spönemann og Wendler, 2010)

Okkupasjonstid: Tidsrommet der en blokkstrekning er okkupert av et tog og dermed er blokkert for andre tog.

Planskilt kryss / *grade-separated junction*: Et kryss der trafikken krysser i flere etasjer. Planskilte kryss reduserer antallet konfliktpunkter.

***Route / signal liberation equipment* (RLE/SLE):** Akselteller, et infrastrukturelement som toget må passere før ruten eller signalet frigis.

Ruteplan: En plan som inneholder informasjon om togruter og planlagte avreise- og ankomsttidspunkter for de ulike rutene.

Strekning: Del av en jernbanelinje der kapasitetsutnyttelsen og togmiksen, samt infrastruktur og signalering ikke varierer fundamentalt.

Teknisk regelverk fra Bane NOR: Arkiv av normaler innen jernbanetekniske fagområder. Fungerer som hjelpemiddel ved dimensjonering og bygging av jernbaneanlegg (Bane NOR, 2018a).

UIC: *Union Internationale des Chemins de fer*, eller *International Union of Railways*. En global profesjonell forening som representerer jernbanesektoren og fremmer jernbanetransport (International Union of Railways, 2014).

1. INNLEDNING

I dette kapittelet presenteres bakgrunnen for oppgaven. Deretter presenteres oppgavens formål og problemstilling, samt forskningsspørsmålene som oppgaven skal besvare. Avgrensningene som er gjort for å besvare problemstillingen presenteres deretter i neste del. Til slutt i kapittelet presenteres rapportens videre oppbygning, samt en oversikt over vedlagte dokumenter.

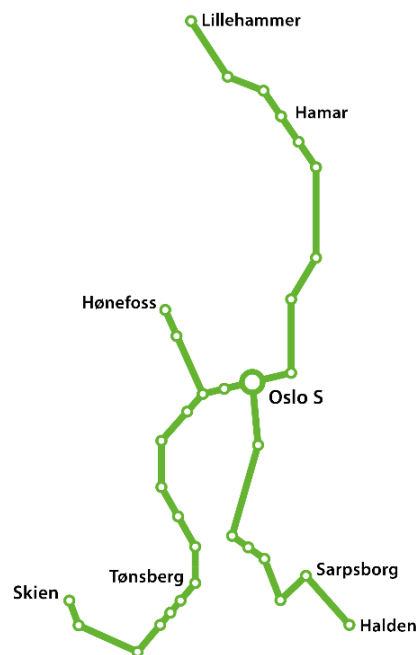
1.1 Bakgrunn

Ifølge Statistisk Sentralbyrå (2016) forventes det at folketallet i Norge passerer 6 millioner like etter 2030. Det forventes at befolkningsveksten i årene framover først og fremst kommer i sentrale strøk. SSBs hovedalternativ for befolkningsframskrivninger fram til 2100 sier at Oslos innbyggertall vil passere 700 000 i løpet av de neste 10 årene. I tillegg forventes en kraftig befolkningsvekst i mange av kommunene i nærheten av Oslo.

På bakgrunn av den forventede befolkningsutviklingen skal jernbanenettet på Østlandet videreutvikles for å møte det framtidige transportbehovet og for å simulere til mer bærekraftig transport. For å håndtere befolkningsøkningen planlegges det ifølge Bane NOR (2015) for flere og lengre tog på Østlandet som en del av InterCity-utbyggingen. Med full utbygging av InterCity forventes det 17,8 millioner årlig reisende, en økning på over 100 % fra dagens 8,8 millioner årlig reisende ifølge Samferdselsdepartementet (2016-2017). Et kart over InterCity-utbyggingen er presentert i figur 1.

For å håndtere den kraftige økningen i togparken på Østlandet som følge av InterCity-prosjektet, vil det ifølge Bane NOR (2015) bli nødvendig med mer hensettingskapasitet, i tillegg til økt verkstedskapasitet for togvedlikehold. Utredningen *Hensetting Østlandet delrapport 3* fra 2015 skulle finne svar på hvor stort det framtidige hensettingsbehovet på Østlandet vil bli, og hvordan den økte etterspørselen kan løses.

I utredningen kan man lese følgende vurdering av det framtidige hensettingsbehovet: «*Delrapport 1 konkluderte med at dagens hensettingskapasitet er omlag 150 plasser, og at kapasiteten ved dagens anlegg er tilnærmet fullt*



Figur 1: InterCity-utbyggingen. Hentet fra Bane NOR Prosjekter: InterCity

utnyttet. Det ble estimert at det i 2040 og etter 2040 vil være behov for 300 til 500 hensettingsplasser. Det ble også identifisert et mer akutt behov for hensettingsplasser på kort sikt, innen 2023, i størrelsesorden 50-70 nye plasser som kommer som følge av Follobanen og IC-utbyggingen til Hamar, Fredrikstad og Tønsberg». (Jernbaneverket et al., 2015a).

Et gjennomgående trekk fra utredningens delrapport 3 er at flere av arealene som vurderes for hensetting ligger utenfor sentrumsområdene. Det er stor konkurranse om arealer i byene, og det er ofte vanskelig å finne store nok arealer. Det vurderes derfor å plassere flere store hensettingsanlegg langs dobbeltsporene på Østlandet. Dimensjonerende hastighet for InterCity er 250 km/t, dermed må innflettingen av tog fra hensetting skje under store hastigheter.

Et viktig utgangspunkt for oppgaven er tabell 6 fra *Hensetting Østlandet delrapport 3*. Tabellen viser anbefalte påkoblingsløsninger ved ulike kapasitetsutnyttelser og størrelser på hensettingsanlegg. Tabellen er her gjengitt i sin helhet.

Tabell 1: Anbefalte påkoblingsløsninger (Jernbaneverket et al., 2015a)

Strekningens kapasitetsutnyttelse	Høy (ca. 60 – 80 %)	Middels (ca. 40-60 %)	Lav (< 40 %)
Størrelse på hensettingsanlegg			
Stort (> 30 plasser)	Planskilt løsning i begge ender	Planskilt løsning, helst i begge ender	Kryss i plan i begge ender
Middels (15-30 plasser)	Planskilt løsning, evt. i begge ender må vurderes nærmere i hvert tilfelle.	Planskilt løsning, evt. i begge ender må vurderes nærmere i hvert tilfelle.	Kryss i plan evt. i begge ender.
Lite (< 15 plasser)	Planskilt løsning	Kryss i plan med evt. ventespør. Evt. planskilt, må vurderes nærmere i hvert tilfelle.	Kryss i plan

En hensettingsplass i Norge er 110 m, det skyldes at en hensettingsplass er tilpasset et enkelsett av typen *FLIRT* som er 106 m. For å hensette et dobbeltsett vil man derfor trenge to hensettingsplasser. Et hensettingsanlegg med 30 plasser har derfor plass til 15 dobbeltsett eller 30 enkelsett. I tabellen klassifiseres et hensettingsanlegg som stort dersom det har mer enn 30 plasser. I utredningen vurderes hensettingsanlegg i størrelsesordenen fra 12 til 95 hensettingsplasser.

For linjer med blandet trafikk anbefaler International Union of Railways (2013) en døgnkapasitet på 60 % og en timekapasitet i rushtiden på 75 % av den teoretiske kapasiteten. De anbefalte utnyttelsesgradene bør ikke overstiges om punktligheten på strekningen skal overholdes. I tabell 1 tilsvarer de anbefalte utnyttelsesgradene på 60 og 75 % høy kapasitetsutnyttelse. Ved høy kapasitetsutnyttelse er systemet nært mettet, og det antas å være krevende

å finne store nok tidsluker til at tog fra hensetting kan kjøre inn på dobbeltsporet uten å hindre den øvrige trafikken.

Ifølge Jernbaneløstet et al. (2015a) presenterer tabell 1 mulige løsninger, og verdiene er kun ment som forslag, og ikke definitive verdier. Tabellen ble laget av Anne Christine Torp Handstanger, som på et veiledningsmøte fortalte at tabellen er basert på tommelfingerregler og hennes antagelser, og at den presenterer en grov inndeling i mulige løsninger.

I denne oppgaven brukes det tyske kapasitetsverktøyet LUKS til kapasitetsanalyser der infrastrukturmodeller konstrueres og ruteplaner bygges, før togtettheten økes gradvis for å kunne analysere om infrastrukturen takler situasjonen. Målet er at analysene i LUKS skal gi mer nøyaktige svar på når de ulike løsningene vil være nødvendige, og dermed gi en mer presis inndeling enn den som presenteres i tabell 1. For ytterpunktene er inndelingen sannsynligvis korrekt, det viktigste vil være å undersøke de anleggene som er grensetilfeller, da særlig de middels store anleggene og anleggene ved middels kapasitetsutnyttelse.

Det er ønskelig at oppgaven skal gi svar på hvor lenge man kan klare seg med kryss i plan med ventespør uten at det gir for lang ventetid for trafikken fra hensetting. Oppgaven skal også gi svar på når det må bygges planskilt påkobling for å oppnå ønsket kapasitet. Denne informasjonen er relevant for arealsøk og kostnadsberegninger for nye hensettingsanlegg. Per i dag har man ikke slike hensettingsanlegg i Norge, det finnes derfor begrenset med studier som analyserer denne problemstillingen.

1.2 Formål og problemstilling

Oppgavens formål er å analysere bruken av kryss i plan med ventespør for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspør på InterCity fra et kapasitetsperspektiv.

Basert på oppgavens formål er følgende problemstilling definert:

Hvordan vil påkoblingsløsningen med kryss i plan med ventespør fungere i praksis på en InterCity-strekning for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspør?

For å løse problemstillingen skal følgende forskningsspørsmål besvares:

1. For hvilke kapasitetsutnyttelser kan man bruke kryss i plan med ventespør som påkobling for tog fra hensetting, uten at ventetiden på ventesporet blir for lang?

2. Ved hvilke kapasitetsutnyttelser på dobbeltspor, og antall tog per time fra hensetting, trengs planskilt påkobling for å oppnå ønsket kapasitet?
3. Hvilke parametere har størst betydning for ventetiden på ventesporet for påkoblingsløsningen kryss i plan?

Målsetningen for oppgaven er å gi en mer nøyaktig inndeling i hvilke løsninger som vil være nødvendige for ulike kombinasjoner av strekningers kapasitetsutnyttelse og størrelsen på hensettingsanlegg enn de eksisterende inndelingene.

Oppgaven skal besvares ved hjelp av ruteplan- og kapasitetsanalyser i analyseverktøyet LUKS. Analysene skal utføres både for forhåndsdefinerte analysescenarier der ulike parametere studeres og for en casestudie av hensettingsarealer med kryss i plan som ble vurdert i utredningen *Hensetting Østlandet*.

1.3 Avgrensninger

I denne oppgaven studeres bare situasjoner der persontog fra hensetting flettes med trafikken på et dobbeltspor. Dermed utelukkes situasjoner der godstog kjører fra hensettingsanlegg og flettes med trafikken på dobbeltspor. Godstog er tyngre enn persontog og har dårligere akselerasjon. De vil derfor trenge større tidsluker for å kunne kjøre inn på dobbeltsporet. Det vanskeliggjør fletteprosessen ytterligere. Utredningen *Hensetting Østlandet delrapport 3*, som er et viktig utgangspunkt for denne oppgaven, har som hensikt å se på hensettingsbehovet for persontog på Østlandet i perioden mot 2023 og fremover. Utredningen ser ikke på hensetting av godstog. Da problemstillingen for denne oppgaven i stor grad er basert på informasjon fra utredningen, ble det besluttet å kun se på hensettingsanlegg for persontog i denne oppgaven også.

Oppgaven vurderer kun hensettingsarealer ved dobbeltspor da InterCity-nettet skal bestå av dobbeltspor innen 2034 ifølge Samferdselsdepartementet (2016-2017). Det gjør at noen av arealene som ble vurdert i utredningen *Hensetting Østlandet* utelukkes fordi de ligger ved enkeltsporede strekninger som ikke er en del av InterCity.

Det er verdt å merke seg at det er knyttet usikkerheter til informasjonen som er hentet fra utredningen *Hensetting Østlandet*. Det kan ha skjedd endringer siden utredningen ble publisert i 2015 og det kan skje endringer i tiden fremover. Det er fortsatt knyttet usikkerheter til både type påkobling, hastigheter, antall hensettingsplasser, arealvalg og framtidig togtilbud.

Eventuelle endringer i togtilbudet kan medføre at enkelte anlegg må utvides for å kunne gi flere hensettingsplasser. Det kan igjen føre til at noen av arealene som vurderes i dag ikke lenger er aktuelle i framtiden på grunn av størrelsesbegrensninger. Det kan også hende at man finner nye aktuelle arealer på et senere tidspunkt.

1.4 Rapportens oppbygning

I det følgende kapittelet, kapittel 2, presenteres en gjennomgang av relevant litteratur for oppgaven. Litteraturgjennomgangen presenterer og formidler hovedtrekkene fra kunnskapen som finnes innenfor feltene kapasitet og hensetting. Deretter presenteres metodene som er brukt for å svare på problemstillingen i kapittel 3.

Kapittel 4 beskriver og dokumenterer prosessen med modellering i LUKS. Her grunngis også valg som er tatt i forbindelse med infrastrukturmodellen og dens elementer. I kapittel 5 presenteres resultatene fra de forhåndsdefinerte analysescenarioene og fra casestudiet. Resultatene fra analysene diskuteres mot eksisterende litteratur i kapittel 6. Her drøftes også valg tatt i forbindelse med analysene, samt feilkilder, styrker og svakheter knyttet til resultatene. I kapittel 7 presenteres oppgavens konklusjoner i tillegg til forslag til videre arbeid.

Følgende dokumenter er vedlagt til oppgaven:

Vedlegg 1: Oppgavetekst

Vedlegg 2: Beregning av blokk lengder

Vedlegg 3: Beregning av midlere minste togfølgetid vha. ruteplanuavhengig metode

Vedlegg 4: Ruteplaner benyttet i analysene

Vedlegg 5: Nøkkeltall for analysene

2. LITTERATURGJENNOMGANG

I dette kapitlet presenteres teori som er benyttet i arbeidet med masteroppgaven. Litteraturgjennomgangen er delt i fem delkapitler; kapasitet for jernbanelinjer, minste togfølgetid, togseparasjon ved bruk av blokkstrekninger, ruteplan og takting, og hensetting. Litteraturgjennomgangen bygger videre på litteraturen som ble presentert i prosjektoppgaven skrevet av undertegnende høsten 2017; *Analyse av kryss i plan for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor* (Bøe, 2017).

2.1 Kapasitet for jernbanelinjer

Definisjon av kapasitet

Burdett and Kozan (2006) definerer kapasitet som det maksimale antallet tog som kan kjøre på en hel jernbanestrekning eller spesifikke kritiske deler av en strekning (flaskehals) i løpet av et gitt tidsrom. Sangphong et al. (2017) definerer kapasiteten på en jernbanestrekning som det totale antall tog som passerer et punkt i løpet av rushtimen. Begrenset kapasitet tyder på en svak link eller en flaskehals i systemet som kan vedvare over en viss strekning.

International Union of Railways (2004) sier at kapasitet i seg selv ikke eksisterer, men at kapasiteten for jernbaneinfrastruktur avhenger av måten infrastrukturen utnyttes. UIC skriver at de grunnleggende parameterne som underbygger kapasiteten er infrastrukturens egenskaper, disse inkluderer signalsystemet, ruteplanen og det fastsatte punktlighetsnivået.

Pachl (2015) definerer kapasiteten på en strekning som det maksimale antallet tog som kan driftes på en del av infrastrukturen, det kan være på en strekning, en terminal eller på et hensettingsanlegg, under gitte driftsbetingelser.

Som de forrige avsnittene viser finnes det flere definisjoner av kapasitet for jernbanestrekninger. En gjenganger for flere av definisjonene er imidlertid at kapasiteten avhenger av infrastrukturen og ruteplanen, Landex (2008) stadfester at kapasiteten også avhenger av det rullende materiellet som ferdes på nettverket

I denne oppgaven tas det utgangspunkt i definisjonene gitt av Pachl, Burdett og Kozan, og Sangphong et al. Kapasitet defineres videre i denne oppgaven som antall tog som kan trafikkere en strekning i en retning i løpet av et tidsintervall på en time.

Innen kapasitet skilles det mellom teoretisk og praktisk kapasitet, disse begrepene forklares nærmerer i de følgende avsnittene.

Teoretisk kapasitet

Ifølge Abril et al. (2008) er teoretisk kapasitet det maksimale antallet tog som kan kjøre en rute, i løpet av et spesifikt tidsintervall, i et strengt perfekt matematisk generert miljø, der togene kjører etter hverandre ved minste togfølgetid. Den teoretiske kapasiteten angir en øvre grense for en streknings kapasitet. Skartsæterhagen (1993) forklarer teoretisk kapasitet ved at togene kjøres så tett som signalssystemet tillater, men likevel slik at togene kan kjøre med full hastighet. Ved teoretisk kapasitet inkluderer man ingen marginer som kan fange opp forsinkelser, det medfører at enhver forsinkelse vil forplante seg til andre tog.

Teoretisk kapasitet forutsetter at trafikken er homogen, at alle tog er identiske, og at togtrafikken fordeles jevnt utover dagen uten forstyrrelser, ifølge Abril et al. (2008). Dermed ignoreres effekten av trafikkvariasjoner. En slik situasjon kan ikke eksistere i virkeligheten.

Den teoretiske kapasiteten kan beregnes etter formel 1:

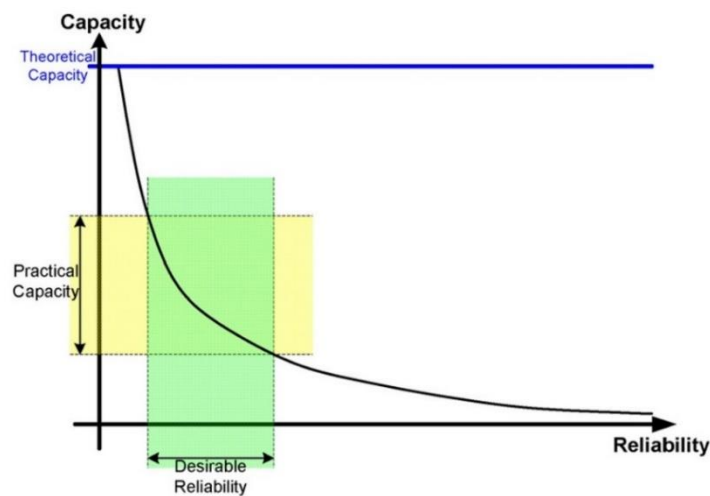
$$K_{teo} = \frac{T}{t_{s,min}} \quad \text{Formel 1}$$

Der T er det aktuelle tidsintervallet, som regel en time, og $t_{s,min}$ er minste togfølgetid. Minste togfølgetid defineres senere i dette kapitlet.

Praktisk kapasitet

Abril et al. (2008) definerer praktisk kapasitet som den praktiske grensen for det representative trafikkvolumet som kan kjøre på en strekning ved et akseptabelt punktlighetsnivå. Det representative trafikkvolumet sikter til den faktiske togmiksen, prioriterte tog, variasjoner over døgnet, opphopning av trafikk etc. Ifølge Skartsæterhagen (1993) må det være mindre enn et visst maksimum av forsinkelser for at man skal kunne si at man opererer innenfor en gitt kapasitet. Om forsinkelsene ofte er uakseptabelt store, tyder det på at strekningens praktiske kapasitet er overskredet. Abril et al. (2008) skriver at om den teoretiske kapasiteten representerer den øvre teoretiske grensen for kapasitet, kan den praktiske kapasiteten sies å

være et mer realistisk mål for kapasiteten. Figur 2 illustrerer sammenhengen mellom kapasitet og pålitelighet. Den praktiske kapasiteten eksisterer ved et ønsket pålitelighetsnivå.



Figur 2: Sammenhengen mellom kapasitet og pålitelighet. Fra Abril et al. (2008)

For å sørge for punktlig togframføring, benyttes ulike utnyttelsesgrader av den teoretiske kapasiteten. International Union of Railways (2013) har utarbeidet anbefalte utnyttelsesgrader av den teoretiske kapasiteten avhengig av trafikksammensetningen på den aktuelle jernbanelinjen og avhengig av om det er i rushtiden eller over døgnet. De anbefalte utnyttelsesgradene er vist i tabell 2:

Tabell 2: Utnyttelsesgrader av teoretisk kapasitet. Fra UIC (2013)

Trafikksammensetning	Timekapasitet i rushtiden	Døgnkapasitet
Lukkede systemer (f.eks. t-baner)	85 %	70 %
Høyhastighetslinjer	75 %	60 %
Linjer med blandet trafikk	75 %	60 %

For å finne den praktiske kapasiteten, K , multipliseres den teoretiske kapasiteten med utnyttelsesgraden U som vist i formel 2:

$$K = K_{teo} * U \quad \text{Formel 2}$$

Jernbanelinjene som analyseres i denne oppgaven har blandet trafikk. Fra tabell 2 kan man lese at International Union of Railways (2013) anbefaler en døgnkapasitet på 60 % og en timekapasitet i rushtiden på 75 % av den teoretiske kapasiteten for linjer med blandet trafikk.

Utnyttet og tilgjengelig kapasitet

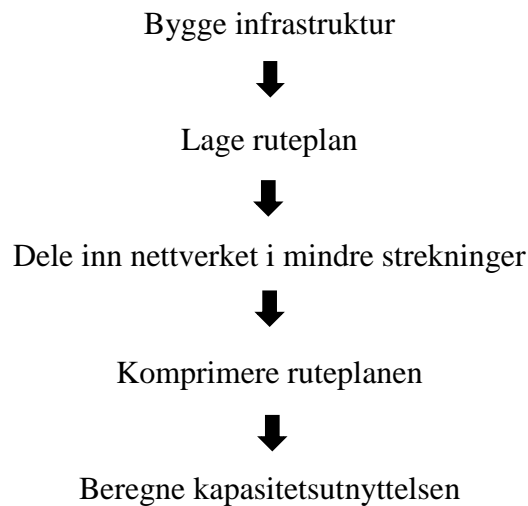
I tillegg til teoretisk og praktisk kapasitet, kan kapasitet også deles inn i utnyttet og tilgjengelig kapasitet. Ifølge Abril et al. (2008) utgjør den utnyttede kapasiteten det faktiske trafikkvolumet på nettverket. Den utnyttede kapasiteten er vanligvis lavere enn den praktiske kapasiteten og representerer den faktiske trafikken og driften på strekningen. Den tilgjengelige kapasiteten er differansen mellom utnyttet kapasitet og praktisk kapasitet. Den tilgjengelige kapasiteten indikerer hvor mye tilleggstrafikk strekningen kan takle.

Om et hensettingsanlegg oppføres ved en strekning, vil tomtog fra hensetting måtte bruke av den tilgjengelige kapasiteten på strekningen. Det forutsetter at den tilgjengelige kapasiteten er stor nok til at trafikken til og fra hensettingsanlegget også kan kjøre på strekningen. Utnyttet kapasitet og tilgjengelig kapasitet kan finnes ved å komprimere ruteplanen etter komprimeringsmetoden beskrevet av International Union of Railways (2013). Komprimeringsmetoden er en generalisert metode for å beregne kapasitetsutnyttelse delstrekning for delstrekning.

Komprimeringsmetoden beskrevet i UIC 406

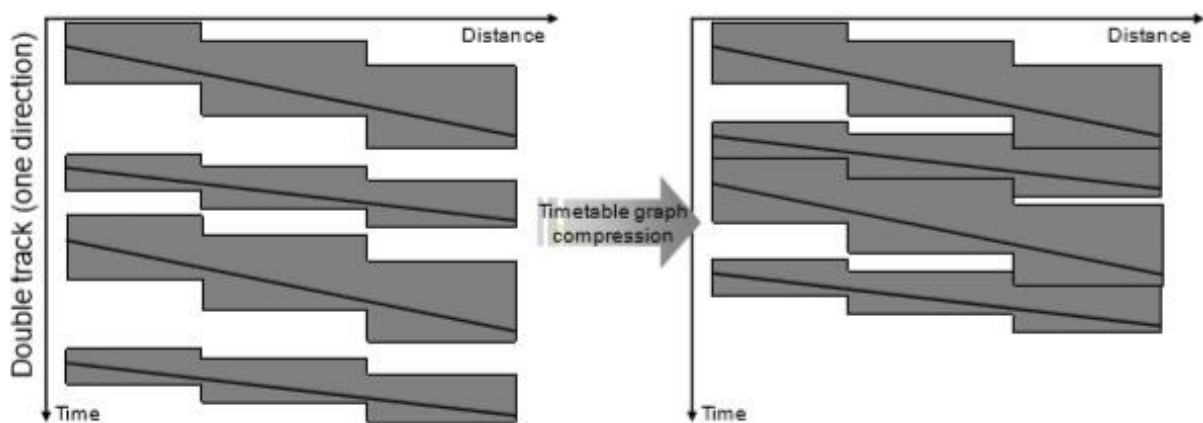
Kapasitetsutnyttelsen for en jernbanestrekning avhenger av både infrastrukturen og ruteplanen. Derfor er kapasitetsberegningene etter metoden beskrevet av UIC 406 basert på en faktisk ruteplan ifølge Landex et al. (2006). Det må foreligge en bestemt infrastruktur og en bestemt ruteplan for at komprimeringsmetoden skal kunne benyttes. For å redusere kompleksiteten ved bruk av komprimeringsmetoden beskriver Landex (2008) at nettverket som skal analyseres må deles inn i mindre delstrekninger som er lettere å analysere. Det er ifølge International Union of Railways (2013) vanlig praksis å dele inn strekningen ved kryss, stasjoner med forbikjøringsmulighet, endestasjoner, overganger mellom enkelt- og dobbeltspor og ved krysningsspor. Når nettverket er inndelt i mindre delstrekninger, kan ruteplanen komprimeres og kapasitetsutnyttelsen beregnes.

Framgangsmåten for komprimeringsmetoden beskrevet i UIC 406 er illustrert i figur 3. Denne framgangsmåten benyttes også for kapasitetsanalysene i denne masteroppgaven.



Figur 3: Flytdiagram for komprimeringsmetoden. Basert på Landex (2008)

Komprimeringsmetoden måler utnyttet kapasitet ved å komprimere ruteplanen slik at buffertidene blir lik null, beskriver Landex et al. (2008). Dette illustreres i figur 4 som er hentet fra Landex (2008). Buffertider brukes for å kompensere for små forsinkelser og representerer den tiden infrastrukturen ikke er okkupert av tog. Buffertid forklares nærmere senere i dette kapitlet. Når ruteplanen komprimeres, reduseres togfølgetidene til det minste tillate. Kapasitetsutnyttelsen kan deretter beregnes ved å finne forholdet mellom den utnyttede tiden og den totale tidsperioden som betraktes ifølge Jensen et al. (2017).



Figur 4: Illustrasjon av komprimeringsmetoden. Hentet fra Landex (2008)

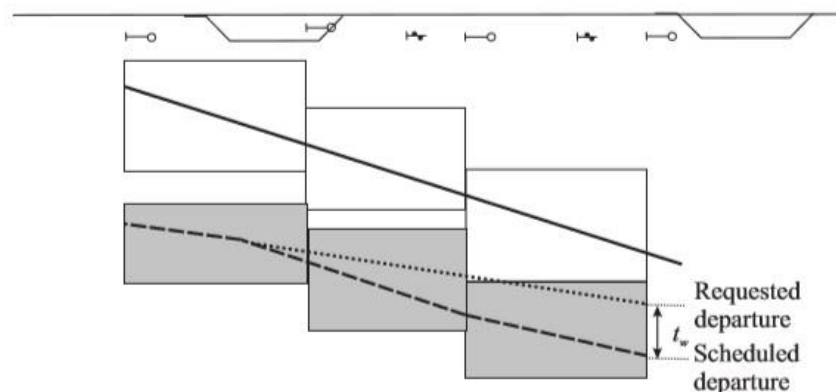
Som figur 4 illustrerer skyves blokktrappene så tett sammen som mulig for å finne den utnyttede kapasiteten. Den komprimerte ruteplanen har ikke rom for buffertider. Hvor tett det er mulig å skyve blokktrappene sammen avhenger av togmiksen på den aktuelle delstrekningen.

Kapasitet og ventetid

Innen jernbane skilles det mellom planlagt og uplanlagt ventetid. Den planlagte ventetiden skyldes måten ruteplanen er oppsatt på. Planlagt ventetid oppstår når planlagte forbikjøringer og passeringer utføres. Uplanlagt ventetid oppstår derimot som en konsekvens av forsinkelser i togdriften skriver Pachl (2015). Heretter kalles uplanlagt ventetid forsinkelser. Ifølge Handstanger (2009) er både planlagt ventetid og forsinkelser parametere som kan brukes som et mål på kvaliteten for den aktuelle linjen. Dermed kan planlagt ventetid og forsinkelser brukes til å sammenligne kvaliteten til den aktuelle linjen med kvaliteten til andre linjer.

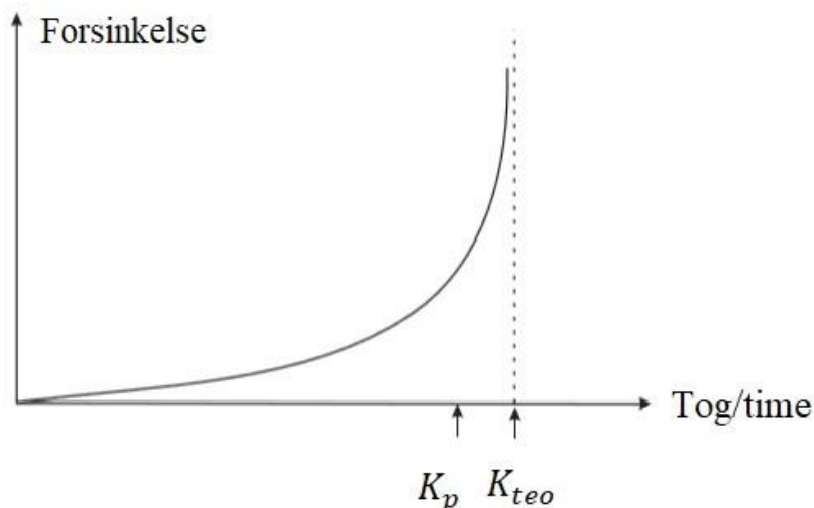
Ifølge Pachl (2015) er ventetidene i ruteplanen alltid høyere enn ventetidene i drift, og ruteplanens kapasitet er alltid lavere enn den maksimale kapasiteten. Årsaken er at om forsinkelser oppstår i drift, kan saktegående tog bli tatt igjen av raskere tog. Det vil føre til en utjevning i hastighet ved at det raske toget må redusere sin hastighet for å tilpasse seg det saktegående toget.

Figur 5 hentet fra Handstanger (2009) illustrerer situasjonen som oppstår når et tog med lavere prioritet tar igjen et tog med høyere prioritet. Toget med lavest prioritet (i grått) må kjøre saktere for å tilpasse seg toget med høyest prioritet (i hvitt). Tilleggstiden som oppstår som følge av at toget med lavest prioritet må slakke ned, fører til økt planlagt ventetid.



Figur 5: Tog med lavere prioritet får lengre kjøretid. Fra Handstanger (2009)

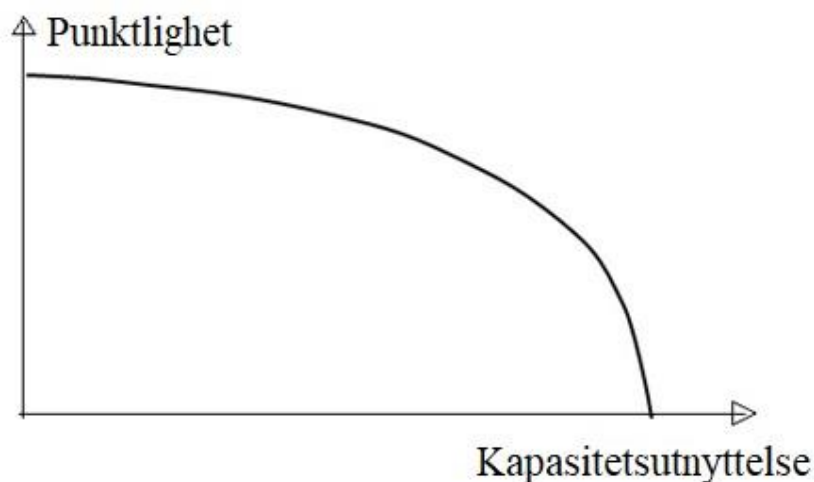
Schwanhäußer (1974) var den første til å definere forsinkelser som eksponentialfordelte. Når trafikklasten på en strekning øker, øker forsinkelsene eksponentielt som respons. Når den utnyttede kapasiteten nærmer seg den teoretiske kapasiteten, går forsinkelsene mot uendelig. Det er derfor ugunstig å utnytte systemet over den praktiske kapasiteten. Sammenhengen mellom kapasitet og forsinkelse er illustrert i figur 6. Figuren er basert på Handstanger (2009). I figuren er den gjennomsnittlige forsinkelsen per tog vist som en funksjon av togtettheten.



Figur 6: Sammenhengen mellom kapasitet og forsinkelse. Basert på Handstanger (2009)

Schwanhäuser har også sett på sammenhengen mellom økonomi og kapasitetsutnyttelse. Handstanger (2009) skriver at ideelt sett bør den praktiske kapasiteten settes til punktet der lønnsomheten er høyest. Om systemet utnyttes over den optimale kapasiteten, vil togoperatøren risikere å tape penger grunnet økte forsinkelser og færre passasjerer. Dermed vil økte forsinkelser føre til økte kostnader.

Sammenhengen mellom kapasitet og forsinkelse er tett knyttet til sammenhengen mellom punktlighet og kapasitet. Ved økende forsinkelser, reduseres punktligheten for strekningen. For å kunne oppnå høy punktlighet i et nettverk, må kapasitetsutnyttelsen være relativt lav. Dette skyldes at buffertidene reduseres når kapasitetsutnyttelsen øker, dermed øker risikoen for forsinkelsespropagering ifølge Landex (2008). Figur 7 viser sammenhengen mellom punktlighet og kapasitetsutnyttelse. Figuren er basert på Kaas (2000).



Figur 7: Sammenhengen mellom punktlighet og kapasitetsutnyttelse. Basert på Kaas (2000)

Selv om det kan være mulig å kjøre flere tog og fortsatt oppnå punktlighetsmålet, er det ikke nødvendigvis ønskelig fra togoperatørens perspektiv å kjøre flere tog på strekningen. Ifølge Landex (2008) skyldes dette at ikke alle togruter er attraktive. Om en ledig togrute for et passasjertog enten er for saktegående eller går umiddelbart etter et annet passasjertog med samme stoppmønster eller destinasjon, er det ikke nødvendigvis lønnsomt å kjøre det ekstra toget selv om ruteplanen har plass til det.

Punktlighetsmålene som gjelder i Norge er definert av Bane NOR og lyder som følger: «*Et tog regnes som i rute dersom det ankommer endestasjonen innenfor en margin på tre minutter og 59 sekunder. For langdistansetog er denne marginen fem minutter og 59 sekunder. Målsettingen for persontog er at 90 % av togene skal nå endestasjonen i rute, mens målet for Flytoget er 95 %.*» (Bane NOR, 2017a).

Ifølge Pouryousef et al. (2015) er forsinkelser ofte brukt som hovedkriteriet for om togframføringen er tilstrekkelig eller ikke for kapasitetsanalyser i USA. USAs *Federal Railroad Administration* introduserte i 1975 begrepet forsinkelsesenheter i timer per 100 kjørte miles som beslutningskriterier for kapasitet. Europeiske jernbaneoperatører bruker typisk antall tog per tidsenhet for å måle kapasitetsnivået. Punktlighet og ressursutnyttelse kan i tillegg brukes som sekundære mål på kapasitet i Europa. Bruken av forsinkelser som beslutningskriterier i Europa begrenses som regel til hendelser som ikke er forutsigbare, det som i Europa kalles uplanlagt ventetid.

White (2006) argumenterer for at forsinkelser er et utilstrekkelig mål for kapasitet. Ifølge White er det ingen direkte sammenheng mellom forsinkelser, kapasitet og effektivitet. Sammenhengen mellom forsinkelse og effektiv drift er ifølge White ikke en pålitelig indikator for kapasitet. White anbefaler heller bruk av tid som mål på kapasitet, da tid er en viktig komponent av kapasiteten siden et hvert segment av en jernbanelinje bare kan allokere til et tog om gangen.

I denne oppgaven brukes komprimeringsmetoden, som er basert på minste togfølgetider, som primærmål for kapasitet. Dermed unngås bruken av forsinkelse som White advarer mot, da minste togfølgetid er en tidsenhet.

2.2 Minste togfølgetid

Spönemann og Wendler (2010) definerer minste togfølgetid som tiden tog j minst må vente før det kan kjøre inn på en delstrekning som er okkupert av et annet tog i . Skartsæterhagen (1993) definerer minste togfølgetid for to tog som den minste tidsavstanden der det andre toget kan kjøre uhindret av det første.

Minste togfølgetid kan ifølge Skartsæterhagen (1993) beregnes etter følgende formel:

$$t_{s,min} = \frac{(2b + I_{tog})}{v} + t_{sikt} \quad \text{Formel 3}$$

I formelen er b er bremselengden, I_{tog} er tog lengden, v er hastigheten og t_{sikt} er siktavstanden. Formelen er en forenkling av virkeligheten, i tillegg til elementene i formel 3 har man også tid til blant annet å klargjøre ruten og tid til å frigjøre ruten etterpå. Alle elementene som inngår i minste togfølgetid gjennomgås nærmere i avsnittet om okkupasjonstid for blokkstrekninger.

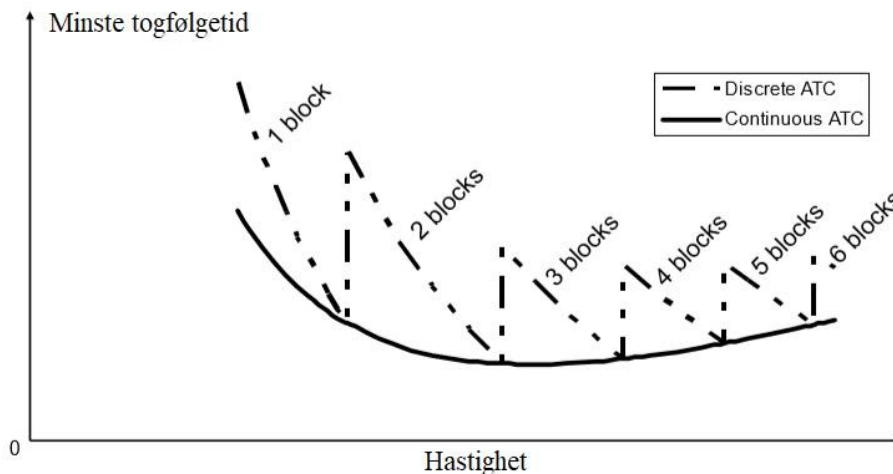
Bremselengden er lik blokk lengden, men i praksis vil et tillegg som enten er konstant eller hastighetsavhengig også tas med. Bremselengden kan beregnes etter følgende formel:

$$b = \frac{v^2}{2r} + s \quad \text{Formel 4}$$

Der r er togets retardasjon og s er det konstante eller hastighetsavhengige tillegget.

Når et tog øker hastigheten, vil toget okkupere en gitt strekning over et kortere tidsintervall. Dette gir imidlertid ikke høyere kapasitet siden økt hastighet også gir økt bremselengde. Dermed fører økt hastighet også til økt minste togfølgetid, og kapasiteten reduseres (Landex, 2008). Dette kan man også se fra formel 3 og 4.

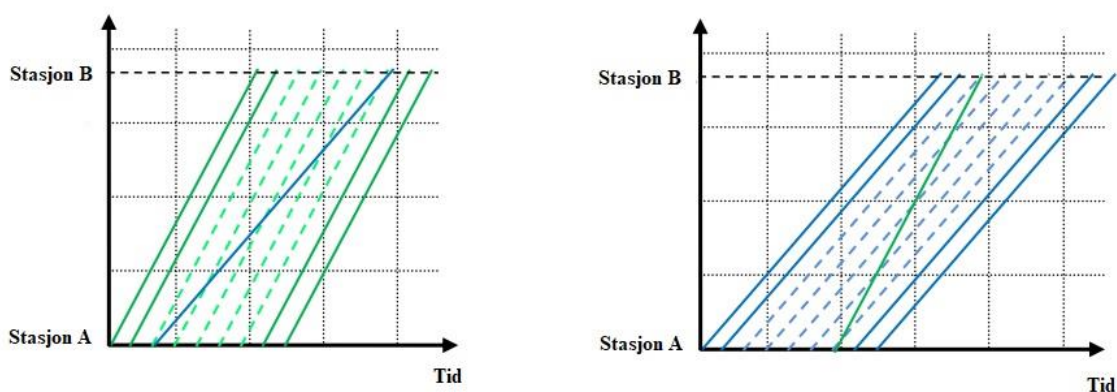
Sammenhengen mellom minste togfølgetid og hastighet for kontinuerlig og diskret ATC (*Automatic Train Control*) er framstilt i figur 8 som er hentet fra Landex (2008). For diskrete signalsystemer er hastigheten av enda større betydning enn for kontinuerlige signalsystemer. I et diskret system får lokføreren bare oppdateringer om kjøretillatelse ved signaler eller ved baliser. I et kontinuerlig signalsystem får lokføreren derimot kontinuerlig oppdateringer om kjøretillatelse ifølge Landex (2008).



Figur 8: Minste togfølgetid og hastighet. Basert på Landex (2008)

Minste togfølgetid for blandet trafikk

Blandet trafikk vil redusere kapasiteten på en jernbanelinje på grunn av at ruteleier da elimineres av hastighetsforskjellene mellom saktegående og hurtiggående tog. Dette illustreres i figur 9, som er hentet fra Pawar (2011). Til venstre i figuren ser man hvordan et saktegående tog (blå linje) tar opp ruteleier fra de hurtiggående togene (grønne linjer). Tilsvarende vil et hurtiggående tog ta opp ruteleier fra de saktegående togene til høyre i figuren. For linjer med ensartet trafikk kan kapasitetsutnyttelsen bli vesentlig høyere.



Figur 9: Blandet trafikk reduserer kapasiteten på en jernbanelinje. Fra Pawar (2011)

Minste togfølgetid kan bare beregnes for et par av etterfølgende tog. For linjer med blandet trafikk må derfor midlere minste togfølgetid \bar{t}_{ij} beregnes beskriver Spönemann og Wendler (2010)

Midlere minste togfølgetid kan beregnes på tre ulike måter: ved bruk av ruteplanavhengig metode, ved bruk av ruteplanuavhengig metode eller med hensyn på variasjoner i trafikkvolum. Da en eksakt ruteplan ikke foreligger i denne oppgaven, brukes den ruteplanuavhengige metoden.

Midlere minste togfølgetid ved ruteplanuavhengig metode

For å beregne midlere minste togfølgetid uavhengig av ruteplan, må sannsynligheten for at tog i etterfølges av tog j beregnes etter formel 5 fra Spönemann og Wendler (2010).

$$p_{ij} = \frac{n_i}{N} * \frac{n_j}{N} = \frac{n_i * n_j}{N^2} \quad \text{Formel 5}$$

I formel 5 er n_i antallet tog av typen i , mens n_j er antallet tog av typen j . N er det totale antallet tog på strekningen i løpet av det aktuelle tidsintervallet.

For å oppnå midlere minste togfølgetid summeres alle produktene av sannsynligheten p_{ij} og tilhørende minste togfølgetid t_{ij} som vist i formel 6:

$$\bar{t}_{ij} = \sum p_{ij} * t_{ij} \quad \text{Formel 6}$$

Når midlere minste togfølgetid er kjent, kan den teoretiske kapasiteten for strekningen beregnes ved å dividere tidsintervallet T på midlere minste togfølgetid etter formel 7:

$$K_{teo} = \frac{T}{\bar{t}_{ij}} \quad \text{Formel 7}$$

Buffertid

Ifølge Pachl (2015) må den planlagte følgetiden mellom to tog bestå av minste togfølgetid i tillegg til buffertid. Buffertiden skal kompensere for små forsinkelser. Størrelsen på buffertiden avhenger av ønsket trafikkvalitet på strekningen. Landex et al. (2008) beskriver at i løpet av buffertiden er infrastrukturen fri for togtrafikk.

Ifølge Jensen et al. (2017) kan buffertiden deles inn i kritisk buffertid og tilleggsbuffertid. Jensen beskriver den kritiske buffertiden som slakk som planleggerne har vurdert som nødvendig for å redusere risikoen for forsinkelsespropagering. Tilleggsbuffertiden er derimot en konsekvens

av andre ruteplanavgjørelser som blant annet synkronisering ved større stasjoner, heterogenitet i togenes kjøretider, begrensninger i andre deler av nettverket, eller tilleggskapasitet. Om forsinkelsene for et tog er større enn den totale buffertiden som er tilgjengelig for neste tog, vil forsinkelsene propagere til neste tog, ifølge Jensen et al. (2017).

Ifølge Pachl (2015) bestemmes vanligvis buffertiden avhengig av togrekkefølgen. De fleste jernbanelinjer baserer buffertiden på følgende grunnleggende regler:

- Større buffertid når det andre toget har høyere prioritet enn det første toget
- Lavere buffertid når det første toget har høyere prioritet enn det andre toget
- Middels buffertid når begge togene har samme prioritet

Landex (2008) påpeker at å redusere buffertiden vil føre til en lavere kapasitetsutnyttelse, men samtidig gir buffertiden økt ruteplanstabilitet. Derfor kaller Landex buffertiden en kvalitetsfaktor for togframføringen. International Union of Railways (2004) sier at buffertider skal legges til enten mellom hvert enkelt tog i ruteplanen eller den kan legges til globalt, forutsatt at den totale buffertiden er tilstrekkelig.

2.3 Togseparasjon ved bruk av blokkstrekninger

Prinsipper for sikker togseparasjon

I et stål-mot-stål-system slik som jernbanesystemet er det nødvendig med et togseparasjonssystem som ikke baserer seg på siktlengder. Adhesjonskoeffisienten for jernbanetraffikk er i gjennomsnitt åtte ganger lavere enn for vegtrafikk, noe som også medfører at den overførte bremskraften er åtte ganger lavere. Dermed vil bremselengden for rullende materiell overgå siktlengden med god margin ifølge Hansen og Pachl (2014).

Ifølge Pachl (2015) kan togseparasjon gjøres ved tre grunnleggende teoretiske prinsipper: togseparasjon ved relativ bremselengde, togseparasjon ved absolutt bremselengde og togseparasjon ved faste blokk lengder. I denne oppgaven brukes prinsippet med faste blokk lengder. Dette prinsippet er også det vanligste prinsippet for togseparasjon globalt i dag. Prinsippet forklares nærmere i de følgende avsnittene.

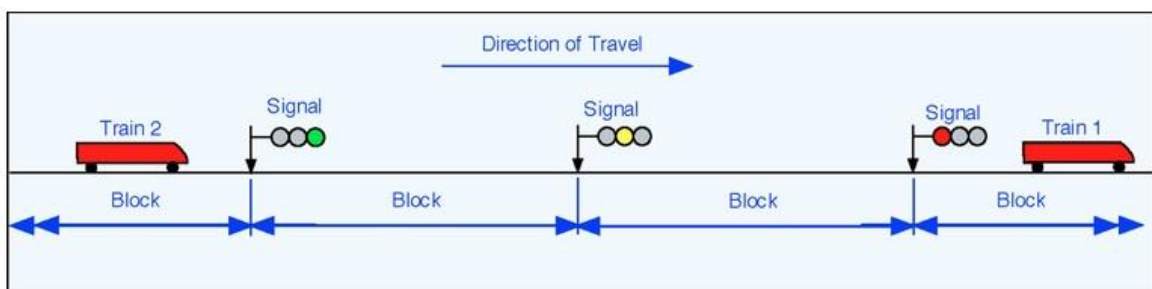
Blokkstrekninger

Ifølge Handstanger (2009) er en blokkstrekning avstanden mellom to hovedsignaler på en jernbanestrekning. Blokkstrekningen utgjør den minste avstanden på en jernbanelinje og kan bare okkuperes av et tog om gangen.

Ifølge Hansen og Pachl (2014) er blokkstrekningene på linjer med signalregulerte faste blokk-lengder kontrollert av signaler som gir autoritet til å entre blokkstrekningen. For at et tog skal få klarsignal til å kjøre inn på en blokkstrekning, må følgende betingelser være oppfylt:

- Foregående tog må ha kjørt ut fra blokkstrekningen
- Foregående tog må ha kjørt ut fra eventuelle overlappstrekninger
- Foregående tog må være beskyttet fra etterfølgende tog av et stoppsignal
- Toget må være beskyttet fra bevegelser i motgående retning.

Figur 10 illustrerer prinsippet for 3-aspekts signalering. Figuren er hentet fra The Railway Technical Website (2018). Som figuren viser er hver blokkstrekning beskyttet av et hovedsignal. Blokkstrekningen som er okkupert av tog 1 er beskyttet av et rødt signal. Blokkstrekningen bak viser gult signal som fungerer som et forhåndsvarsel om den okkuperte blokkstrekningen lenger fram. Det gule signalet sørger for sikker bremselengde for tog 2. Blokkstrekningen som tog 2 er på veg inn på, er klar for innkjøring og viser grønt signal (The Railway Technical Website, 2018).



Figur 10: 3-aspekts signalering. Fra The Railway Technical Website (2018)

Nødvendige blokkklengder kan beregnes etter anbefalinger fra Teknisk regelverk fra Bane NOR (Bane NOR, 2018b). Formelen består av en beregnet bremselengde og et hastighetsavhengig tillegg:

$$MA = \frac{L}{3,6} * T + \frac{L^2 - MH^2}{2R * 3,6^2} \quad \text{Formel 8}$$

I formel 8 er MA lik målavstand [m], som i denne oppgaven omtales som blokk lengde. L er linjehastigheten [km/t] og MH er mål hastigheten [km/t]. Mål hastigheten settes lik null om full stopp er målet. T er summen av reaksjonstiden og tilsetningstiden [s], ifølge Bane NOR (2018b) skal T være lik åtte sekunder for signalbalisegrupper. R er retardasjonen [m/s²], den beregnes fra formel 9:

$$R = -0,2 * \frac{L - 150}{150} - \frac{C}{100} + 0,7 \quad \text{Formel 9}$$

I formel 9 er C gjennomsnittlig fall [%] over målavstanden. For hastigheter mindre eller lik 150 km/t skal ikke første ledd i formelen brukes. For beregningene i denne oppgaven er det ikke aktuelt å stryke første ledd da InterCity-nettet er dimensjonert for 250 km/t.

Beregning av blokk lengder for infrastrukturmodellen er dokumentert i vedlegg 2.

Okkupasjonstid for blokkstrekninger

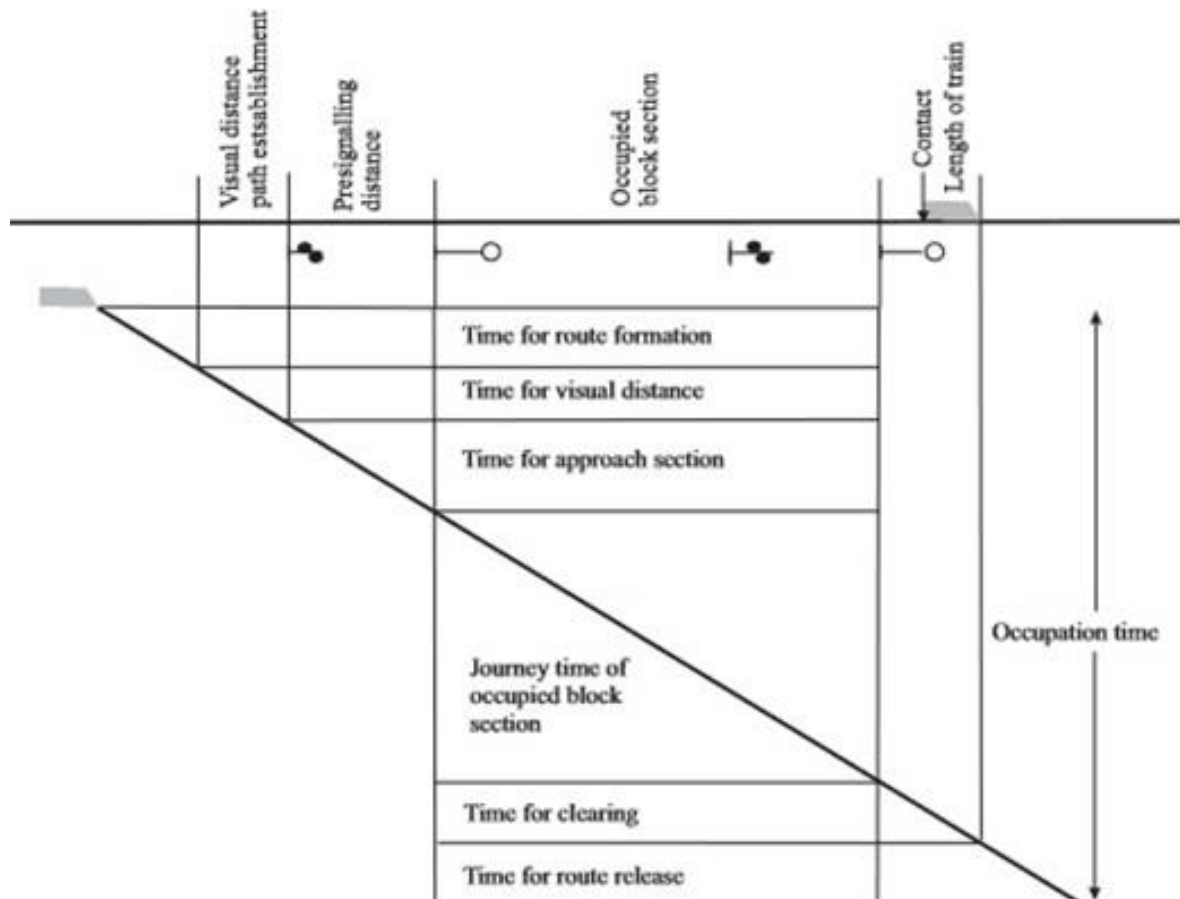
Tiden en blokkstrekning er okkupert av et tog kalles *blocking time* eller *block occupation time* ifølge Landex et al. (2006). Pachl (2015) sier at i løpet av okkupasjonstiden er blokkstrekningen eksklusivt allokert til et bestemt tog, dermed er strekningen blokkert for andre tog i dette tidsrommet. Handstanger (2009) skriver at okkupasjonstiden avhenger av blokk systemet, signalsystemet og sikkerhetsteknologien på strekningen. Okkupasjonstiden er som regel en del lengre enn tiden toget faktisk okkuperer sporet, påpeker Pachl (2015). Det skyldes at okkupasjonstiden for en blokkstrekning består av flere elementer enn kjøretiden for strekningen.

Ifølge International Union of Railways (2013) består okkupasjonstiden av følgende elementer:

- En sikkerhetsmargin som kreves før toget kan entre blokkstrekningen. Denne sikkerhetsmarginen består av tiden som trengs for å klargjøre ruten, tiden lokføreren bruker på å se signalet og tiden det tar å kjøre fram til blokkstrekningens startpunkt.
- Kjøretiden for blokkstrekningen. Kjøretiden regnes som avsluttet når togets nese når fram til blokkstrekningens slutt.
- Tiden som kreves for å frigi blokkstrekningen. Dette tidsintervallet vil avhenge av togets lengde. Blokkstrekningen anses som frigitt når togets hale passerer blokkstrekningens slutt.

- Tiden som kreves for å legge om sporveksler og endre signaler for å klargjøre blokkstrekningen for neste tog.

Alle elementene som inngår i okkupasjonstiden er illustrert i figur 11 som er hentet fra Handstanger (2009).



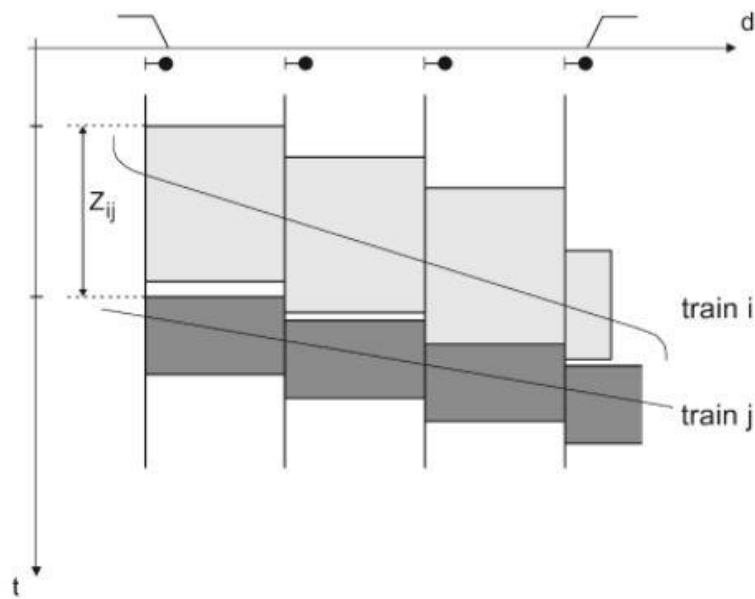
Figur 11: Elementene som inngår i okkupasjonstiden. Fra Handstanger (2009)

Bestemmelse av minste togfølgetid ved hjelp av *blocking time model*

Ved å framstille okkupasjonstidene for alle blokkstrekninger som et tog passerer over en viss strekning i et tid-distanse-diagram får man en *blocking time stairway* eller blokktrapp ifølge Pachl (2015). Om blokktrappene til tog i etterfulgt av tog j framstilles i samme diagram får man situasjonen som er framstilt i figur 12, som er hentet fra Spönemann og Wendler (2010). I figuren er Z_{ij} minste togfølgetid for tog i etterfulgt av tog j .

I likhet med komprimeringsmetoden benytter også *blocking time model* prinsippet med å skyve blokktrapper sammen så tett som mulig uten at de overlapper. Mens formålet med komprimeringsmetoden er å finne den utnyttede kapasiteten over et tidsintervall, brukes *blocking time model* for å finne minste togfølgetid. Minste togfølgetid leses av som tidsforskjellen mellom starten av første blokk for tog i og første blokk for tog j .

I denne oppgaven tas det utgangspunkt i bruk av *blocking time model* fra blokktrapper i LUKS for å finne minste togfølgetid for togene som trafikkerer analysestrekingen.



Figur 12: Minste togfølgetid fra *blocking time model*. Fra Spönemann og Wendler (2010)

2.4 Ruteplan og takting

Tog fra hensettingsanleggene må flettes inn med den øvrige togtrafikken på jernbanelinjene. Denne trafikken er et resultat av en ruteplan, og størrelsen på tidslukene i trafikken vil avhenge av typen ruteplan som er valgt. Derfor er typen ruteplan på jernbanestrekningen en viktig parameter for innflettingsprosessen (Bøe, 2017).

Ifølge Harris et al. (2016) har en ruteplan følgende funksjoner:

- Koordinere togtrafikken for å oppnå god utnyttelse av infrastrukturen
- Sørge for forutsigbar togtrafikk
- Gi informasjon til kundene
- Være et grunnlag for togstyring og planlegging av rullende materiell og personale

Ruteplanen kan enten være basert på tidsbestemte stive ruter, i det som kalles en *taktfahrplan*, eller mer tilfeldige ruteleier basert på praktiske forhold og markedet, ifølge Harris et al. (2016).

Ifølge Tyler (2003) kan ruteplaner planlegges på en av tre måter, avhengig av omstendighetene:

1. Hvert element kan organiseres individuelt i overensstemmelse med planleggerens vurderinger eller markedets etterspørsel i henhold til ressurs- og driftsbegrensninger.
2. Et repeterende mønster tilpasset etterspørselen kan opprettholdes gjennom hele dagen.
3. Mønsteret kan tilpasses startpunktet, mens detaljene kan variere etter behov.

Tradisjonelt ble de fleste ruteplaner laget etter den første metoden, i dag er det imidlertid mer vanlig å lage stive ruteplaner etter faste mønstre. Bruken av koordinerte ruteplaner basert på stive ruter og konsistens ble først brukt av det statlige sveitsiske jernbaneselskapet, SSB, i 1982 ifølge Johnson et al. (2006). Det tyske begrepet *taktfahrplan* brukes i litteraturen også i dag, men kan på norsk oversettes til taktruteplaner. Ifølge Pachtl (2015) er taktruteplaner veldig vanlig på europeiske passasjerlinjer for å øke bekvemmeligheten for passasjerene. Taktruteplaner har et repeterende mønster som gjør det enklere for passasjerene å huske avgangstidene. Taktruteplaner bør utformes på en slik måte at de gir en sammenheng mellom jernbanenettet og andre kollektivtransporttjenester, på den måten kan man sørge for et nasjonalt transportsystem av høy kvalitet skriver Harris et al. (2016).

I Sveits brukes integrerte ruteplaner der øvrige kollektivtjenester planlegges rundt det nasjonale jernbanenettet. Det sveitsiske jernbanenettet benytter togfølgetider på 15, 30 eller 60 min som standard for passasjertog. På den måten kan servicenivået doubles eller halveres uten at nettverksstrukturen må endres. Samtidig sørger de standardiserte avgangstidene for at ruteplanene er enkle å memorere for passasjerene siden de gjentas for hver time ifølge Petersen (2016).

Fra et planleggingsperspektiv kan taktruteplaner gi god oversikt, siden mønsteret repeteres for ett bestemt tidsintervall. Fra et kapasitetsperspektiv kan imidlertid denne løsningen by på problemer i områder med høy kapasitetsutnyttelse av infrastrukturen. Om flere forskjellige stive ruter skal samles på en banestrekning, vil det ifølge Olsson og Veiseth (2011) kanskje ikke være mulig å utnytte strekningens kapasitet optimalt.

Ifølge Tyler (2003) er valget mellom taktruteplaner og konvensjonelle ruteplaner avhengig av hvordan man vurderer tapet av fleksibilitet som oppstår når man velger å tilpasse seg tids-spesifikke markedskrav, i forhold til hvordan man vurderer gevinstene som oppstår ved

forbedret sammenheng med annen kollektivtransport og fordelene fra regelmessigheten som en taktruteplan gir.

For situasjoner der tog skal krysse det ene sporet og kjøre inn på det andre i et dobbeltspor, slik som situasjonen er for tog fra hensettingsanlegg som skal kjøre inn på en dobbeltsporstrekning, avhenger andelen tilgjengelige tidsluker av hvordan ruteplanene i hver retning er vridd i forhold til hverandre. For enkeltsporede strekninger er alle tog på strekningen representert på samme ruteplan, men for dobbeltspor har man egne ruteplaner i hver retning. Ruteplanene i hver retning på et dobbeltspor kan være identiske, slik at to tilsvarende tog kjører fra hvert sitt startpunkt på strekningen ved samme tidspunkt, men i hver sin retning. Eller man kan velge å vri ruteplanene slik at tidspunktene for de to avgangene i hver retning er ulike med en fast differanse på et bestemt antall minutter.

Tabell 3 er laget for å bedre forklare vridning av ruteplaner. Tabellen viser et utdrag av en ruteplan. Den første delen av tabellen (med grå bakgrunn) viser situasjonen med ingen vridning. Der starter togene i hver retning ved samme tidspunkt, men fra hver sin stasjon. Andre del av tabellen (med blå bakgrunn) viser situasjonen med 10 minutter vridning. Det vil si at første tog i retning mot synkende kilometer starter 10 minutter senere enn første tog i retning mot stigende kilometer.

Tabell 3: Ingen vridning (grå) og vridning på 10 min (blå)

Retning mot stigende km		Retning mot synkende km	
Tidspunkt	Togtype	Tidspunkt	Togtype
06:00	IC	06:00	IC
06:15	Fjerntog	06:15	Fjerntog
06:30	IC	06:30	IC
Retning mot stigende km		Retning mot synkende km	
Tidspunkt	Togtype	Tidspunkt	Togtype
06:00	IC	06:10	IC
06:15	Fjerntog	06:25	Fjerntog
06:30	IC	06:40	IC

2.5 Hensetting

Ifølge Pacht (2015) er en terminal en samling fasiliteter ved en stasjon eller på et punkt på en strekning som har som formål å samle, sortere, klassifisere og videresende tog. En typisk passasjerterminal består av en gruppe plattformspor og noen hensettingsspor for å oppbevare passasjertog. Hensettingsanlegg brukes for oppbevaring, vask og rengjøring av rullende materiell, og består av et system av sidespor.

Ofte er hensettingsspor og hensettingsanlegg plassert i tilknytning til stasjoner, men hensettingsanlegg kan også plasseres på åpen linje relativt langt unna stasjonsområder. Den sistnevnte situasjonen er den mest interessante for problemstillingen i denne oppgaven.

Gjennom døgnet er det store variasjoner i etterspørselen etter personreiser med tog. Det er størst etterspørsel tidlig om morgenen og om ettermiddagen i sammenheng med pendling til og fra jobb. I disse periodene vil en stor andel av persontogene være i bruk. Ifølge Harris et al. (2016) er det vanlig å planlegge at disse periodene er fra 7.00 til 9.00 og fra 15.00 til 17.00.

Resten av døgnet er ikke etterspørselen like stor, dermed oppstår behovet for hensetting for togene som ikke er i bruk. Størst behov for hensetting er det om natten når bare en liten andel av persontogene er i bruk skriver Harris et al. (2016). Ifølge Olsson og Veiseth (2011) står togene oftest hensatt i ytterpunkter av regionen om natten. For det norske InterCity-nettet er togene ofte plassert ved endestasjonene på linjen om natten slik at de er klare for første avgang til Oslo neste morgen. På den måten reduseres tomtogskjøringen og man får en mer effektiv togframføring.

Behovet for hensetting inkluderer innsatstog og tog som brukes til dublering. I rushtiden er det ofte bruk for doble togsett for å øke passasjerkapasiteten per avgang, mens det utenfor rushtid kan være tilstrekkelig med enkelsett. Enkelsett sparer personale, tid og utgifter til kjøring, og gir mindre slitasje på togsettene. Bruken av enkelsett utenfor rushtiden medfører økt behov for hensetting i disse periodene. Ifølge Olsson og Veiseth (2011) er innsatstog tog som settes inn ekstra i 2 til 2,5 timer under rushtiden. Når innsatstogene ikke er i bruk på dagtid bør de ideelt sett hensettes sentralt nær de store byområdene. For InterCity bør innsatstogene helst hensettes sentralt i Oslo mellom rushperiodene, i påvente av at de kjøres ut av Oslo igjen i ettermiddags-rushtet.

Hensettingsanlegg krever store areal, noe som kan vanskeliggjøre arealsøk i sentrale områder. Et togsett av typen FLIRT er 106 meter, og en hensettingsplass er satt til 110 meter. I

utredningen *Hensetting Østlandet* er det på det meste søkt etter anlegg med inntil 95 plasser, et slikt anlegg krever veldig stort areal. I byområder er det vanskelig å finne store ledige arealer, og det er stor konkurranse om de ledige arealene som finnes. Dermed presses også prisene opp. Det er i tillegg ofte motvilje i befolkningen til at byområder skal brukes til hensetting på grunn av støy, vibrasjoner og visuelt preg. Derfor er flere av de områdene som er vurdert for hensetting usentralt plassert i områder med mye ledige arealer til lave priser. En ulempe ved dette er at man risikerer store utgifter til tomtogkjøring. Dess lengre strekninger togene må kjøre mellom endestasjon og hensettingsanlegget, dess større blir utgiftene til tomtogkjøring. Utgifter til tomtogkjøring er derfor tatt med som et vurderingskriterium i Bane NOR sitt arealsøk for *Hensetting Østlandet*.

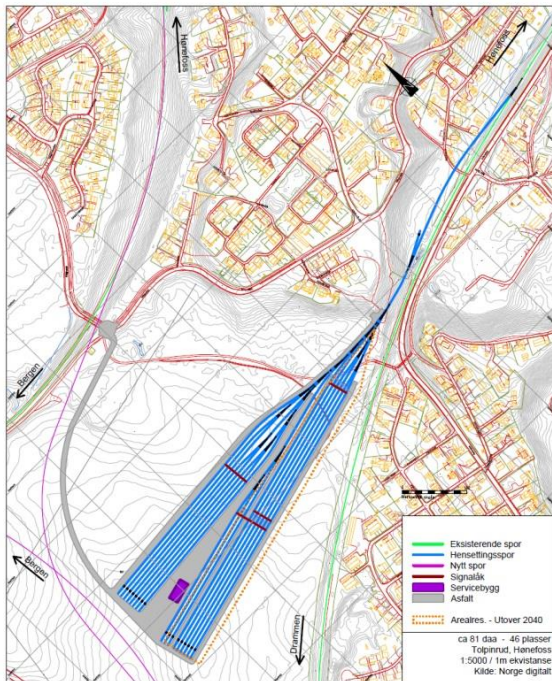
Plassering og utforming av hensettingsanlegg

Fra et kapasitetsperspektiv vil det være mest gunstig å ha hensettingsanlegg i tilknytning til stasjonsområder. Da kan tog fra hensetting sakte kjøre inn på stasjonen på egne spor og starte sin reise fra stasjonen. Ofte er arealene nær stasjonsområdene attraktive sentrumsnære områder som er utbygde. Det kan derfor være begrenset med tilgjengelig areal. Det kan også være svært kostbart å kjøpe disse arealene. Om man vurderer både kapasitet og økonomi er derfor ikke hensettingsanlegg i tilknytning til stasjonsområder nødvendigvis den beste løsningen. Arealer i landlege områder er ofte billigere, og det er vesentlig lettere å finne store nok arealer som er ledige om man beveger seg bort fra tettbygde strøk. Derimot kan man risikere at infrastrukturkostnadene blir høyere siden en mindre andel av den nødvendige infrastrukturen finnes i slike områder i utgangspunktet. Man kan også risikere å komme i konflikt med verdifulle jordbruksarealer.

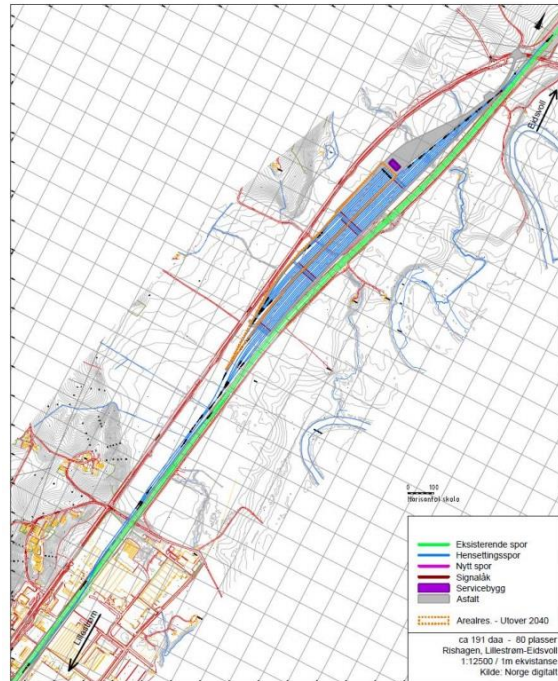
Det er i hovedsak to mulige løsninger for utformingen av hensettingsanlegg som er aktuelle: sekkeanlegg eller anlegg med to påkoblingspunkter. Et sekkeanlegg har bare et påkoblingspunkt, se figur 13 som viser den foreslåtte geografiske sporplanen for Tolpinrud ved Hønefoss (Jernbaneverket et al., 2015c). Figur 14 viser et anlegg med to påkoblingspunkter, dette er fra den foreslåtte geografiske sporplanen for Rishagen ved Lillestrøm (Jernbaneverket et al., 2015b).

To påkoblingspunkter er en stor fordel for å øke fleksibiliteten for hensettingsanlegg. Sekkeanleggene må ha uttrekkspor for å muliggjøre retningskifte for togene, det medfører at disse anleggene blir mindre fleksible. To påkoblingspunkter er maksimalt fleksibelt da ingen

ekstra infrastruktur er nødvendig for retningsskifte, men disse anleggene er mer arealkrevende. Valg av utforming avhenger av ønsket fleksibilitet og kapasitet, tilgjengelig areal og antall hensettingsplasser.



Figur 13: Sekkeanlegg for hensetting ved Tolpinrud (Jernbaneverket et al., 2015c)



Figur 14: Hensetting med to påkoblingspunkter, Rishagen (Jernbaneverket et al., 2015b)

Ulike påkoblingsløsninger fra hensettingsanlegg inn på dobbeltspor

Ifølge Harris et al. (2016) må vurderingen av hvilken krysstype som bør velges for en jernbanestrekning ses i sammenheng med ønsket kapasitet og fleksibilitet. I tillegg må investeringskostnader og vedlikeholdsbehov tas med i betraktningen. Generelt vil krysstyper som tillater at flere togbevegelser utføres samtidig foretrekkes, ifølge Harris *et al.*

Kryss i plan gir lavere kapasitet og mindre fleksibilitet enn planskilte kryss, men de er betraktelig billigere å bygge. Planskilte kryss gir veldig lite kapasitetstap, men de krever mer areal ifølge Harris et al. (2016). Ved planskilte kryss kan trafikken til eller fra hensettingsanlegget ledes over hovedsporet på en bro, i det som kalles en *flying junction*, eller under hovedsporet i en tunnel eller kulvert, i en *burrowing junction*. Fra et rent operasjonelt synspunkt vil en planskilt løsning være det fortrukne alternativet skriver Harris et al. (2016). Den ekstra konstruksjonen i form av bro eller kulvert som den planskilte løsningen krever, gjør at en slik

løsning blir veldig mye dyrere enn kryss i plan. Fra et helhetlig synspunkt er det derfor ikke nødvendigvis best med en planskilt løsning.

Ifølge Jernbaneverket et al. (2015a) må detaljeringen av blant annet sporveksler for planfrie kryss for *Hensetting Østlandet* tilpasses slik at togframføring i høy hastighet er mulig. Det vil føre til store investeringskostnader. I vurderingen av egnet løsning for hensettingsanleggene for InterCity bør anleggene derfor vurderes i et langsiktig perspektiv.

For en del av de større anleggene som vurderes i utredningen *Hensetting Østlandet* ser man på en løsning med planskilt påkobling i en ende og kryss i plan i den andre enden. Det vil gi store besparelser i forhold til å velge en planskilt påkobling i begge ender. Ved å bygge planskilt påkobling i den enden der kapasiteten er mest kritisk, som for InterCity ofte er den enden som vender mot Oslo, kan man fortsatt sørge for god kapasitet for påkoblingen.

For små hensettingsanlegg ved strekninger med lav kapasitetsutnyttelse vil det ikke være hensiktsmessig å bygge en planskilt løsning, da vil kryss i plan og ventespor antagelig være tilstrekkelig. Som nevnt i innledningen vil grensetilfellene, da særlig de middels store anleggene med middels kapasitetsutnyttelse, antagelig være de vanskeligste anleggene å finne rett løsning til.

Nødvendige rampelengder for planskilt påkobling

For planskilt påkobling vil dimensjonerende hastighet ved fletting begrenses av hastigheten i avvik for sporvekslene som installeres i sporet. Å bygge sporveksler med 250 km/t i avvik vil ikke være realistisk for norske forhold da slike veksler vil bli enormt store og kostbare. Etter diskusjoner med veileder Elias Kassa ble det bestemt at det i denne oppgaven skal tas utgangspunkt i sporveksler med 130 km/t i avvik. Disse vekslene har 2500 m kurveradius og er 94,3 m lange. Per i dag har vi ikke så kraftige sporveksler i norske jernbanespor. Om det skulle velges mindre sporveksler, vil flettehastigheten reduseres, da vil innflettingen kreve større luker og dermed bli vanskeligere å utføre.

Med 130 km/t som utgangspunkt for flettehastigheten for tog fra hensetting kan man finne ut hvor lange oppkjøringsramper som er nødvendig for å oppnå ønsket hastighet. Planskilt påkobling er veldig arealkrevende i utgangspunktet, og dess større hastighet togene fra hensetting må opp i før de flettes inn på dobbeltsporet, dess større areal vil bli nødvendig for rampeoppbyggingen.

For å beregne rampelengder trengs informasjon om akselerasjonen for det aktuelle togmateriellet. I tabell 4 fra *InterCity-prosjektet: Vedlegg 1 til Konseptdokument: Tilbudskonsept Vestfold-, Østfold- og Dovrebanen (Jernbaneverket, 2015)* skriver Jernbaneverket at det er tatt utgangspunkt i følgende togmateriell for InterCity-prosjektet:

Tabell 4: Togmateriell for InterCity (Jernbaneverket, 2015)

Togkategori	Banestrekning	Materiell
Regiontog	Lysaker – Moss	BM75-D
InterCity-tog	Dal - Tønsberg	BM75-D
InterCity-tog	Skien - Lillehammer	BM74-D
InterCity-tog (Østfoldbanen)	Oslo S – Halden	BM73B-D / BM74-D

I tillegg inngår fjerntog, flytog og godstog blant togmateriellet som skal ferdes på InterCity-nettet. Her er det imidlertid bare tatt hensyn til InterCity-tog og regiontog siden analysene skal utføres for persontog fra hensettingsanlegg. Felles for togmaterielle i tabell 4 er at de er FLIRT-tog med en maksimalakselerasjon på $1,2 \text{ m/s}^2$ (Stadler).

For å finne nødvendig rampelengde kan den tidløse formelen fra fysikken brukes:

$$2as = v^2 - v_0^2 \quad \rightarrow \quad s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad \text{Formel 10}$$

For denne beregningen vet man at akselerasjonen er $1,2 \text{ m/s}^2$, starthastigheten er 0 km/t og sluthastigheten er 130 km/t . Dermed kan nødvendig rampelengde beregnes:

$$\text{Rampelengde} = s = \frac{\left(\frac{130}{3,6}\right)^2}{2 * 1,2} \text{ m} = 543 \text{ m} \quad \text{Formel 11}$$

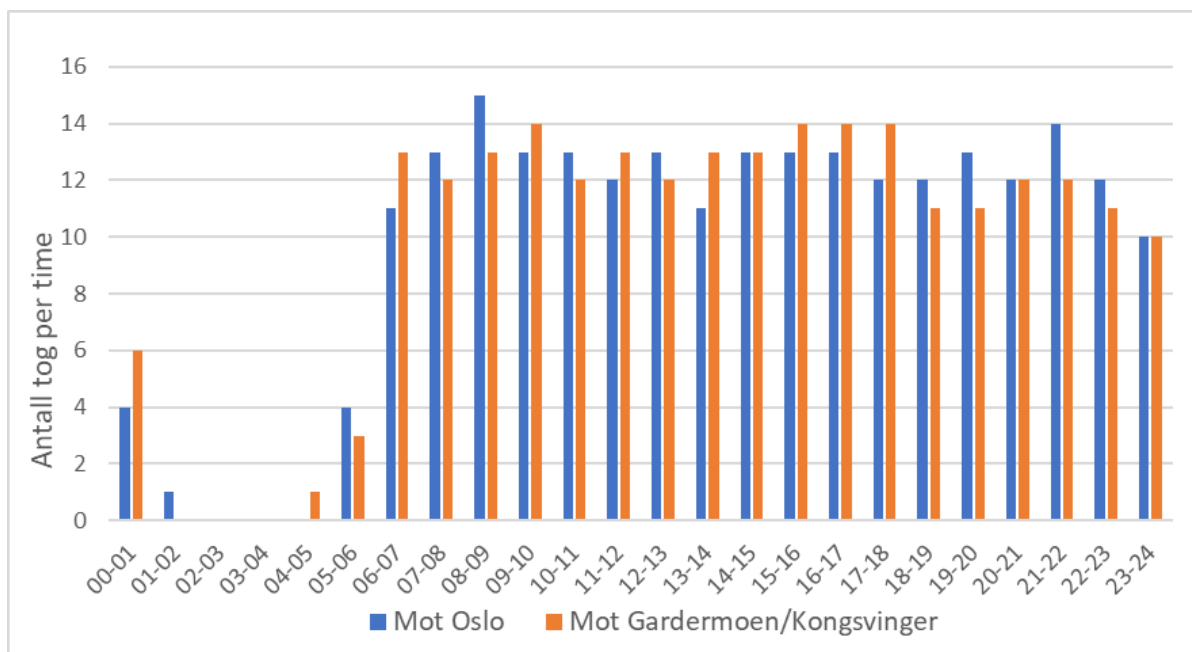
Om togene fra hensetting skal komme opp i 130 km/t før de flettes inn på dobbeltsporet kreves det altså en rampelengde på 543 meter.

Opp- og nedtrapping for InterCity-strekninger

Som en del av datagrunnlaget for kapasitetsanalysene ble det laget en realistisk opp- og nedtrappingsplan for togtettheter. Grafiske ruter fra Bane NOR ble studert for å danne et

grunnlag for opp- og nedtrappingsplanene for InterCity. Grafiske ruter for hele Norges jernbanenett er tilgjengelig fra www.banenor.no. De viser den forhåndsplanlagte togtrafikken for alle strekninger i en skjematisk oversikt. Det vil si at ekstratog, arbeidstog og tog som kjøres uten forhåndsplanlagt rute ikke er med på de grafiske togrutene (Bane NOR, 2016d).

I oppgaven er det valgt å bruke Lillestrøm stasjon som utgangspunkt for å lage en realistisk opp- og nedtrappingsplan. Lillestrøm stasjon er en del av Gardermobanen, i tillegg starter Kongsvingerbanen i Lillestrøm. Togtrafikken både på Gardermobanen og på Kongsvingerbanen er derfor tatt med i beregningene. Trafikk fra hensettingsanleggene på Hamar, Lillehammer, Lillestrøm, Kongsvinger og Dal inngår blant togtrafikken forbi Lillestrøm stasjon. Basert på grafiske togruter for Gardermobanen og Lillestrøm – Charlottenberg kan man finne togtettheter for Lillestrøm stasjon gjennom døgnet (Bane NOR, 2016b, Bane NOR, 2016a). De grafiske rutene som ble brukt som utgangspunkt for togtetthetene var gjeldende fra 11.12.16 til 09.12.17. Togtetthetene er framstilt grafisk i figur 15, og trafikken er inndelt i trafikk mot Oslo og trafikk mot Gardermoen/Kongsvinger.



Figur 13: Togtettheter forbi Lillestrøm stasjon

Som figur 15 viser er morgenrushet forbi Lillestrøm stasjon mellom 08 og 10 med totalt henholdsvis 28 og 27 tog i timen, mens ettermiddagsrushet er mellom 15 og 17 med totalt 27 tog i timen. Det er mest trafikk i retning Oslo i løpet av morgenrushet, mens det er mest trafikk i retning Gardermoen og Kongsvinger i løpet av ettermiddagsrushet. Det tyder på at mange

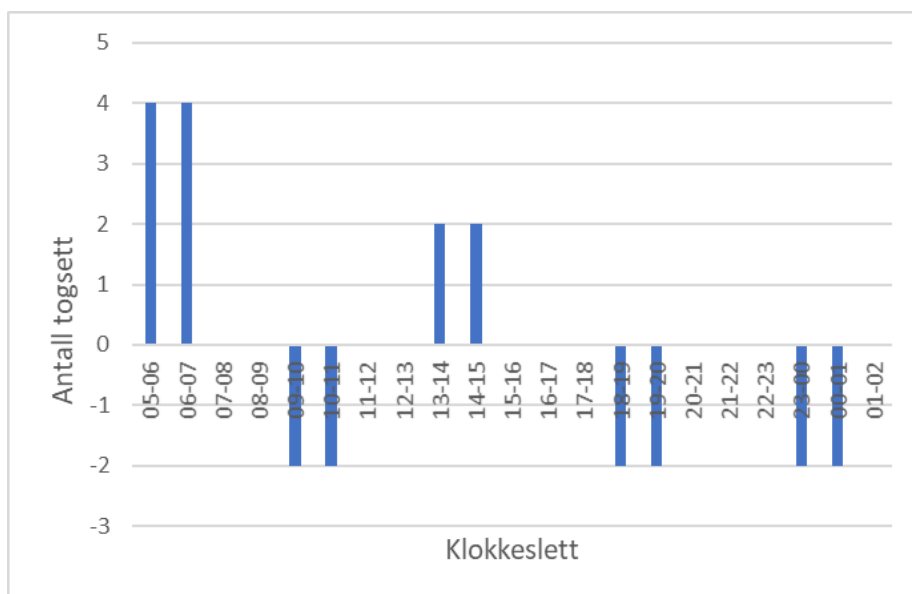
pendler til Oslo om morgenen og returnerer hjem i løpet av ettermiddagen. Som tidligere nevnt er planleggingsperiodene for maksimal etterspørsel fra 07 til 09 og fra 15 til 17. Morgenrushet for Lillestrøm stasjon avviker derfor noe fra planleggingsperioden. Mellom 02 og 04 på natta er det ingen trafikk på strekningen, og det er bare et tog som kjører forbi Lillestrøm i timene før og etter denne perioden. Like før morgenrushet er det en kraftig opptrapping i togtetthet. Etter morgenrushet er det deretter en svak nedgang i togtetthet, før det er en liten oppgang igjen før ettermiddagsrushet.

Tabell 5 viser typiske togbevegelser til og fra hensettingsanlegg over døgnet for å ta hensyn til etterspørselen etter togreiser.

Tabell 5: Togbevegelser til og fra hensettingsanlegg

Tidspunkt	Fra/til	Beskrivelse
05:00-07:00	Fra hensetting til stasjon	Opptrapping før morgenrush, doble togsett
09:00-11:00	Fra stasjon til hensetting	Nedtrapping, deling av togsett etter morgenrush
13:00-15:00	Fra hensetting til stasjon	Opptrapping, doble togsett til ettermiddagsrush
18:00-20:00	Fra stasjon til hensetting	Nedtrapping, deling av togsett etter ettermiddagsrush
23:00-01:00	Fra stasjon til hensetting	Nedtrapping, hensetting over natta

Med utgangspunkt i tabell 5 kan togbevegelsene til og fra hensetting over døgnet framstilles i et histogram som vist i figur 16. Her er togbevegelser **fra** hensetting presentert som positive tall, mens togbevegelser **til** hensetting er presentert som negative tall. I figuren er det antatt at to tog per time, det vil si fire togsett, kjører fra hensetting i perioden med opptrapping før morgenrushet. Det antas også at togsettene deles etter kl. 9, og at de dobles igjen før ettermiddagsrushet.



Figur 14: Togbevegelser fra hensetting (positive tall) og til hensetting (negative tall)

Per i dag er det ikke stor nok etterspørsel på Østlandet til at det er nødvendig å kjøre med doble togsett utenfor rushtidsperiodene. Grunnet økt sentralisering og befolkningsvekst på Østlandet kan det ikke utelukkes at det i framtiden vil bli behov for doble togsett også utenfor rushtid.

2.6 Oppsummering av benyttet litteratur

Gjennom litteraturstudiet både i prosjektoppgaven og masteroppgaven var det vanskelig å finne litteratur om hensettingsanlegg plassert ute på åpen strekning. Generell litteratur om hensetting og hensettingsbehov var grei å spore opp, men litteratur om tilknyttet problemstillingen i denne oppgaven var vanskelig å finne. En del av det som er presentert i delkapittel 2.5 om plassering og utforming av hensettingsanlegg og om togbevegelser til og fra hensetting er derfor basert på samtaler med veileder og på utredningen *Hensetting Østlandet*. Problemstillingen med plassering av ute på åpen linje framstår som særegen for norske forhold, da hensetting ved stasjonsområder er mest vanlig. Fra et kapasitetsperspektiv er hensetting ved stasjonsområder også en antatt bedre løsning. Da kan togene fra hensetting ledes til stasjonen via egne spor. Situasjoner der tog fra hensetting må flette med øvrig trafikk som holder høye hastigheter unngås dermed.

Litteraturstudiet har vist at problemstillingen i denne oppgaven, der tog fra hensetting må flette med øvrig trafikk som holder hastigheter på opptil 250 km/t, er ny både i norsk og internasjonal

sammenheng. Det finnes derfor begrenset med litteratur som sier noe om hvordan denne situasjonen vil påvirke kapasiteten på dobbeltsporet.

I neste del gjennomgås de viktigste definisjonene og metodene som legges til grunn for oppgaven. Definisjonene og metodene er sortert etter tilhørighet til infrastruktur eller drift.

Definisjoner og metoder som legges til grunn i oppgaven:

Infrastruktur

Togseparasjon: Ifølge Pachl (2015) kan togseparasjon gjøres ved tre grunnleggende teoretiske prinsipper: togseparasjon ved relativ bremselengde, togseparasjon ved absolutt bremselengde og togseparasjon ved faste blokk lengder. I denne oppgaven brukes prinsippet med faste blokk lengder. Nødvendige blokk lengder kan beregnes etter anbefalinger fra Teknisk regelverk fra Bane NOR.

Påkobling til dobbeltspor: Ifølge Harris et al. (2016) gir kryss i plan lavere kapasitet og mindre fleksibilitet enn planskilte kryss, men de er betraktelig billigere å bygge. Planskilte kryss gir veldig lite kapasitetstap, men de krever imidlertid mer areal. Hovedfokuset i denne oppgaven er påkoblingsløsninger med kryss i plan, men planskilte kryss analyseres også.

Drift

Kapasitet: Som gjennomgangen i delkapittel 2.1 viser finnes det flere definisjoner av kapasitet. I denne oppgaven tas det utgangspunkt i definisjonene gitt av Pachl, Burdett og Kozan og Sangphong et al. Kapasitet defineres i denne oppgaven som antall tog som kan trafikkere en strekning i en retning i løpet av et tidsintervall på en time.

Kapasitetsutnyttelse: Utnyttet kapasitet for en jernbanestrekning kan finnes ved å komprimere ruteplanen etter komprimeringsmetoden beskrevet av International Union of Railways (2013) gitt en bestemt ruteplan og infrastruktur. Komprimeringsmetoden er en generalisert metode for å beregne kapasitetsutnyttelse delstrekning for delstrekning. Denne metoden benyttes i masteroppgaven.

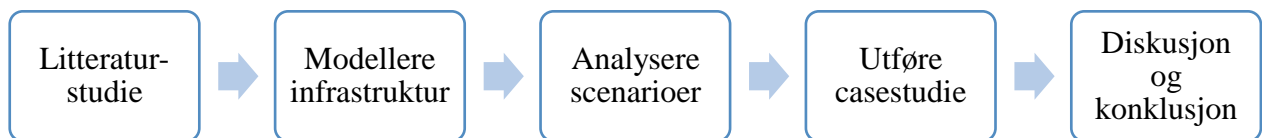
Ifølge Handstanger (2009) vil ventetiden på en strekning gå mot uendelig når den utnyttede kapasiteten nærmer seg den teoretiske kapasiteten. Det er derfor ugunstig å utnytte systemet over den praktiske kapasiteten. Høy utnyttet kapasitet vil også redusere punktligheten på strekningen.

Ifølge Landex (2008) vil økt hastighet på jernbanenettet føre til økt minste togfølgetid, det vil igjen føre til at kapasiteten reduseres. Blandet trafikk vil også redusere kapasiteten da hastighetsforskjellene mellom hurtiggående og saktegående tog eliminerer eventuelle togleier (Pawar, 2011). Det norske InterCity-nettet planlegges for blandet trafikk med hastigheter fra 100 km/t for godstog til 250 km/t for fjerntog.

Ruteplan: Tog fra hensettingsanleggene må flettes inn med den øvrige togtrafikken på jernbanelinjene. Denne trafikken er et resultat av en ruteplan, og størrelsen på tidslukene i trafikken vil avhenge av typen ruteplan som er valgt. Ifølge Harris et al. (2016) kan ruteplanen enten være basert på tidsbestemte stive ruter, i det som kalles en *taktfahrplan*, eller mer tilfeldige ruteleier basert på praktiske forhold og markedet. I denne oppgaven benyttes tidsbestemte stive ruter, også kalt taktruteplaner.

3. METODE

I dette kapitlet presenteres metodene som er brukt for å belyse oppgavens problemstilling og forskningsspørsmål. Kapitlet er delt inn i fem delkapitler. I de fire første delkapitlene presenteres de ulike hovedtrinnene i metoden, disse er også vist i figur 17, og i det femte delkapitlet vurderes valget av metode. Som figur 17 viser startet arbeidet med en litteraturstudie, deretter ble en generell infrastrukturmodell laget i LUKS. Infrastrukturmodellen ble brukt til å analysere ulike relevante scenarier for analysen. Deretter ble en casestudie utført for å vurdere løsningene som er foreslått i utredningen *Hensetting Østlandet* opp mot resultatene fra denne studien. Siste ledd i figuren er å diskutere resultatene, samt å komme fram til en konklusjon som besvarer problemstillingen og de definerte forskningsspørsmålene.



Figur 15: Illustrasjon av metoden for oppgaven

Metoden som benyttes i denne oppgaven er valgt basert på diskusjoner med veiledere, samt basert på funn fra litteraturstudiet. Metodens hovedtrekk ble valgt gjennom arbeidsprosessen med prosjektoppgaven, mens detaljene rundt metoden har blitt videreutviklet i tiden etterpå etter hvert som oppgavens problemstilling har blitt omformulert og spisset.

3.1 Litteraturstudie

Litteraturstudiet i denne oppgaven er en videreføring av litteraturstudiet som ble gjennomført i forbindelse med prosjektoppgaven høsten 2017. Litteraturstudiet i prosjektoppgaven var imidlertid mindre omfattende, og mer overordnet enn i denne oppgaven. En del ny litteratur måtte derfor oppspores i arbeidet med masteroppgaven.

For å finne relevant litteratur ble universitetsbibliotekets søkemotor Oria, samt flere av universitetsbibliotekets databaser, benyttet. I tillegg ble søkemotoren Google Scholar brukt. Søkene ble konsentrert rundt viktige begreper for oppgaven, som «railway capacity», «taktfahrplan», «timetable railway» og «train stabling».

Etter hvert som søkene ga relevante treff, ble referanselistene til flere av de mest aktuelle artiklene benyttet videre for å finne flere relevante artikler. Etter hvert ble det tydelig at en del forfattere har publisert flere artikler eller avhandlinger om temaer som er særlig relevante for denne oppgaven. Derfor ble det også søkt direkte på flere forfattere for å finne mer litteratur, blant annet ble dette utført for å finne litteratur av Landex, Kaas, Abril og White. For alle vitenskapelige artikler og bøker som har blitt benyttet, ble kvaliteten vurdert basert på hvem som har forfattet artikkelen og hvor den har blitt publisert. Antall siteringer og om artikkelen har blitt fagfellevurdert ble også tatt med i betraktningen før det ble besluttet om den aktuelle referansen skulle bli benyttet eller ikke.

Bane NOR sine nettsider, www.banenor.no, ble brukt for å finne utredninger publisert av Bane NOR og tidligere Jernbaneverket, samt for å finne informasjon om norske jernbanestrekninger, jernbaneprosjekter, punktlighetsmål og grafiske togruter. Bane NORs tekniske regelverk ble brukt for å finne informasjon om regler og normaler for jernbanetekniske fagområder.

Som en del av litteraturstudiet i prosjektoppgaven ble det gjennomført en dokumentanalyse av utredningen *Hensetting Østlandet* for å studere egenskapene til de foreslåtte hensettingsarealene. Analysen hadde fokus på hastighet på dobbeltsporet, antall hensettingsplasser og foreslått påkoblingsløsning for å øke forståelsen av hva som burde analyseres i masteroppgaven. Denne analysen ble utført høsten 2017, og resultatene er presentert i kapittel 4, delkapittel 3. Bare de arealene som ligger ved eksisterende, eller planlagt, dobbeltspor ble vurdert i dokumentanalysen. Arealer ved enkeltspor er utelatt fra videre vurderinger fordi de ikke passer problemstillingen. Resultatene fra dokumentanalysen danner grunnlaget for casestudiet i masteroppgaven.

3.2 Modellering av infrastruktur i LUKS

En numerisk infrastrukturmodell ble laget i kapasitetsverktøyet LUKS for å kunne analysere de ønskede scenarioene. LUKS ga gode muligheter til å bygge infrastruktur tilpasset problemstillingen i oppgaven, og LUKS muliggjør studier av *blocking time model*, som er svært viktig for denne oppgaven. Flere andre kapasitetsverktøy kunne også egnet seg for analysene i oppgaven. LUKS ble imidlertid valgt siden veileder hadde god kjennskap til verktøyet.

Infrastrukturmodellen er en dummymodell, det innebærer at strekningen ikke eksisterer i virkeligheten. Infrastrukturmodellen består av en analysestrekning med to stasjoner, stasjon 1

og 2, forbundet med et 30 km langt dobbeltspor. Midt på dobbeltsporet ble et 250 meter langt ventespor plassert mellom de to hovedsporene. Ventespor skal benyttes av tog fra hensettingsanlegget som kjører inn på dobbeltsporet. Infrastrukturmodellen trafikkeres av sett med forhåndsdefinerte InterCity-tog, fjerntog og godstog som følger definerte ruteplaner.

Proessen med oppbyggingen av infrastrukturmodellen forklares nærmere i kapittel 4, delkapittel 1. Der grunnis også valg som er tatt i forbindelse med infrastrukturmodellen og dens elementer, samt trafikksammensetningen på strekningen. Ruteplanene som er benyttet i oppgaven forklares også nærmere i kapittel 4.1, og alle ruteplanene er vedlagt til oppgaven. Kun en kort gjennomgang av infrastrukturmodellen gis i dette kapittelet, det henvises til kapittel 4 for ytterligere informasjon.

Kapasitetsanalysene i denne oppgaven har som formål å se på trender og endringer i kapasiteten gitt ulike analysescenario. Det ble derfor vurdert som tilstrekkelig å bygge en enkel infrastrukturmodell som representerer et generelt tilfelle av et dobbeltspor der tog fra hensetting kjører inn på dobbeltsporet fra et ventespor. Ventetiden på ventespor er det viktigste resultatet fra denne studien.

3.3 Analyse av forhåndsdefinerte scenarier

Det er flere parametere som kan ha betydning for ventetiden på ventespor for tog fra hensetting og inn på dobbeltspor. De viktigste parametere som er identifisert gjennomgås i kapittel 4.2. Et begrenset antall av de identifiserte parametere ble studert i analysene:

Antall tog fra hensetting som kjører inn på dobbeltsporet: Analysene utføres for ett til tre tog fra hensetting per time.

Togmiks på dobbeltsporet: Analysene tar utgangspunkt i en miks av godstog, fjerntog og InterCity-tog der antallet godstog og fjerntog holdes konstante på ett tog i timen, mens antallet InterCity-tog økes gradvis. En av analysene ser på en situasjon der godstog er utelukket i rushtiden for å se hvordan dette virker inn på kapasitetsutnyttelse og forventet ventetid.

Kapasitetsutnyttelse på dobbeltsporet: I oppgaven studeres kapasitetsutnyttelser fra ca. 40 % til over 75 %. Det studeres hvordan økende kapasitetsutnyttelse virker inn på forventet ventetid på ventespor.

Blokk lengder: Nødvendige blokk lengder for infrastrukturmodellen ble beregnet etter metoden beskrevet i Teknisk regelverk (Bane NOR, 2018b), beregningene er vist i vedlegg 2. Beregningene ga en nødvendig blokk lengde på 5 km. I analysene brukes også en halvering av blokk lengden til 2,5 km for å studere hvordan de reduserte blokk lengdene virker inn på forventet ventetid.

Påkoblingsløsning: I denne oppgaven er hovedfokuset på kryss i plan med ventespor, men det utføres også en analyse av en planskilt løsning for å se hvordan det virker inn på kapasiteten. Ved bruk av planskilte kryss reduseres antallet konfliktpunkter, da trafikken fra hensettingsanlegget enten ledes under det ene sporet i tunnel eller over det på bro. Det forventes derfor at kapasiteten vil øke som følge av bruken av planskilt løsning i forhold til bruk av kryss i plan.

En sensitivitetsanalyse ble utført for å finne svar på hvilken av de overnevnte faktorene ventetiden er mest følsom for.

I oppgaven ble en enkel analyse av hvordan vridning av ruteplanene påvirker forventet ventetid utført. Vridninger fra ingen vridning (0 minutter) til 55 minutter analyseres i oppgaven. I analysene tas det utgangspunkt i identiske ruteplaner for hver retning, der ruteplanen i retning mot stigende kilometer holdes konstant gjennom analysene, mens ruteplanen i motsatt retning endres med bestemte vridninger. Vridning av ruteplaner er nærmere forklart i kapittel 2.4.

Det ble også utført en vektet analyse av de ulike vridningene for å finne ut hvilke vridninger som er mest og minst gunstige for ventetiden. De vektete verdiene av vridningene ble oppnådd ved å dele inn verdiene mellom høyeste og laveste forsinkelse for hvert av scenarioene i ti like store intervall. Forsinkelsene fikk deretter verdier fra en til ti basert på hvilket intervall de tilhørte. Den maksimale vektete verdien det er mulig å oppnå for de fem scenarioene er 50. Dess høyere vektete forsinkelse en gitt vridning av ruteplanene får, dess mer ugunstig er den aktuelle vridningen.

Vridning av ruteplaner defineres imidlertid ikke som en analyseparameter da alle resultater beregnes som gjennomsnittsverdier av alle studerte vridninger.

Framgangsmåte for analysene

For hver analyse er ulike analysescenario definert basert på hvor mange InterCity-tog som trafikkerer strekningen. Antallet godstog og fjerntog holdes konstant på ett av hver type per

time, mens antallet InterCity-tog per time økes fra to til seks. Dette gir fem ulike analyse-scenario for hver analyse. Deretter ble komprimeringsmetoden brukt til å finne kapasitets-utnyttelsen for hvert av analysescenarioene. Kapasitetsutnyttelsen ble beregnet i retningen mot stigende kilometer inkludert tog fra hensetting.

Ruteplaner ble definert for alle analysene basert på prinsippet om taktruteplaner der InterCity-tog plasseres hvert 60, 30 eller 15 min etter den sveitsiske metoden som beskrevet i kapittel 2.4. Fjerntog og godstog plasseres i ledige tidsintervall mellom InterCity-togene. Ved mer enn fire InterCity-tog per time plasseres de neste InterCity-togene der det er ledige tidsluker uavhengig av prinsippet om taktruteplaner. Ruteplanene brukes for å generere blokktrapper i LUKS. Fra *Construction*-fanen i LUKS kan blokkoppkjøpstidene for strekningene der inn- og utkjøringen fra ventesporet foregår leses av. Ved å finne ut når togene i retning mot synkende kilometer forlater blokkstrekningen kan man finne ut når togene fra hensetting kan kjøre inn på ventesporet. Hvor lenge togene må vente på ventesporet avhenger av når det er store nok ledige tidsluker på sporet som hensettingstogene skal kjøre inn på.

Når denne prosessen er gjennomført for alle analysescenario og alle vridninger av ruteplanene, kan gjennomsnittlig ventetid beregnes for hvert analysescenario. I denne oppgaven antas det at den forventede ventetiden er lik gjennomsnittlig ventetid. Denne antagelsen bygger på en vanlig antagelse fra kollektivtransportlitteraturen. Innenfor kollektivtransport er det vanlig å anta at den forventede ventetiden for passasjerer som skal benytte et kollektivtransportmiddel er halvparten av følgetiden mellom to avganger, gitt at passasjerene ankommer holdeplassen uten å sjekke ruteplanen på forhånd (Avineri, 2004). Det vil si at om en busslinje har avgang fra en holdeplass hvert tiende minutt, vil den forventede ventetiden for en passasjer som går til holdeplassen uten å sjekke bussruten på forhånd, være fem minutter.

Det samme prinsippet brukes i denne oppgaven. Togtrafikken fra hensettingsanlegget er tilpasset ruteplanen i retning mot synkende kilometer da tog fra hensetting må krysse dette sporet for å ankomme ventesporet. Det antas derimot at det er tilfeldig om det eksisterer store nok ledige tidsluker på neste spor ved dette tidspunktet. Om det bare eksisterer en ledig tidsluke i løpet av et tidsintervall på en time, vil den forventede ventetiden bli 30 minutter.

For alle analysene settes følgende to betingelser:

1. Togene fra hensetting skal ikke hindre eller forsinke øvrig togtrafikk. Det innebærer at alle togene på ruteplanen skal ha minst ett minutt buffer foran og bak seg. Innflettingen

av tog fra hensettingsanleggene skal aldri føre til at øvrig togtrafikk må bremse ned eller stoppe.

2. Togene fra hensettingsanlegget krysser det ene sporet og kjører inn på ventesporet så fort et tog har forlatt blokkstrekningen i retning mot synkende kilometer.

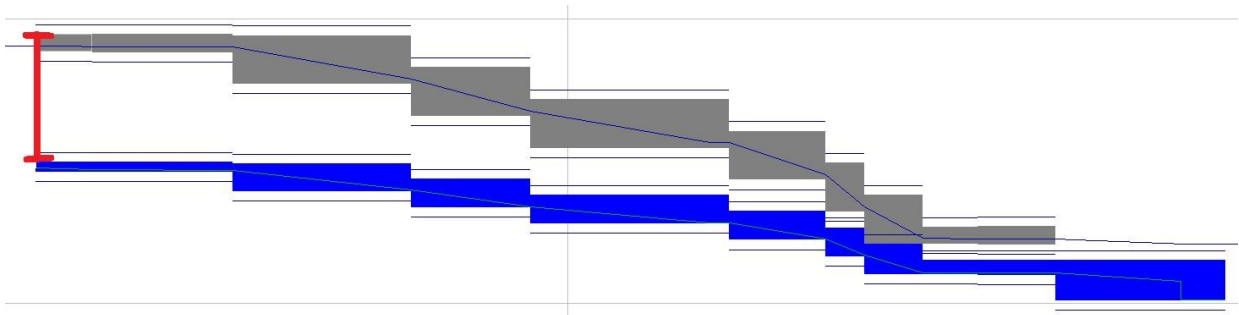
For analysene av to og tre tog fra hensetting og inn på dobbeltspor settes enda forutsetning, i tillegg til de overnevnte forutsetningene. Det forutsettes at tog nr. to fra hensetting kjører inn på ventesporet så fort det første toget har forlatt ventesporet, og tog nr. tre kjører inn på ventesporet så fort tog nr. to har forlatt ventesporet igjen. Denne forutsetningen innebærer at tog nr. to og tre fra hensetting alltid må vente minst tilsvarende tid som minste togfølgetid siden det etterfølgende toget ikke kan kjøre inn på dobbeltsporet samtidig som toget foran. I likhet med det første toget fra hensetting, kjører også andre og tredje tog fra hensetting inn på dobbeltsporet ved første tilgjengelige tidsluke.

For analysen av tog to og tog tre fra hensetting er gjennomsnittlig total innkjøringstid en viktig faktor. I denne oppgaven defineres gjennomsnittlig total innkjøringstid som gjennomsnittsverdien av tidspunktet når siste tog forlater ventesporet minus tidspunktet når første tog forlater ventesporet for det aktuelle analysescenariot. Total innkjøringstid forteller hvor lang tid det faktisk vil ta fra første tog fra hensetting kjører inn på ventesporet til siste tog forlater ventesporet. Om total innkjøringstid overstiger 60 minutter, er kapasitetsutnyttelsen for høy til at systemet takler at det gitte antallet tog fra hensetting kjører inn på dobbeltsporet per time. For bare ett tog fra hensetting er gjennomsnittlig total innkjøringstid lik den forventede ventetiden for tog 1.

For å kontrollere om togene fra hensetting kan bruke en ledig tidsluke, skyves hensettingstogets blokktrapp inn i den ledige tidsluken i LUKS. Om blokktrappen har plass i den ledige tidsluken samtidig som den første definerte betingelsen overholdes, kan tidsluken brukes.

Et tog fra hensetting som står oppstilt i ventesporet og venter på å kjøre inn på dobbeltsporet, vil trenge en tidsluke på minst 5 minutter og 44 sekunder mellom to InterCity-tog. Den oppgitte tidsluken inkluderer ikke buffertid. For at tog fra hensetting skal overholde første betingelse, trengs i tillegg 1 minutt buffer både foran og bak togene.

I tillegg til metoden med å skyve blokktrappene til togene fra hensetting inn i ledige tidsluker, er beregninger av minste togfølgetider et viktig verktøy for å kunne vurdere om en tidsluke kan brukes. Framgangsmåten for å finne minste togfølgetider ved hjelp av *blocking time model* er illustrert i figur 18, som viser et skjermbilde fra LUKS. Figuren viser et godstog (i grått) etterfulgt av et InterCity-tog (i blått). Den røde vertikale linjen til venstre i figuren viser hvor minste togfølgetid leses av. For å finne minste togfølgetid for den motsatte situasjonen, der et InterCity-tog etterfølges av et godstog, må rekkefølgen på togene endres, og minste togfølgetid får en annen verdi. Avleste minste togfølgetider for alle kombinasjoner av togtypene som brukes i denne oppgaven er vist i vedlegg 3.



Figur 16: Avlesning av minste togfølgetid fra LUKS

Et godstog etterfulgt av et InterCity-tog i infrastrukturmodellen, som illustrert i figur 18, har minste togfølgetid lik 12 minutter og 24 sekunder. Den motsatte situasjonen, et InterCity-tog etterfulgt av et godstog, har minste togfølgetid lik 4 minutter og 3 sekunder, dette innebærer at det ikke er plass til et godstog i et 5 minutters intervall mellom to InterCity-tog uten at det siste InterCity-toget må bremse ned noe for godstoget. I denne situasjonen er det ikke et alternativ å øke hastigheten for godstoget da det allerede går i 100 km/t, som er det maksimale tillatte for godstog på norske jernbanelinjer. I denne oppgaven er det valgt å bremse ned det siste InterCity-toget noe, basert på et ønske om å kunne overholde taktruteplaner med 15 minutters intervaller for InterCity-tog. Det på tross av at InterCity-toget har høyere prioritet enn godstoget.

De viktigste resultatene fra analysene er forventet ventetid, samt kapasitetsutnyttelse. Disse resultatene brukes til å vurdere om en påkoblingsløsning med kryss i plan med ventespor kan brukes i praksis. De ulike parameternes påvirkning på ventetiden analyseres gjennom en sensitivitetsanalyse.

Tiltak for å redusere forventet ventetid og kapasitetsutnyttelse

I oppgaven ble ulike tiltak som antas å redusere ventetiden og kapasitetsutnyttelsen testet. Tiltakene som ble testet i den forbindelse er halvering av blokk lengden, innføring av planskilt løsning og å ikke tillate godstog å trafikkere dobbeltsporet. Det ble analysert i hvor stor grad de ulike tiltakene påvirker kapasitetsutnyttelse og forventet ventetid.

Å halvere blokk lengden eller fjerne godstogene fra strekningen i høytrafikkperiodene er enkle tiltak som kan gi redusert ventetid og kapasitetsutnyttelse uten å være særlig kostbare. Disse tiltakene er mye billigere enn en planskilt løsning eller å bygge flere spor parallelt fra hensettingsanlegget og inn til nærmeste stasjon. Det er derfor interessant å se på hvor effektive disse tiltakene er. Er de effektive nok, er det kanskje ikke behov for å bygge planskilt løsning.

Uten godstog: Godstogene i infrastrukturmodellen holder en hastighet på 100 km/t, mens InterCity-togene og fjerntogene holder hastigheter på henholdsvis 200 og 250 km/t. Derfor vil godstogene ta opp mye kapasitet på strekningen. Som et tiltak for å redusere kapasitetsutnyttelsen og forventet ventetid for togene fra hensetting kan det derfor være aktuelt å ikke tillate godstog å trafikkere strekningen. Forbudet kan gjelde enten over hele dagen eller bare i høytrafikkperioden. Et slikt tiltak vil harmonisere farten og gi bedre kapasitetsutnyttelse på strekningen.

Halvert blokk lengde: Som et tiltak for å bedre kapasitetsutnyttelsen og redusere den forventede ventetiden på strekningen ble blokk lengden halvert til 2,5 km. Kortere blokk lengder muliggjør at togene kan kjøre tettere på dobbeltsporet, som igjen vil redusere kapasitetsutnyttelsen noe. For å oppnå en blokk lengde på 2,5 km ble infrastrukturmodellen endret slik at hovedsignalene på dobbeltsporet ble plassert med en avstand på 2,5 km.

Planskilt løsning: For analysen med planskilt løsning i stedet for kryss i plan med ventespor, ble det tatt utgangspunkt i sporveksler med 130 km/t i avvik. Denne sporvekselen ble valgt for at togene fra hensetting skal kunne akselerere før de kjører inn på dobbeltsporet.

Ved innføringen av planskilt løsning i stedet for kryss i plan, fjerner man den ene konflikten for togene fra hensetting. Ved å lede trafikken fra hensettingsanlegget over eller under det ene sporet på en bro eller i en tunnel, oppstår det ingen konflikter mellom togene fra hensetting og togtrafikken i retningen mot synkende kilometer. Med planskilt løsning trenger togtrafikken fra hensetting bare å ta hensyn til når det er ledige tidsluker på sporet de kjører inn på. Derfor er det heller ikke behov for å se på ulike vridninger av ruteplanene, siden innkjøringen bare er

avhengig av trafikken i den ene retningen. Det forventes at analysen med planskilt løsning vil gi lavere forventet ventetid da man ikke trenger å ta hensyn til kryssing av det første sporet.

For at denne situasjonen skal kunne sammenlignes med den opprinnelige situasjonen, ble den opprinnelige analysen utført en gang til med noe endrede forutsetninger. For den opprinnelige analysen ble det satt som en forutsetning at tog fra hensettingsanlegget kjører inn på ventesporer så fort et tog har forlatt den aktuelle blokkstrekningen i retning mot synkende kilometer. Denne forutsetningen strykes i den nye analysen. I stedet analyseres en tenkt situasjon der man ser på ventetiden for tog som forsøker å kjøre inn på ventesporer hvert minutt. Den totale ventetiden i denne situasjonen avhenger både av eventuell ventetid før toget kan kjøre inn på ventesporer, siden det ikke lenger er gitt at det eksisterer en ledig tidsluke for å krysse det første sporet, og selve ventetiden på ventesporer. Denne endringen er nødvendig for å få fram effekten av den planskulte løsningen. Uten denne endringen, vil resultatene fra situasjonen med kryss i plan bli identisk med resultatene fra situasjonen med planskilt løsning. For å effektivisere denne analysen noe, ses det denne gangen bare på en vridning av ruteplanene.

3.4 Casestudie av anleggene fra utredningen *Hensetting Østlandet*

Som en del av oppgaven har en casestudie blitt gjennomført for å vurdere løsningene som er foreslått i utredningen *Hensetting Østlandet* opp mot resultatene fra denne oppgaven. I tillegg til hensettingsutredningen brukes *Konseptdokumentet for InterCity-strekningene* som informasjonskilde for framtidige forhold på InterCity. I casestudien er hovedfokuset på tilbudskonseptene for 2050 for å forstå hvordan løsningene vil fungere i framtiden når togtetthetene planlegges til å bli høyere enn for dagens situasjon.

I prosjektoppgaven ble en dokumentanalyse av utredningen *Hensetting Østlandet* utført. Gjennom dokumentanalysen ble hensettingsanleggene som planlegges med kryss i plan med ventespor utpekt. Disse hensettingsanleggene danner grunnlaget for casestudiet. De aktuelle arealene for casestudiet er alle vist i tabell 7 under kapittel 4.3. De foreslåtte anleggene med kryss i plan ble studert opp mot resultatene fra denne oppgaven for å se om påkoblingsløsningene kan fungere i praksis gitt strekningens og hensettingsanleggets egenskaper.

Det vil ikke bli gjennomført en tradisjonell casestudie da ingen egen case skal modelleres. I stedet skal de aktuelle arealene fra hensettingsutredningen analyseres opp mot resultatene fra denne masteroppgaven. Strekningene med de aktuelle hensettingsarealene vil være forskjellig

fra modellstrekningen, men det antas at hovedtrekkene i resultatene i stor grad vil være overførbare.

Framtidig togtrafikk for de relevante banestrekningene i casestudien er basert på tilbudskonseptene fra *Konseptdokument for InterCity-strekningene* (Jernbaneverket, 2016c). Tilbudskonseptene viser ruteplanmessig togtrafikk basert på transportetterspørsel. For vurderingene i casestudiet benyttes tilbudskonseptene for 2050, for å teste om de foreslåtte løsningene kan fungere på lang sikt. Basert på resultatene fra denne studien, og gjeldende egenskaper for de aktuelle hensettingsarealene, klassifiseres anleggenes påkoblingsløsning som enten tilstrekkelig, delvis utilstrekkelig eller utilstrekkelig.

3.5 Vurdering av metode

Metoden i denne oppgaven har endret seg noe etter hvert som oppgaven har blitt omformulert og spisset gjennom arbeidsprosessen. Etter hvert som arbeidet med oppgaven har blitt utført, har økt kunnskap og forståelse om temaet ført til at noen ideer har blitt skrinlagt mens nye og bedre idéer ble gått videre med.

I utgangspunktet var det planlagt å gjennomføre simuleringer i LUKS for å studere situasjonen med kryss i plan som påkoblingsløsning for tog fra hensetting som kjører inn på dobbeltspor. En kapasitets- og ruteplanstudie viste seg imidlertid å være tilstrekkelig for å vurdere behovet for ventespor i modellinfrastrukturen, derfor ble den opprinnelige planen med å utføre simuleringer tilsidesatt. Studien som har blitt utført er i stedet en generell studie fra et overordnet perspektiv. En slik studie er et effektivt verktøy i en siliingsprosess for å få et inntrykk av når en løsning med kryss i plan generelt kan brukes. En simuleringsstudie kan heller utføres på detaljnivå når konkrete planer om strekningens utforming foreligger. På den måten kan en simuleringsstudie gi svar på om resultatene fra det overordnede studiet stemmer for reelle situasjoner på detaljnivå.

Gjennom arbeidsprosessen med denne oppgaven, da særlig gjennom modelleringen i LUKS, har flere forutsetninger og antagelser blitt satt. Flere av disse er subjektive forutsetninger og antagelser tatt på grunnlag av gjennomgått litteratur og eksisterende kunnskap. Forutsetningene for analysene ble gjennomgått i dette kapitlet, under delkapittel 3. Antagelsene omfatter blant annet parametere som er valgt i LUKS, og valg som er tatt for infrastrukturmodellen og dens elementer. Antagelsene kan gi en svakhet med tanke på etterprøving av resultatene da andre

kanskje tar andre valg underveis. Det kan føre til variasjoner i resultatene. Derfor er alle antagelser som er tatt i forbindelse med infrastrukturmodellen presisert og grunnlagt i kapittel 4.1.

Infrastrukturmodellen som benyttes i denne oppgaven er en forenkling av virkeligheten. Det medfører at resultatene i denne oppgaven ikke nødvendigvis vil vise hele bildet. Forenklingene er likevel nødvendige for å kunne studere egenskapene som er interessante i denne studien. På tross av modellens forenklinger vil det være mulig å observere trender i kapasiteten for de ulike analysescenarioene.

Analysene i denne oppgaven krevde en del manuell avlesning av blokktrapper, manuell komprimering av ruteplaner og manuell plotting av tidspunkter fra LUKS til Excel. Det kan føre til unøyaktigheter i resultatene, men det antas at denne feilkilden vil gi små avvik og derfor gi begrenset påvirkning på resultatet.

I denne oppgaven ble det valgt å studere en parameter om gangen. Denne framgangsmåten gir et godt estimat av effektene til hver enkel parameter ved faste betingelser for de andre parameterne.

Den ene definerte betingelsen for analysene er at togene fra hensettingsanlegget krysser det ene sporet og kjører inn på ventesporet så fort et tog har forlatt blokkstrekning i retning mot synkende kilometer. Ideelt sett kunne man studert en situasjon der tog fra hensetting forsøker å kjøre ut fra ventesporet mye oftere, for eksempel hvert minutt, i stedet for at man begrenser analysen til at tog kjører inn på ventesporet så fort et tog har forlatt blokkstrekning i retning mot synkende kilometer. Å analysere for hvert minutt ville gitt mer nøyaktige resultater for ventetidene på ventesporet. Hver hovedanalyse består av fem analysescenario, der hvert scenario igjen består av tolv ulike vridninger av ruteplanene. Om man hadde sett på en situasjon der tog kjører inn på ventesporet hvert minutt ville mengden data blitt mye større og hver analyse hadde tatt mer tid. Derfor ble det besluttet å forenkle situasjonen noe for at det skulle være mulig å komme i mål med analysene. De samme betingelsene er satt for alle hovedanalysene, resultatene er derfor sammenlignbare da den samme unøyaktigheten gjelder for alle analysene.

4. MODELLERING

I dette kapitlet presenteres prosessen med oppbyggingen av infrastrukturmodellen i LUKS. Her grunngis også valg som er tatt i forbindelse med infrastrukturmodellen og dens elementer. Deretter presenteres parameterne som antas å påvirke innflettingsprosessen for tog fra hensettingsanlegg og inn på dobbeltspor. Noen av parameterne er også nevnt i metodekapitlet. Til slutt presenteres arealene som er aktuelle for casestudien, i tillegg til framtidige tilbuds-konsepter for de relevante banestrekningene som betraktes i casestudien.

4.1 Oppbygging av infrastrukturmodellen i LUKS

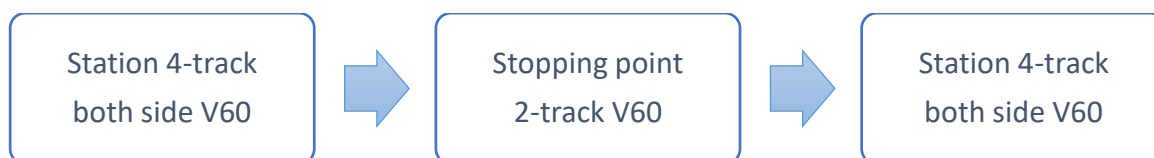
Masterdata

Når et nytt prosjekt lages i LUKS må et masterdataprofil velges for den opprettede databasen. Ifølge VIA Consulting & Development (2016) defineres masterdataprofilet som et sett av informasjon som danner grunnlaget for alle andre prosjektdata. Masterdataprofilet inneholder blant annet informasjon om togtyper og kommersielle tog, bremsetabeller, tilgjengelig trekkraft og tilhørende dynamiske egenskaper for kjøretøyene.

I dette studiet er et masterdataprofil kalt *JBV masterdata* brukt. Dette profilet er definert av Bane NOR og er tilpasset norske forhold. *JBV masterdata* inneholder blant annet informasjon om de vanligste norske togtypene og deres tilhørende egenskaper. Det har ikke blitt utført endringer i informasjonen fra masterdataprofilet.

Maler fra LUKS

LUKS inneholder flere standardiserte forhåndsdefinerte maler for stasjoner, det muliggjør dermed at hele stasjoner kan settes inn på en rask og effektiv måte ifølge VIA Consulting & Development (2016). I modellstrekningen er begge stasjonene bygd opp fra samme stasjonsmal, mens dobbeltsporet er bygd fra en strekningsmal. Figur 19 viser hvilke maler som er benyttet.

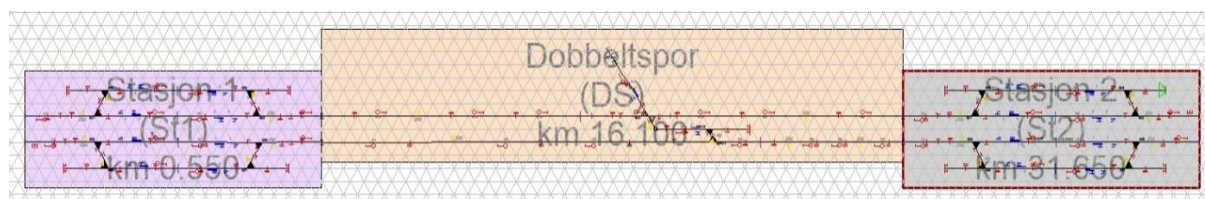


Figur 17: Forhåndsdefinerte maler fra LUKS

Malene ble kun brukt som et utgangspunkt, deretter ble flere infrastrukturelementer endret, fjernet eller tilført for å få analysestrekningen som ønsket. Det ble også satt inn et ventespor mellom dobbeltsporene, og sporet som leder til hensettingsanlegget ble tegnet. Profilnummer (km) ble også endret for å tilpasses modellen.

Hver av de tre strekningsdelene i infrastrukturmodellen plasseres innenfor en stasjonsgrense (*station boundary*). Innenfor stasjonsgrensene plasseres infrastruktur tilhørende den aktuelle stasjonen. Stasjonsgrensene vises som avgrensende firkanter rundt stasjonene og dobbeltsporet i figur 20. Kilometerangivelsen i figuren angir middel av hver stasjonsgrense. I modellstrekningen antas det en flat strekning, det er derfor ikke lagt inn gradient på strekningen.

Figur 20 viser hvordan modellstrekningen ble seende ut. Strekningen består av to stasjoner forbundet med et 30 km langt dobbeltspor.



Figur 18: Modellstrekning laget i LUKS

Stasjoner

I oppgaven antas det at InterCity-togene på strekningen er dobbeltsett av typen FLIRT Bm 74/75. Alle togene som kjører til og fra hensettingsanlegget er også FLIRT dobbeltsett med lengde 212 meter. Ifølge Jernbaneverket (2016c) skal InterCity-stasjoner planlegges med 350 m lange plattformer for å være tilpasset trippelsett. I modellen er sporene ved plattformene satt til 770 m, mens stasjonene i sin helhet er satt til 1100 m for at godstog på 750 m også skal kunne

bruke stasjonen. Dobbeltsporet er satt til 30 km. Dermed er analysestrekningen, som består av to stasjoner og mellomliggende dobbeltspor, totalt 32,2 km.

Liberation equipment (akselteller)

Ved ETCS nivå 2 melder hvert tog regelmessig inn sin egen posisjon og kjøreretning til signalanlegget, i tillegg gjøres togdeteksjon med akselteller eller sporfelt (Jernbaneverket, 2014). Ifølge Bane NOR (2017c) er akseltellere et system for togdeteksjon der aksler inn og ut av det aktuelle sporavsnittet detekteres og sammenlignes. Om antallet aksler inn er likt antallet aksler ut av sporavsnittet, detekteres sporavsnittet som fritt. Om antallet derimot ikke stemmer overens, detekteres sporavsnittet som belagt og er dermed blokkert for andre tog.

I infrastrukturmodellen plasseres både *route liberation equipment* (RLE) og *signal liberation equipment* (SLE) etter regler fra teknisk regelverk (Bane NOR, 2017c). SLE plasseres ved samme profilnummer som alle hovedsignaler, i tillegg settes de i bakkant av alle sporveksler for å markere slutt på togvegen. SLE er nødvendig for å detektere når toget har passert vekselen, dermed kan vekselen skifte retning og klargjøres for neste tog. Toget må ha passert SLE før signalet i bakkant kan frigis. RLE plasseres både i avviksporet og i hovedsporet etter en sporveksel. Toget må passere RLE før togveien kan frigis.

Normalt skal akseltellere også plasseres for å kunne håndtere avvikssituasjoner der tog kjører i motsatt retning av normalt. En slik situasjon kan for eksempel oppstå om det ene sporet er stengt for vedlikehold. Denne situasjonen modelleres ikke i oppgaven, infrastrukturen er derfor heller ikke bygd for å takle en slik avvikssituasjon.

Blokk lengder

Fra formel 8 og 9 presentert i kapittel 2 kan nødvendige blokk lengder beregnes. Beregningene er vist i vedlegg 2. Basert på beregningene ble det besluttet at blokk lengder på 5 km skulle benyttes i infrastrukturmodellen. Det innebærer at hovedsignalene på analysestrekningens dobbeltspor er plassert med 5 km mellomrom. I infrastrukturmodellen plasseres ikke forsignal da ERTMS fjerner behovet for dem siden lokfører mottar informasjon om kjøretillatelse og hastighet direkte i togets førerpanel.

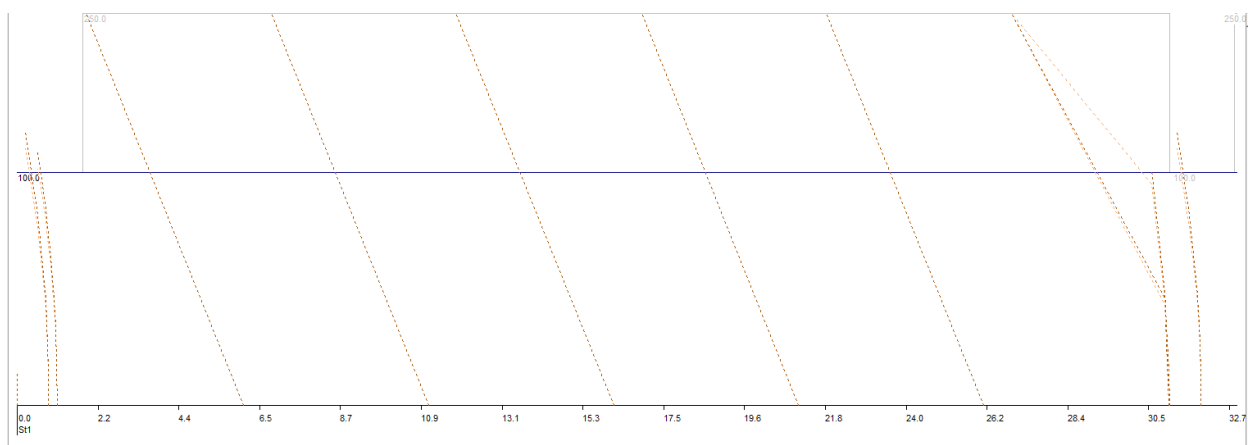
Linjehastighet og stasjonshastighet

For infrastrukturmodellen er linjehastigheten satt til 250 km/t som er dimensjonerende hastighet for InterCity. Hastigheten i avvik i sporvekslene på ventesporet er satt til 60 km/t etter diskusjoner med veileder. Denne hastigheten nås bare dersom toget kan krysse uproblematisk. Ved 60 km/t i avvik velges en 1:12-veksel med radius 500 m ifølge Bane NOR (2017b).

Ifølge Jernbaneverket (2016c) skal det være tillatt å kjøre i hastigheter mellom 200 og 250 km/t i hovedspor ved plattform forutsatt at sikkerhetskravene stilt i Teknisk regelverk er ivarettatt. Derfor settes hastigheten på stasjonsområdene til 250 km/t, tilsvarende som på dobbeltsporet.

Ifølge Jernbaneverket (2016c) kan kravet til gjennomgående hastighet reduseres for stasjoner der de fleste tog stopper. Siden dimensjonerende hastighet for godstog er 100 km/t, og man ønsker at godstog skal ha så få stopp som mulig underveis, bør nedre grense for hastighet gjennom stasjoner der de fleste tog stopper være 100 km/t.

For godstogene på strekningen velges *flying start*. Det vil si at godstogene både entrer og forlater analysestrekningen i sin maksimale hastighet på 100 km/t. Dette kan oppnås ved å definere en bestemt «oppførsel» ved første og siste stasjon. Godstogene skal ikke stoppe på noen av stasjonene, og kan derfor kjøre gjennom begge stasjonsområdene i sin maksimale hastighet. Hastighetsdiagrammet for denne situasjonen er presentert i figur 21. InterCity-togene og fjerntogene skal derimot stoppe på begge stasjonene, og må derfor akselerere fra full stopp til sin maksimale hastighet i starten av analysestrekningen, og retardere ned til full stopp ved slutten av analysestrekningen.



Figur 19: Hastighetsdiagram for *flying start* for godstog

Togtyper

Tabell 6 viser hvilke togtyper som trafikkerer analysestrekningen. Relevante egenskaper for hver togtype er også vist. Egenskapene for de enkelte togtypene er holdt konstante gjennom alle analysene utført i LUKS.

Tabell 6: Egenskaper for togene i infrastrukturmodellen

Togtype	Bm 74/75 IC-tog	Velaro fjerntog	EL19 godstog
Trekk	Motorvognsett	Motorvognsett	Lokomotiv m/vogner
Togtype valgt i LUKS	LPT	LDPT ICE	LDFT Godstog
Toglengde [m]	212	200	750
Masse [tonn]	484	436	1285
Maksimal hastighet [km/t]	200	350	140
Bremseposisjon	R + Mg	R + Mg	G
Bremseprosent	200	200	100

Togene som kjører fra hensettingsanlegget og inn på dobbeltsporet har de samme egenskapene som Flirt Bm 74/75 InterCity-togene.

Persontogene som ferdes på det norske jernbanenettet i dag kommer ikke opp i 250 km/t da de ikke har tilstrekkelig trekraft. Det er derfor valgt å bruke tog av typen Velaro for å modellere fjerntogene som skal kjøre 250 km/t. Det er fortsatt knyttet usikkerheter til hvilke tog som skal trafikere InterCity-strekningene i framtiden. Valget om å bruke togtypen Velaro i infrastrukturmodellen er utelukkende basert på at de kjører fort nok og muliggjør modellering av 250 km/t.

For fjerntogene var den opprinnelig planen å modellere for trippelsett ettersom InterCity legger opp til 350 m lange plattformer på stasjoner for å ta hensyn til framtidige behov og muliggjør for bruk av trippelsett i framtiden ifølge Jernbaneverket (2016c). Det er imidlertid fortsatt usikkerheter knyttet til når trippelsett faktisk vil bli nødvendig. Denne planen ble tilsidesatt da det viste seg at de norske togene ikke kan kjøre 250 km/t. Da ble det besluttet å bruke Velaro i stedet. Et enkelsett av typen Velaro er 200 m.

De maksimale hastighetene som er fylt inn i tabell 6 gjelder for de aktuelle togtypene som er brukt, ikke for forholdene som er planlagt for InterCity. Hastigheten som er oppgitt i tabellen er basert på trekraften for den aktuelle togtypen. Hastighetene togene skal kjøre i på strekningen begrenses av bestemmelser for linjehastigheter for InterCity. På InterCity planlegges det for 200 km/t for InterCity-persontog, inntil 250 km/t for fjerntog og 100 km/t for godstog skriver Jernbaneverket (2016c).

For godstogene velges en total tog lengde på 750 m som en langsiktig strategi for 2050. I 2016 publiserte Jernbaneverket en godsstrategi for jernbanen som sier at det skal dimensjoneres for tog lengder opptil 740 m for godstog. En standard på 740 m er i tråd med standarden for det Europeiske nettverket som Norge er en del av ifølge Jernbaneverket (2016b). Etter anbefalinger fra medveileder velges en masse på 1200 tonn for godstogets vogner. Godstogets totale masse blir da 1285 tonn, dette inkluderer lokomotivets masse på 85 tonn.

ERTMS og ETCS nivå 2

Infrastrukturmodellen er bygd med ETCS nivå 2 da InterCity-prosjektet har som mål å bruke ERTMS med ETCS nivå 2 som signalteknisk løsning ifølge Jernbaneverket (2016c). Valget av ERTMS som signalteknisk løsning i infrastrukturmodellen er derfor tilpasset framtidige forhold i Norge.

Ifølge Jernbaneverket (2014) er ETCS nivå 2 et digitalt radiobasert signalsystem der lokfører får informasjon om kjøretillatelse og hastighet direkte i togets førerpanel. Bruk av ETCS nivå 2 innebærer at signaler og hastighetsmerker langs sporet kan erstattes med signalkilt. Infrastrukturmodellen ble likevel bygget med konvensjonelle, optiske signaler da LUKS er beregnet for det. Funksjonen er imidlertid den samme.

I infrastrukturmodellen velges ETCS nivå 2 ved at elementet *ETCS start* for nivå 2 settes inn på strekningen i kjøreretningen. Elementet settes inn for begge kjøreretningene på dobbeltsporet, i tillegg settes det inn på sporet fra hensettingsanlegget.

Kjøretidssupplement

Landex and Kaas (2005) definerer kjøretidssupplement som forskjellen mellom den planlagte kjøretiden og den minste kjøretiden. Kjøretidssupplement øker robustheten til strekningen. I

infrastrukturmodellen defineres et kjøretidssupplement på 12 % for persontog og 10 % for godstog. Det benyttes et konstant grunntillegg på 3 %, mens det resterende kjøretidstillegget utgjør et robusthetstillegg. Kjøretidssupplementene er valgt basert på *Jernbaneverkets termer for beregning av framføringstid* fra Jernbaneverket (2016a).

Utforming av ventesporet

For hensettingsanlegg med kryss i plan anbefales det i utredningen *Hensetting Østlandet* tilretteleggelse av 250 meter lange av- og påkjøringsspor (Jernbaneverket et al., 2015a). Etter mailkorrespondanse mellom Anne Christine Handstanger og Trude Kristoffersen Anke, samt Arve Jørgen Hustadnes i Bane NOR 6.november 2017 kommer det fram at dette har blitt endret noe. Hustadnes skriver at de har planlagt ventespor på indre InterCity, og en løsning uten ventespor på ytre InterCity. Ifølge Samferdselsdepartementet (2016-2017) omfatter indre InterCity strekningene mellom Oslo og Hamar, Sarpsborg og Tønsberg, mens ytre InterCity omfatter strekningene mellom Oslo og Skien, Halden og Lillehammer.

Lengden av ventesporet på indre InterCity med dobbeltsett planlegges til:

$$220 \text{ m (togsettets lengde)} + 20 \text{ m (stopplengde)} + 10 \text{ m (siktlengde)} + 150 \text{ m (sikkerhetssone)} \\ = \mathbf{400 \text{ m}}$$

Det er også aktuelt å løse samtidigheten med dekningsveksler, da blir lengden av ventesporet:

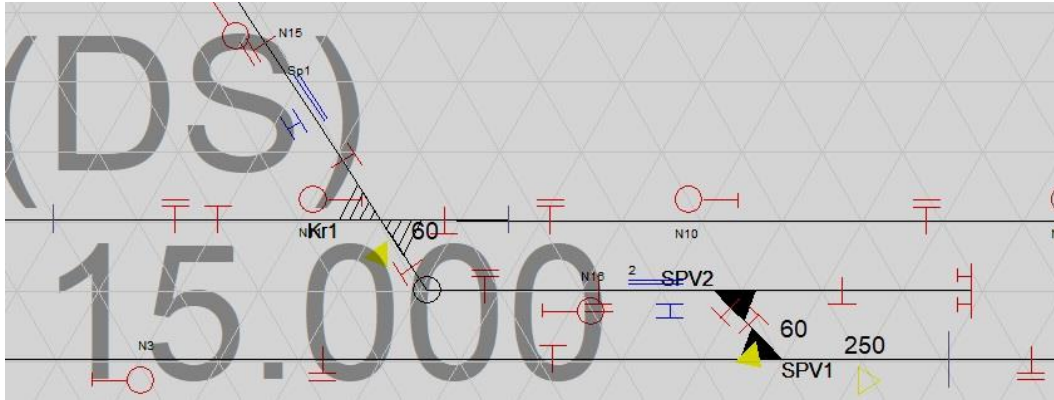
$$220 \text{ m (togsettets lengde)} + 30 \text{ m (stopplengde + siktlengde)} = \mathbf{250 \text{ m}}$$

En dekningsveksel er et sikkerhetstiltak som leder toget mot en sporstopper om det ikke rekker å bremse ned i tide. Bruken av dekningsveksler reduserer den nødvendige sikkerhetssonen, og muliggjør bruk av kortere ventespor.

Med trippelsett i stedet for dobbeltsett vil lengden av ventesporet bli 110 m lenger for å ta hensyn til lengden av ett ekstra togsett. For analysene i denne oppgaven antas det at det utelukkende kjøres dobbeltsett eller enkelsett til og fra hensettingsanlegget, dette valget ble tatt da en bestemt infrastruktur måtte defineres. Derfor vil de aktuelle lengdene for ventesporet bli 400 m eller 250 m for indre InterCity, mens det ikke vil bli nødvendig å analysere for ventespor for ytre InterCity. Ventesporet kunne også blitt bygd for trippelsett med små endringer i infrastrukturmodellen. Det vil gi noe lengre minste togfølgetider på grunn av det ekstra togsettet, ellers antas det at resultatene ville blitt tilsvarende.

I oppgaven antas det at hensettingsanlegget befinner seg på indre InterCity, derfor tegnes påkoblingen som kryss i plan med ventespor. I infrastrukturmodellen er det valgt å tegne ventesporet med dekningsveksler, derfor er ventesporet 250 m.

Figur 22 viser et skjermbilde fra infrastrukturmodellen for å bedre illustrere hvordan ventesporet er utformet i infrastrukturmodellen.



Figur 20: Ventesporløsningen i infrastrukturmodellen

Definerte togveier

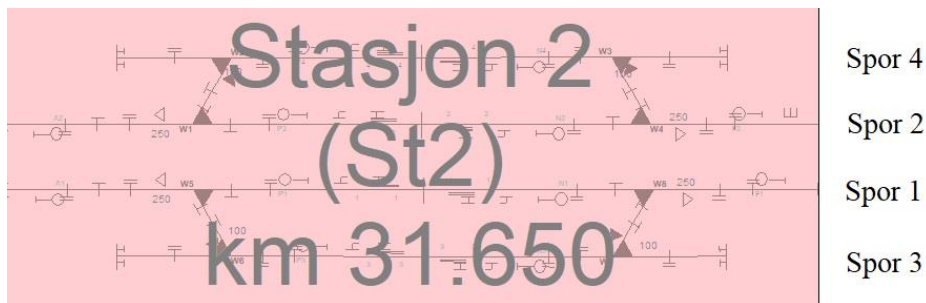
Da infrastrukturmodellen var ferdig bygd, ble aktuelle togveier for strekningen definert. En togvei vil si en måte et tog kan trafikere strekningen på. I denne oppgaven er fem ulike togveier definert, retningen er angitt i parentes:

- Fra stasjon 1 til stasjon 2 via hovedspor 1 (*Ascending*)
- Fra stasjon 1 til stasjon 2 via spor 3 (*Ascending*)
- Fra stasjon 2 til stasjon 1 via hovedspor 2 (*Descending*)
- Fra stasjon 2 til stasjon 1 via spor 4 (*Descending*)
- Fra hensettingsanlegget til stasjon 2 via hovedspor 1 (*Ascending*)

Togveiene som benytter hovedsporet hele vegen gjelder for både InterCity-tog og fjerntog som trafikkerer dobbeltsporet, mens togveiene som benytter spor 3 og 4 bare gjelder for godstog. Den femte og siste togveien gjelder kun for InterCity-tog fra hensettingsanlegget som kjører inn på dobbeltsporet.

Spornummereringen som er valgt i infrastrukturmodellen er illustrert i figur 23.

Nummereringen er identiske for stasjon 1 og stasjon 2.



Figur 21: Spornummereringen på stasjon 1 og 2

Stopposisjoner og stopptid

For alle de fire sporene på stasjonene er stopposisjoner for både persontog og godstog definert i begge retninger. Godstogene bruker imidlertid ikke sine stopposisjoner da de både entrer og forlater analysestrekningen i sin maksimale hastighet på 100 km/t. I tillegg er to stopposisjoner definert for persontog som kjører fra hensettingsanlegget og inn på dobbeltsporet. Den første stopposisjonen er definert før det første sporet krysses, mens den andre er definert på ventesporet før tog fra hensetting skal kjøre inn på dobbeltsporet.

For passasjertogene er stopptiden på stasjonene satt til minimum ett minutt for å ta hensyn til passasjerpåstigning eller -avstigning.

Ruteplan

Som nevnt i metodekapittelet er ruteplaner definert for alle analysene basert på prinsippet om taktruteplaner. I ruteplanene har InterCity-tog avganger hvert 60, 30 eller 15 min etter den sveitsiske modellen. Fjerntog og godstog plasseres i ledige tidsintervall mellom InterCity-togene. Hvert analysescenario har egne ruteplaner da antallet InterCity-tog økes med ett for hvert nytt analysescenario. Alle ruteplaner som ble benyttet i analysene er vist i vedlegg 4.

4.2 Parametere som påvirker innflettingsprosessen

Basert på litteraturstudiet ble flere parametere som påvirker innflettingsprosessen for tog fra hensettingsanlegg og inn på dobbeltspor identifisert. I dette delkapittelet beskrives hver parameter, og parameterens påvirkning på innflettingsprosessen forklares kort.

Antall tog fra hensetting som kjører inn på dobbeltsporet. Denne parameteren henger tett sammen med størrelsen på hensettingsanlegget. Hensettingsanlegget kan klassifiseres som lite (< 15 plasser), middels (15-30 plasser) eller stort (> 30 plasser). Dess større hensettingsanlegget er, dess større vil trafikken til og fra hensettingsanlegget bli. Inndelingen er basert på tabell 6 i utredningen *Hensetting Østlandet delrapport 3* (Jernbaneverket et al., 2015a).

Togmiks på dobbeltsporet. Er trafikken på dobbeltsporet ensartet eller blandet? Togmiksens påvirkning på kapasiteten illustreres av figur 9 i kapittel 2.

Kapasitetsutnyttelse på dobbeltsporet: Som vist i kapittel 2 anbefaler International Union of Railways (2013) en døgnkapasitet på 60 % og en timekapasitet i rushtiden på 75 % av den teoretiske kapasiteten for linjer med blandet trafikk. Kapasitetsutnyttelsen klassifiseres som lav (< 40 %), middels (ca. 40-60 %) eller høy (ca. 60 – 80 %). Dess høyere kapasitetsutnyttelsen på dobbeltsporet er, dess vanskeligere vil innflettingsprosessen bli da antallet aktuelle tidsluker reduseres som følge av økende kapasitetsutnyttelse.

Vridning av ruteplanene: I analysene studeres vridninger av ruteplanene for å finne ut hvilke vridninger som er mest og minst gunstige for ventetiden på ventespor. For hovedresultatene benyttes gjennomsnittlig ventetid for alle vridninger.

Blokk lengder: Nødvendige blokk lengder for infrastrukturmodellen ble beregnet etter metoden beskrevet i Teknisk regelverk (Bane NOR, 2018b). Beregningene er vist i vedlegg 2. Beregningen ga en nødvendig blokk lengde på 5 km. I analysene studeres innvirkningen av kortere blokk lengde på kapasitetsutnyttelsen og ventetiden.

Påkoblingsløsning: Består påkoblingsløsningen av kryss i plan med ventespor eller planskilt påkobling? En planskilt påkobling gir større fleksibilitet og opptar mindre strekningskapasitet. Ved planskilt løsning reduseres antallet konfliktpunkter da trafikken fra hensettingsanlegget enten ledes under det ene sporet i tunnel eller over det på bro.

Ruteplan: Trafikken fra hensettingsanleggene må flettes inn med den øvrige togtrafikken på linjen. Denne trafikken er et resultat av en ruteplan, og størrelsen på tidslukene vil avhenge av

typen ruteplan som er valgt (Bøe, 2017). Denne parameteren er tatt med gjennom at ruteplaner er definert for alle analysene.

Takting: Denne faktoren henger tett sammen med ruteplanen. I denne studien tas det utgangspunkt i taktruteplaner etter den sveitsiske modellen med avganger hvert 60, 30 eller 15 minutt. Man kunne også valgt å takte togene etter et annet mønster. For fire InterCity tog per time kunne man for eksempel valgt å ha avganger hver hele time, 10 minutter over hel, hver halvtime og 10 minutter over halv. Det ville gitt to store tidsluker som kunne blitt utnyttet til innfletting av tog fra hensetting. En slik takting gir imidlertid en opphoping av avganger, noe som er mindre passasjervennlig.

Minste togfølgetid: Minste togfølgetid for to tog er den minste tidsavstanden der det andre toget kan kjøre uhindret av det første ifølge Skartsæterhagen (1993). Denne parameteren er ivaretatt gjennom analysene i LUKS og blokktrappenes plassering i forhold til hverandre.

Linjehastighet: Har strekningen dimensjonerende hastighet på 250 km/t eller har den lavere hastighet? Hastigheten kan bli påvirket av nedbremsing i forbindelse med stopp på nærliggende stasjoner. Denne parameteren er i stor grad ivaretatt gjennom togmiksen der hastigheten for de ulike togtypene er bestemt fra *Konseptdokumentet for InterCity-strekningene*.

Utforming av ventesporet: Utformingen av ventesporet, da særlig ventesporets lengde i forhold til togsettets lengde, påvirker muligheten for å akselerere før innfletting på dobbeltspor. Ventespørøsløsningen som er modellert i infrastrukturmodellen er utformet slik Bane NOR planlegger å utforme ventesporene.

Toglengde: Minste togfølgetid vil påvirkes noe av toglengden. Dess lengre togene er, dess lengre vil minste togfølgetid bli. Dette kan også ses fra formel 3 presentert i kapittel 2. Påvirkningen er imidlertid liten og vil bare utgjøre noen få sekunder. Denne parameteren ses derfor bort fra i analysene.

Strekningens lengde dobbeltspor: I infrastrukturmodellen er dobbeltsporet 30 km, og ventesporet er plassert midt på. Strekningslengde kan også påvirke innflettingsprosessen. Om strekningen er så kort at togene ikke rekker opp til sin dimensjonerende hastighet før de passerer ventesporet, vil de okkupere blokkstrekningene i dette området over lenger tid, noe som vil gi vanskeligere forhold for innfletting. Ved kortere strekningslengde kan minste togfølgetid øke og størrelsen på de tilgjengelige tidslukene kan reduseres.

Rampelengde: Er oppkjøringsrampene lange nok til at togtrafikken fra hensetting rekker å akselerere før innkjøring på dobbeltsporet? Denne parameteren er bare aktuell for en planskilt løsning.

Sporvekseltype: For planskilt påkobling vil hastigheten ved fletting begrenses av hastigheten i avvik for sporvekslene som installeres i sporet. I denne oppgaven tas det utgangspunkt i sporveksler med 130 km/t i avvik for den planskilte løsningen. For kryss i plan vil sporvekselstørrelsen i påkoblingen ha liten betydning da togene starter fra ingen eller lav hastighet på ventespor.

De to siste parameterne; sporvekseltype og rampelengde, er kun aktuelle for planskilte løsninger, mens utforming av ventespor bare er aktuelt for kryss i plan med ventespor. Siden hovedfokuset i denne oppgaven er på kryss i plan, er de to siste parameterne utelukket fra analysene. De resterende parameterne påvirker innflettingsprosessen uansett hvilken påkobling som velges.

4.3 Casestudie

Framtidig togtrafikk i casestudien er basert på tilbudskonseptene fra *Konseptdokument for InterCity-strekningene*. Ifølge Jernbaneverket (2016c) er tilbudskonseptene primært utviklet som grunnlag for dimensjonering av infrastrukturen og skal ikke forstås som endelig beskrivelser av det fremtidige rutetilbudet på de respektive strekningene. Tilbudskonseptene viser kun ruteplanmessig togtrafikk basert på transportetterspørsel. For vurderingene i casestudiet benyttes tilbudskonseptene for 2050, for å teste om de foreslåtte løsningene kan fungere på lang sikt.

I dette delkapittelet presenteres de aktuelle arealene for casestudien, i tillegg til tilbudskonseptene for de relevante banestrekningene. Vurdering av påkoblingsløsningenes grad av tilstrekkelighet gjøres i resultatkapittelet.

Aktuelle arealer for casestudiet

I tabell 7 presenteres arealene fra utredningen *Hensetting Østlandet* som er aktuelle for casestudiet. Tabellen er et resultat fra dokumentanalysen som ble gjennomført som en del av prosjektoppgaven høsten 2017. For at arealene skal være aktuelle, betinges det at de har påkobling ved kryss i plan med ventespor i minst en ende. Ut i fra disse betingelsene ble elleve ulike arealer vurdert i casestudien. Tabellen viser de elleve arealene, foreslått påkoblingsløsning, antall hensettingsplasser som anleggene planlegges for og hvilken banestrekning arealet ligger ved.

Tabell 7: Aktuelle arealer for casestudiet. Basert på (Bøe, 2017)

Areal	Område	Anbefalt påkobling	Plasser	Banestrekning
Rishagen	Eidsvoll-Lillestrøm	Planskilt + kryss i plan	80	Gardermobanen
Borghyttholen	Eidsvoll-Lillestrøm	Planskilt + kryss i plan	80	Gardermobanen
Kjølstadskogen	Ski	Planskilt + kryss i plan	95	Østfoldbanen
Diling	Moss	Kryss i plan med ventespor	12	Østfoldbanen
Såstadsbogen	Moss	Kryss i plan med ventespor	12	Østfoldbanen
Valle	Fredrikstad – Sarpsborg	Kryss i plan med ventespor	30	Østfoldbanen
Tolpinrud	Hønefoss	Kryss i plan	45	Ringeriksbanen
Kleggen	Drammen	Kryss i plan	85	Gulskogen - Hokksund
Tuft	Drammen	Planskilt + kryss i plan	85	Gulskogen - Hokksund
Ryggkollen	Drammen	Kryss i plan	85	Gulskogen - Hokksund
Tønsberg nord	Tønsberg	Planskilt + kryss i plan	30	Vestfoldbanen

Tilbudskonsept for Dovrebanen/Gardermobanen

Rishagen ligger sør for Oslo Lufthavn langs Gardermobanen, her må man derfor også ta hensyn til Flytoget sine tog som vender på Oslo Lufthavn. Borghyttholen ligger nord for Gardermoen og sør for Eidsvoll, her kan man derfor utelukke Flytoget sine tog.

Fra flytogets nettsider, www.flytoget.no, fremkommer det at flytogets linjer F1, F2 og F1x har seks avganger i hver retning per time det meste av driftsdøgnet. For trafikkmengden i 2050 tas det utgangspunkt i dagens avganger for flytoget. I tillegg til denne informasjonen brukes tilbudskonseptet for Dovrebanen fra *Konseptdokument for InterCity-strekningene* for å finne den øvrige togtrafikken på Gardermobanen for 2050. Jernbaneverket (2016c) påpeker at togene som betjener Dovrebanen nord for Eidsvoll forutsettes å kjøres på Gardermobanen mellom Oslo og Eidsvoll. Dimensjonerende trafikkmengden for 2050 er vist i tabell 8.

Ifølge Jernbaneverket (2016c) kjøres det ordinært ikke godstog på Gardermobanen, da de trafikkerer Hovedbanen. Det ses derfor bort fra godstog i analysene for de to anleggene ved Gardermobanen.

Tabell 8: Tilbudskonsept 2050 for Dovrebanen/Gardermobanen (Jernbaneverket, 2016a)

Togtype	Til	Antall tog per time	Ruteplan
IC-tog	Hamar	1	Grunnrute
IC-tog	Lillehammer	2	Grunnrute
Regiontog	Eidsvoll	2	Grunnrute
Innsatstog IC	Hamar	1	Høytrafikkperiode
Godstog	Kjører ikke på Gardermobanen	-	Grunnrute
Fjerntog	Trondheim	1	Grunnrute og høytrafikk
Flytog	Oslo Lufthavn	6	Grunnrute og høytrafikk

Som tabell 8 viser skal tolv IC-/regiontog og ett fjerntog trafikkere Gardermobanen i høytrafikkperioden, mens elleve IC-/regiontog og ett fjerntog skal trafikkere Gardermobanen utenfor høytrafikkperioden. Flytogene regnes her som IC-/regiontog. Nord for Oslo Lufthavn

reduseres trafikkmengden til seks IC-/regiontog og ett fjerntog i høytrafikkperiodene og fem IC-/regiontog og ett fjerntog i grunnrute, da flytoget snur på Oslo Lufthavn.

Tilbudskonsept for Østfoldbanen

Tabell 9 viser tilbudskonseptet i 2050 for Østfoldbanen. Tilbudskonseptet brukes i vurderingene av Kjølstadskogen, Diling, Såstadskogen og Valle.

Tabell 9: Tilbudskonsept 2050 for Østfoldbanen (Jernbaneverket, 2016a)

Togtype	Til	Antall tog per time	Ruteplan
Regiontog	Moss	2	Grunnrute
IC-tog	Fredrikstad/Sarpsborg	2	Grunnrute
IC-tog	Halden	2	Grunnrute
Innsatstog IC	Moss	2	Høytrafikkperiode
Godstog	-	1	Grunnrute
Fjerntog	Göteborg	1	Grunnrute og høytrafikk

Som tabellen viser skal åtte IC-/regiontog og ett fjerntog trafikere Østfoldbanen i høytrafikkperioden, mens seks IC-/regiontog, ett fjerntog og ett godstog skal trafikere Østfoldbanen utenfor høytrafikkperioden.

Tilbudskonsept for Ringeriksbanen

Tabell 10 viser tilbudskonseptet i 2050 for Ringeriksbanen. Tilbudskonseptet brukes i vurderingen av Tolpinrud.

Tabell 10: Tilbudskonsept 2050 for Ringeriksbanen (Jernbaneverket, 2016a)

Togtype	Til	Antall tog per time	Ruteplan
Fjerntog	Bergen	1	Grunnrute og høytrafikk
Region/IC-tog	Hønefoss	4	Grunnrute

Som tabellen viser skal fire IC-/regiontog og ett fjerntog trafikere Ringeriksbanen per time. Lokaltogene mellom Hokksund og Hønefoss utelukkes fra analysene da de kjører på Randsfjordbanen forbi Tolpinrud. Ifølge Jernbaneverket (2016c) skal det ikke gå godstog på Ringeriksbanen Sandvika – Hønefoss ordinært, godstog utelukkes derfor fra analysene.

Tilbudskonsept for Gulskogen - Hokksund

Strekningen Gulskogen - Hokksund er en del av Sørlandsbanen, tilbudskonseptet er imidlertid basert på Bane NORs dimensjoneringsgrunnlag for Gulskogen-Kongsberg for 2040. Informasjonen er hentet fra *Kommunedelplan for dobbeltspor på Sørlandsbanen på strekningen Gulskogen - Hokksund* (Bane NOR og Norconsult AS, 2017). Tilbudskonseptet er vist i tabell 11, og brukes i vurderingen av Kleggen, Tuft og Ryggkollen.

Tabell 11: Tilbudskonsept 2040 for Gulskogen-Hokksund

Togtype	Til	Antall tog per time	Ruteplan
Regiontog	Kongsberg	2	Grunnrute
Innsatstog region	Kongsberg	2	Høytrafikk
Fjerntog	Kristiansand/Stavanger/Bergen	1	Grunnrute
Godstog		1	Grunnrute

Totalt skal 13 fjerntog trafikere strekningen per døgn. I analysene antas det at ett fjerntog trafikkerer strekningen per time.

Godstog er ikke tatt med i kommunedelplanen. Det antas at godstogtrafikken på strekningen er betydelig da godstogene på strekningen skal videre til Bergen og Ganddal godsterminal. I vurderingene tas det likevel utgangspunkt i bare ett godstog per time da situasjonen med flere godstog per time ikke er analysert i denne studien.

Som tabellen viser vil Gulskogen - Hokksund trafikeres av fire regiontog, ett fjerntog og ett godstog per time.

Tilbudskonsept for Vestfoldbanen

Tabell 12 viser tilbudskonseptet i 2050 for Vestfoldbanen. Tilbudskonseptet brukes i vurderingen av Tønsberg nord.

Tabell 12: Tilbudskonsept 2050 for Vestfoldbanen (Jernbaneverket, 2016a)

Togtype	Til	Antall tog per time	Ruteplan
IC-tog	Skien	2	Grunnrute
IC-tog	Sandefjord	2	Grunnrute
Innsats IC-tog	Porsgrunn/Skien	2	Høytrafikkperiode
Fjerntog	Kristiansand/Stavanger	1	Grunnrute og høytrafikk
Godstog	-	0/1	Grunnrute

På Vestfoldbanen kjøres det få godstog per døgn. Godstog utelukkes derfor fra analysene i høytrafikk, mens det antas ett godstog per time utenfor høytrafikkperiodene.

Som tabellen viser vil Vestfoldbanen trafikkeres av seks IC-/regiontog og ett fjerntog i høytrafikkperioder. Utenfor høytrafikkperioder skal Vestfoldbanen trafikkeres av fire IC-/regiontog, ett fjerntog og ett godstog.

5. RESULTATER

I dette kapittelet presenteres resultatene fra analysene av de forhåndsdefinerte scenarioene, samt resultatene fra sensitivitetsanalysen og casestudiet. Nøkkeltallene for alle analysene er i tillegg presentert i vedlegg 5. Resultatkapittelet er delt inn i sju delkapitler, ett for resultatene fra hver av de fem ulike analyse, ett for resultatene fra sensitivitetsanalysen og ett for vurderingene i casestudien.

5.1 Ett tog fra hensetting

Tabell 13 viser ruteplanene for alle de fem analysescenarioene. Ruteplanene oppgitt i tabellen viser situasjonen før første vridning av ruteplanen. I retningen mot stigende kilometer holdes ruteplanen slik som i tabell 13 gjennom hele analysen, mens vridninger på 5 til 55 minutter gjøres for ruteplanen i retningen mot synkende kilometer. Ruteplanene for alle analyser er i tillegg vist i vedlegg 4.

Tabell 13: Ruteplaner (ingen vridning) for alle scenarioene

Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5	
Tid	Tog	Tid	Tog	Tid	Tog	Tid	Tog	Tid	Tog
XX:00	IC	XX:00	IC	XX:00	IC	XX:00	IC	XX:00	IC
XX:15	Fjern	XX:05	Gods	XX:05	Gods	XX:05	Gods	XX:05	Gods
XX:30	IC	XX:20	Fjern	XX:15	IC	XX:15	IC	XX:15	IC
XX:40	Gods	XX:30	IC	XX:30	IC	XX:24	IC	XX:23	IC
		XX:45	IC	XX:40	Fjern	XX:30	IC	XX:30	IC
				XX:45	IC	XX:40	Fjern	XX:40	Fjern
						XX:45	IC	XX:45	IC
								XX:53	IC

Tabell 14 viser nøkkeltallene fra analysen av ett tog fra hensetting og inn på dobbeltsporet. Utnyttet kapasitet og forventet ventetid er beregnet for alle scenarioene. Tabellen viser også den aktuelle trafikksammensetningen og antallet tilgjengelige tidsluker per time.

Tabell 14: Nøkkeltall for analysen med ett tog fra hensetting

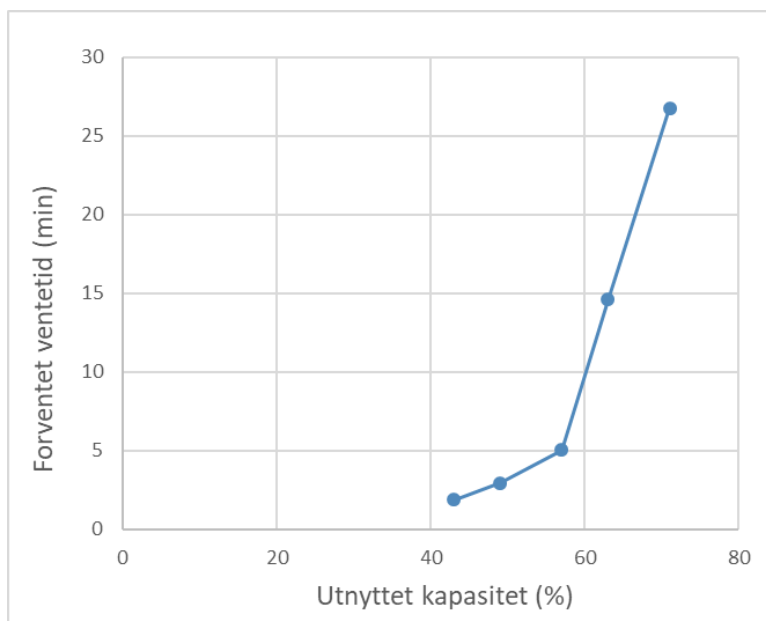
Scenario	IC-tog	Fjerntog	Godstog	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Antall tidsluker
1	2	1	1	43	1.9	3
2	3	1	1	49	2.8	4
3	4	1	1	57	5.1	3
4	5	1	1	63	14.6	2
5	6	1	1	71	26.8	1

I tabellen representerer antallet tidsluker de tidslukene som eksisterer i ruteplanen i løpet av en time som er store nok til at tog fra hensetting kan bruke de. Tilsvarende nøkkeltallstabeller er også laget for de andre utførte analysene. De andre tabellene er derimot ikke presentert i resultatgjennomgangen, men alle er vedlagt i vedlegg 5.

Som tabell 14 viser er det bare en tilgjengelig tidsluke for scenario 5. Denne tidsluken er mellom første InterCity-tog og godstoget. Luken oppstår som følge av at godstoget kjører mye saktere enn InterCity-toget. Ved hensettingsanlegget vil luken være stor nok til at tog fra hensetting kan bruke den. Luken kan ikke utnyttes på andre måter.

Ifølge ruteplanen er det ti minutter ledig tidsluke i scenario 5 mellom InterCity-toget som kjører klokken XX.30 og fjerntoget som følger etter klokken XX:40. Denne tidsluken kan imidlertid ikke brukes til tog fra hensetting da fjerntoget som kjører i 250 km/t tar inn på InterCity-toget som kjører i 200 km/t. Luken blir derfor mindre etter hvert som togene kjører, noe som resulterer i at tidsluken ikke blir stor nok til både kjøretid og buffertid for toget fra hensetting. Denne tidsluken kan derfor ikke utnyttes.

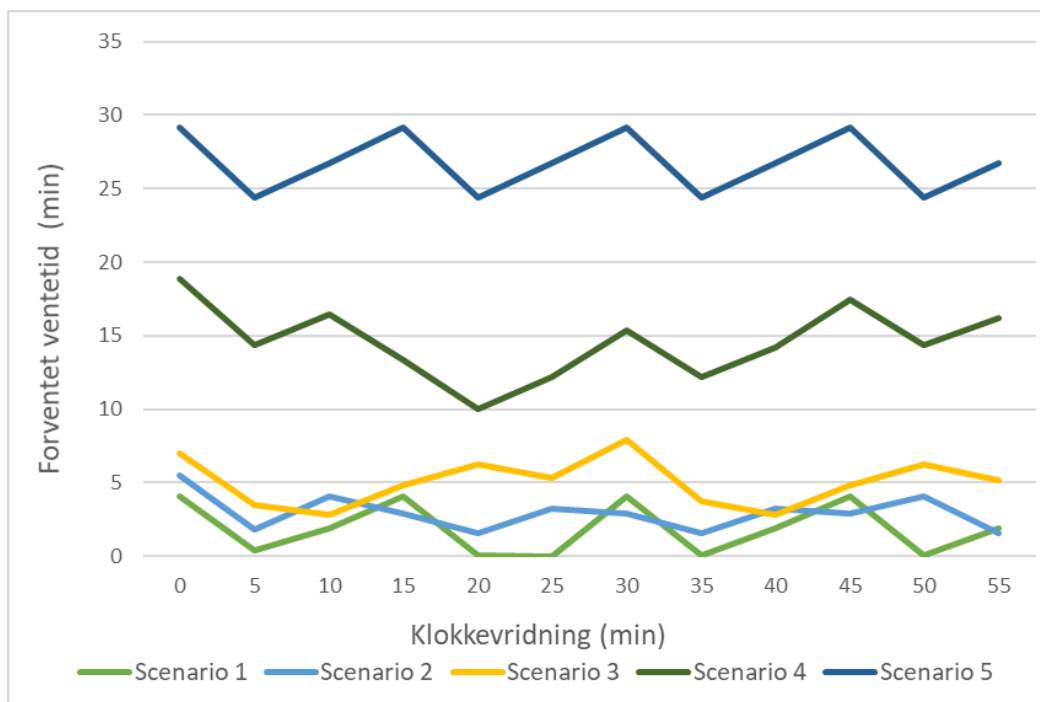
I figur 24 er sammenhengen mellom forventet ventetid og kapasitetsutnyttelse for situasjonen med ett tog fra hensetting fremstilt for alle de seks definerte scenarioene.



Figur 22: Sammenhengen mellom utnyttet kapasitet og forventet ventetid

Som figur 24 viser vil forventet ventetid ha moderat stigning fram til ca. 58 % kapasitetsutnyttelse, deretter vil den forventede ventetiden stige raskt.

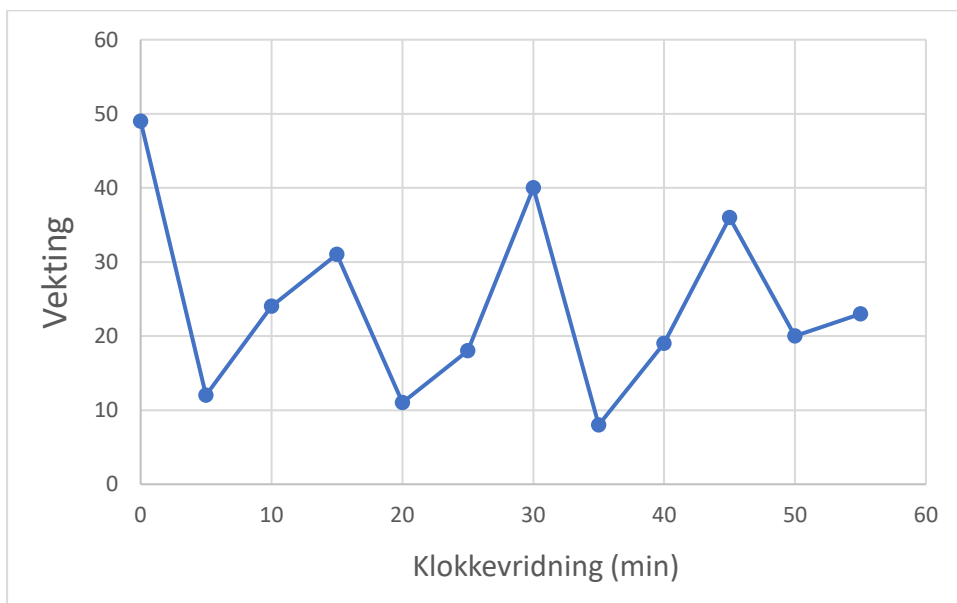
Som beskrevet i kapittel 3 har alle analyser blitt utført for vridninger av ruteplanen fra ingen vridning til 55 minutter vridning. Figur 25 viser forventet ventetid for hver vridning for ett tog fra hensetting og inn på dobbeltsporet.



Figur 23: Sammenhengen mellom vridning og ventetid

For scenario nr.1 gir den beste vridningen en reduksjon på hele 98 % i forventet ventetid i forhold til den verste vridningen. Reduksjonen i forventet ventetid avtar deretter gradvis for økende scenarionummer. For scenario nr. 5 gir den beste vridningen en reduksjon på 16 % i forventet ventetid i forhold til den verste vridningen. I gjennomsnitt for alle scenarioene gir den beste vridningen en reduksjon på 59,6 % i forventet ventetid i forhold til den verste vridningen.

For å finne ut hvilke vridninger som er mest ugunstige, vektet forsinkelsene for alle scenarioene. Resultatet av de vektete vridningene er vist i figur 26.

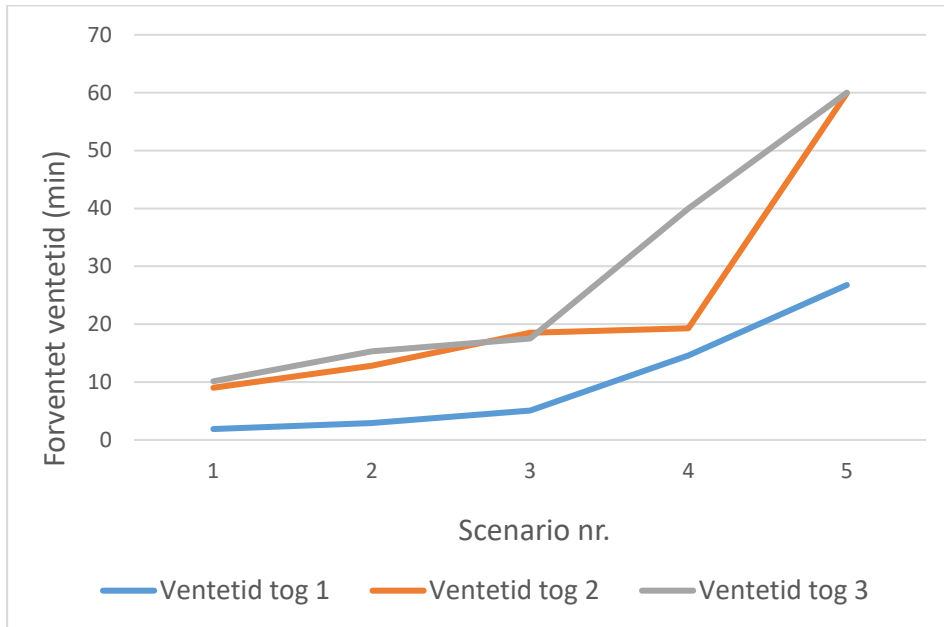


Figur 24: Vektet forsinkelse for ulike vridninger

Ut fra de vektete forsinkelsene ser man at den mest ugunstige vridningen er 0 min, altså ingen vridning. Ingen vridning (0 minutter) har vektet verdi lik 49, der 50 er maksimal vektet verdi. Den mest gunstige vridningen er 35 min, denne vridningen har en vektet verdi på 8.

5.2 To og tre tog fra hensetting per time

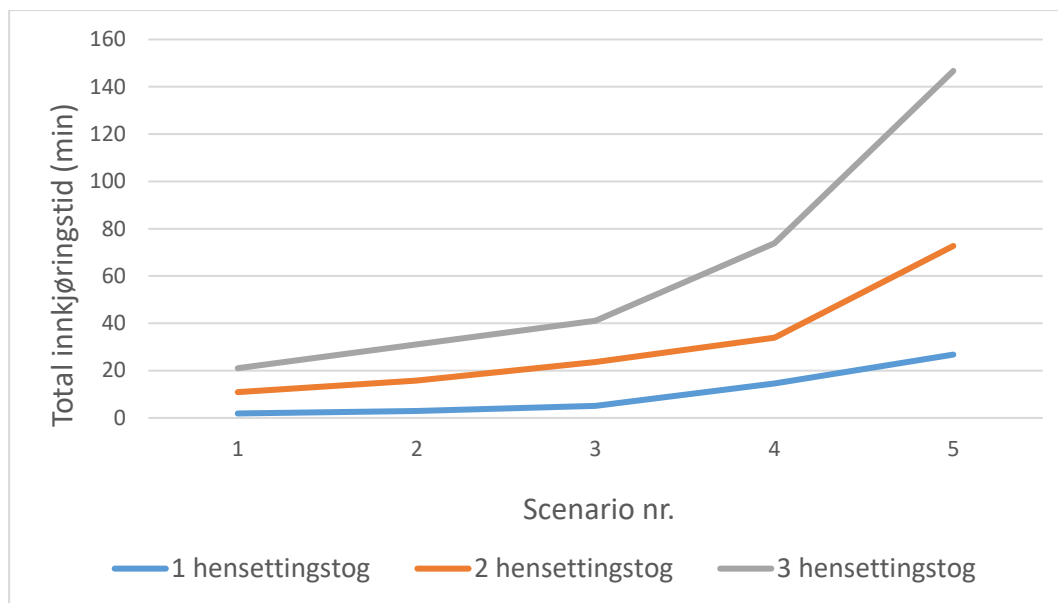
Forventede ventetider for første, andre og tredje tog fra hensetting er vist i figur 27.



Figur 25: Ventetider for ett, to og tre tog fra hensetting

Som figur 27 viser, vil den forventede ventetiden for andre og tredje tog fra hensetting være hele 60 min ved scenario nr. 5. Dette skyldes at det bare eksisterer en stor nok tidsluke per time ved scenario nr. 5.

For analysen av andre og tredje tog fra hensetting er gjennomsnittlig total innkjøringstid en viktig faktor. Resultatene fra beregningene av gjennomsnittlig total innkjøringstid for ett, to og tre tog fra hensetting er vist i figur 28.



Figur 26: Gjennomsnittlig total innkjøringstid for ett, to og tre tog fra hensetting

Som figur 28 viser, vil den totale innkjøringstiden for tre tog fra hensetting for scenario nr. 5 nærme seg 150 minutter, eller to en halv time. For scenario nr. 4 er også den totale innkjøringstiden over 60 minutter for tre tog fra hensetting.

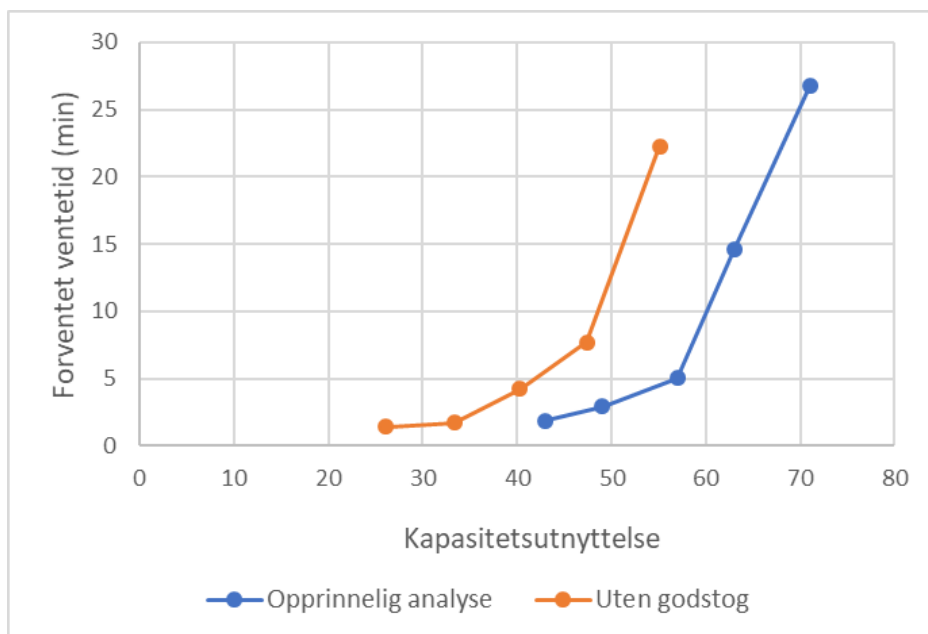
For scenario 1, 2 og 3 kan de tre togene fra hensetting kjøre inn på dobbeltsporet uten at den totale tidsbruken overstiger en time.

5.3 Uten godstog

Uten godstog på strekningen har ruteplanen blitt endret noe siden trafikksammensetningen endres. Ruteplaner for analysene uten godstog er også vedlagt i vedlegg 4, sammen med de andre ruteplanene.

For situasjonen uten godstog består scenario nr. 1 av to InterCity-tog og ett fjerntog. Deretter økes antallet InterCity-tog til scenario nr. 5 med seks InterCity-tog og ett fjerntog. Situasjoner med mer enn seks InterCity-tog per time analyseres ikke da det ikke eksisterer store nok ledige tidsluker i de definerte ruteplanene i denne situasjonen.

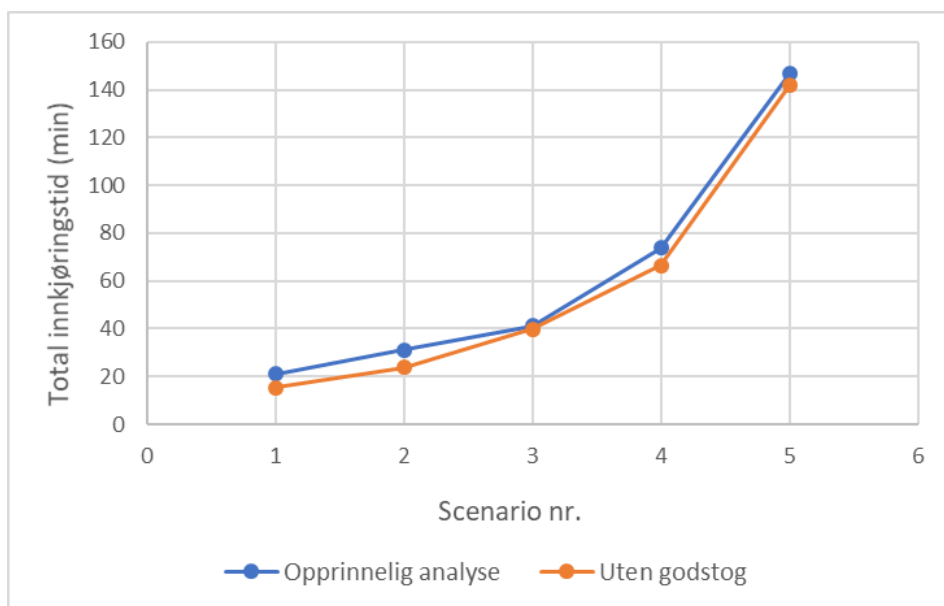
Figur 29 viser en sammenligning av kapasitetsutnyttelsen og den forventede ventetiden for situasjonen med godstog (opprinnelig analyse) og for situasjonen uten godstog.



Figur 27: Sammenligning av opprinnelig analyse og analysen uten godstog

Som figur 29 viser vil både kapasitetsutnyttelsen og forventet ventetid reduseres betraktelig for situasjonen uten godstog sammenlignet med den opprinnelige analysen. Når godstogene fjernes fra strekningen, reduseres kapasitetsutnyttelsen i gjennomsnitt med 29,6 %, mens forventet ventetid i gjennomsnitt reduseres med 29,0 %.

Sammenligning av total gjennomsnittlig innkjøringstid for tre tog fra hensetting for situasjonen uten godstog og med godstog er vist i figur 30. Innkjøringstiden reduseres i gjennomsnitt med 13,5 % for situasjonen uten godstog i forhold til situasjonen med godstog.

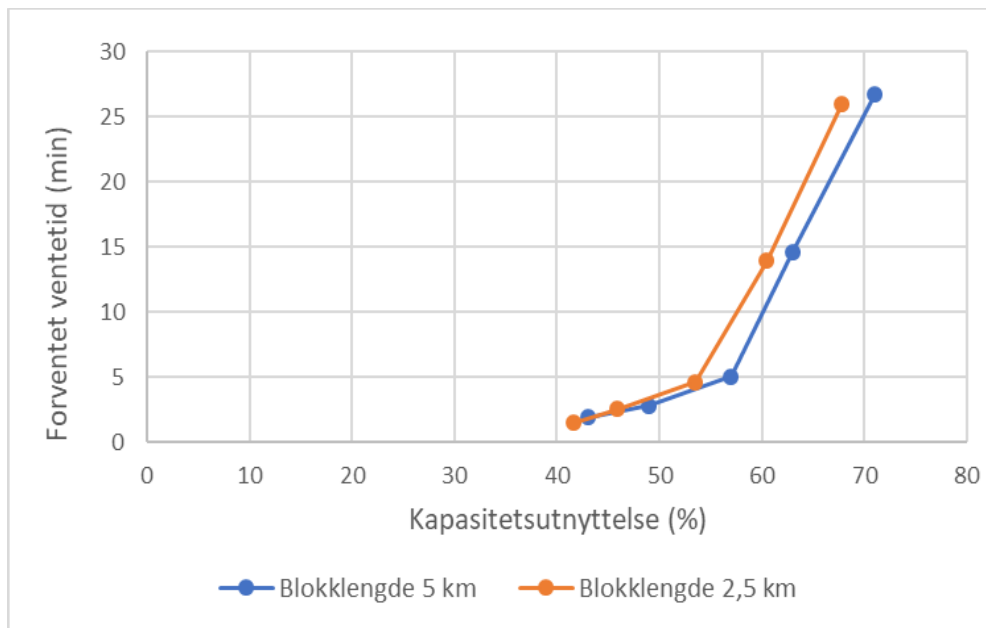


Figur 28: Total innkjøringstid for tre tog fra hensetting

5.4 Halvert blokk lengde

I analysen med halvert blokk lengde brukes identiske ruteplaner som for den opprinnelige analysen slik at de to situasjonene skal være sammenlignbare.

Figur 31 viser en sammenligning av kapasitetsutnyttelsen og forventet ventetid for den opprinnelige analysen og for situasjonen med halvert blokk lengde.



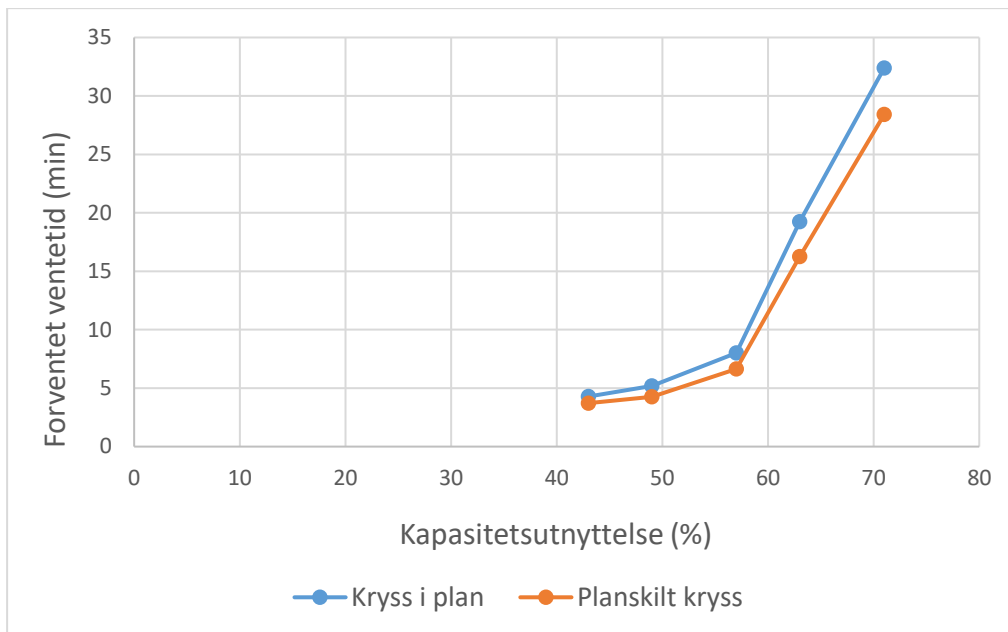
Figur 29: Sammenligning av blokk lengde på 5 km og 2,5 km

Når blokk lengden reduseres fra 5 km til 2,5 km, reduseres kapasitetsutnyttelsen i gjennomsnitt med 2,7 % mens forventet ventetid reduseres med 9,6 %.

5.5 Planskilt løsning

Fra ruteplankomprimeringen i LUKS ble det beregnet at tog fra hensetting trenger en tidsluke på 5 minutter og 12 sekunder for innfletting ved bruk av planskilt løsning. Ved kryss i plan trengs til sammenligning en tidsluke på 5 minutter og 44 sekunder. Togene sparer derfor 32 sekunder per innfletting ved bruk av planskilt løsning i forhold til kryss i plan.

Figur 32 viser hvordan forventet ventetid og kapasitetsutnyttelse for situasjonen med planskilt løsning er i forhold til for situasjonen med kryss i plan.



Figur 30: Planskilt kryss i forhold til kryss i plan

Ved å innføre planskilt løsning i stedet for kryss i plan vil den forventede ventetid få en gjennomsnittlig reduksjon på 15,2 %. Kapasitetsutnyttelsen på dobbeltsporet vil forbli den samme som tidligere.

5.6 Sensitivitetsanalyse

En sensitivitetsanalyse ble utført for å finne svar på hvilke faktorer ventetiden er mest følsom for. I sensitivitetsanalysen vurderes de fem tidligere nevnte parameterne; antall tog fra hensetting per time, togmiks på dobbeltspor, kapasitetsutnyttelse, blokk lengde og påkoblingsløsning. Parameterne vurderes gjennom studerte tiltak tilhørende de aktuelle parameterne. Reduksjonen i kapasitetsutnyttelse og i forventet ventetid beregnes deretter for de studerte tiltakene. Den opprinnelige analysen er hele tiden sammenligningsgrunnlaget for å finne reduksjonen i kapasitetsutnyttelsen og i forventet ventetid. Alle de studerte tiltakene og deres effekter er basert på de allerede presenterte resultatene fra de tidligere delkapitlene.

Endringene beregnes ved både lav og høy kapasitetsutnyttelse, der skillet mellom de to kategoriene defineres ved 50 % kapasitetsutnyttelse.

Å redusere trafikkmengden på dobbeltsporet og å halvere blokk lengden er to veldig forskjellige tiltak, de kan derfor ikke sammenlignes direkte. Det gjelder også for de øvrige tiltakene. Utslaget av de ulike tiltakene studeres likevel.

Tabell 15 viser en oversikt over parameterne, de studerte tiltakene og utslaget i kapasitetsutnyttelse og i forventet ventetid.

Tabell 15: Resultater fra sensitivitetsanalysen

Parameter	Studert tiltak	Reduksjon i kapasitetsutnyttelse		Reduksjon i forventet ventetid	
		Lav utnyttelse	Høy utnyttelse	Lav utnyttelse	Høy utnyttelse
Antall tog fra hensetting per time	Ett tog mindre fra hensetting per time	7.9 %	7.8 %	45.1 %	36.5 %
Togmiks på dobbeltspor	Godstog fjernet fra ruteplanen	33.5 %	23.6 %	27.1 %	32.0 %
Kapasitetsutnyttelse på dobbeltspor	Ett InterCity-tog mindre i timen	7,0 %	7,3 %	38.9 %	55.4 %
Blokk lengde	Halvert blokk lengde	2.2 %	3.1 %	16.2 %	5.2 %
Påkoblingsløsning	Planskilt løsning	-	-	15.6 %	15.0 %

Parameterens påvirkning på ventetiden rangeres deretter fra 1 til 5, der 1 er den parameteren som har mest påvirkning og 5 er den parameteren med minst påvirkning. Rangeringen er kun basert på reduksjonen i forventet ventetid, ikke på reduksjonen i kapasitetsutnyttelse. Rangeringen er vist i tabell 16.

Tabell 16: Rangering av analyseparametere

Parameter	Studert tiltak	Rangering
Kapasitetsutnyttelse på dobbeltspor	Ett InterCity-tog mindre i timen	1
Antall tog fra hensetting per time	Ett tog mindre fra hensetting per time	2
Togmiks på dobbeltspor	Godstog fjernet fra ruteplanen	3
Påkoblingsløsning	Planskilt løsning	4
Blokk lengde	Halvert blokk lengde	5

5.7 Casestudie

I casestudien gjøres en vurdering av hvor mange tog fra hensetting og inn på dobbeltsporet påkoblingsløsningen bør dimensjoneres for basert på hensettingsanleggets størrelse. Grunnleggende informasjon om de ulike hensettingsanleggene presenteres kort. Basert på tilbudskonseptene som ble presentert i kapittel 4.3 gjøres en vurdering av hvor stor kapasitetsutnyttelsen for de aktuelle dobbeltsporene vil bli. Deretter analyseres anleggene for å finne ut om kryss i plan som påkoblingsløsning kan fungere. Vurderingene i casestudien er basert på resultatene fra denne studien.

Som et av hovedkriteriene for om anlegget kan fungere eller ikke, brukes gjennomsnittlig total innkjøringstid. Gjennomsnittlig total innkjøringstid er lik gjennomsnittsverdien av tidspunktet når siste tog forlater ventesporet, minus tidspunktet når første tog forlater ventesporet for det aktuelle analysescenarioet. Total innkjøringstid forteller hvor lang tid det faktisk vil ta fra første tog fra hensetting kjører inn på ventesporet til siste tog forlater ventesporet. Om total innkjøringstid overstiger 60 minutter, er kapasitetsutnyttelsen for høy til at systemet takler at det gitte antallet tog fra hensetting kjører inn på dobbeltsporet per time.

I tillegg brukes kapasitetsutnyttelsen på dobbeltsporet og de forventede ventetidene for togene fra hensetting som vurderingskriterier. Om kapasitetsutnyttelsen overstiger 75 % i høytrafikkperioder og 60 % utenfor høytrafikkperioder er kapasitetsutnyttelsen større enn UICs anbefalinger for linjer med blandet trafikk (International Union of Railways, 2013). Det er ønskelig å unngå at kapasitetsutnyttelsen på dobbeltsporet, inkludert togene fra hensettingsanlegget som kjører inn på strekningen, overstiger anbefalingene til UIC. Det settes også et kriterium for den forventede ventetiden på ventesporet. Om de forventede ventetidene for ett

eller flere av togene fra hensetting overstiger 30 min, vurderes ventetiden som for lang til at systemet fungerer.

De tre kriteriene for casestudiene er også presentert i tabell 17.

Tabell 17: Vurderingskriterier for casestudien

Forventet ventetid	≤ 30 min
Kapasitetsutnyttelse	≤ 75 %
Gjennomsnittlig total innkjøringstid	≤ 60 min

I resten av dette kapittelet gjennomgås hvert hensettingsanlegg med hensyn på resultatene fra kapasitets- og ruteplanstudiet.

Rishagen

Plassering: 3 km nord for Lillestrøm langs Gardermobanen.

Påkoblingsløsning: På grunn av geografiske forhold er Rishagen tegnet med planskilt løsning i sørenden og kryss i plan i nordenden, selv om Rishagen ideelt sett burde hatt planskilt løsning også nordover ifølge Jernbaneverket et al. (2015a). Anlegget er også tilpasset en eventuell løsning der trafikk fra hensettingsanlegget føres inn på et nytt dobbeltspor for Hovedbanen mot Lillestrøm.

Antall plasser: Planlegges for 80 hensettingsplasser, som innebærer at det har plass til 40 dobbeltsett. Påkoblingsløsningen bør kunne takle tre eller flere tog fra hensetting og inn på strekningen per time.

Trafikkmengde: Tolv IC-/regiontog og ett fjerntog i høytrafikkperioden, og elleve IC-/regiontog og ett fjerntog utenfor høytrafikkperioden.

Vurdering: I analysene utført i denne oppgaven har ikke situasjoner med mer enn seks InterCitytog i timen blitt analysert fordi det da ikke har eksistert store nok tidsluker i de valgte ruteplanene. Uavhengig av hvordan ruteplanene defineres vurderes det som svært vanskelig å flette inn tog fra hensetting om trafikken på dobbeltsporet allerede består av tolv eller tretten tog per time. Med denne trafikkmengden vil man også overstige UIC sine anbefalinger om 75 %

kapasitetsutnyttelse i høytrafikk for linjer med blandet trafikk. Det konkluderes derfor med at påkoblingsløsningen for Rishagen ikke er tilstrekkelig, med mindre trafikken fra hensettingsanlegget føres inn på et nytt dobbeltspor for Hovedbanen mot Lillestrøm.

Borghyttholen

Plassering: Ca. 8 km nord for Gardermoen langs Gardermobanen.

Påkoblingsløsning: Planskilt løsning i sørenden og kryss i plan med ventespor i nordenden.

Antall hensettingsplasser: I likhet med Rishagen, planlegges også Borghyttholen for 80 hensettingsplasser og bør derfor kunne takle tre eller flere tog fra hensetting og inn på strekningen per time.

Trafikkmengde: Seks IC-/regiontog og ett fjerntog per time i høytrafikkperioden, dette tilsvarer scenario nr. 5 fra analysen uten godstog. Utenfor høytrafikkperioden består trafikken på strekningen av fem IC-/regiontog og ett fjerntog. Dette tilsvarer scenario nr. 4.

Kapasitetsutnyttelsen, ventetidene og den gjennomsnittlige totale innkjøringstiden for høytrafikkperioder og grunnrute forbi Borghyttholen er vist i tabell 18.

Tabell 18: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Borghyttholen

Høytrafikkperiode	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	55 %	22 min	22 min
Andre tog	66 %	59 min	82 min
Tredje tog	73 %	60 min	142 min
Grunnrute			
Første tog	47 %	8 min	8 min
Andre tog	59 %	29 min	36 min
Tredje tog	66 %	30 min	66 min

Vurdering: Som tabell 18 viser er det bare situasjonen med ett tog fra hensetting som oppfyller alle de tre vurderingskriteriene for høytrafikkperioden. For to og tre tog fra hensetting overstiger

også total innkjøringstid og forventet ventetid de definerte grenseverdiene. I høytrafikkperioden takler systemet derfor bare ett tog fra hensetting per time. I grunnrute er situasjonen vesentlig bedre. Da er det bare total innkjøringstid for situasjonen med tre tog fra hensetting som overstiger den definerte grenseverdien. I grunnrute takler derfor systemet to tog fra hensetting per time.

Med tanke på anleggets størrelse, burde påkoblingsløsningen taklet tre eller flere tog fra hensetting per time. Basert på forutsetningene som er satt for denne casestudien ser ikke Borghyttollen ut til å takle mer enn ett eller to tog fra hensetting i timen om kryss i plan velges som påkoblingsløsning. Det er imidlertid viktig å merke seg at anlegget planlegges med planskilt løsning i en ende, det kan medføre at anlegget likevel kan takle flere tog fra hensetting per time.

Kjølstadskogen

Plassering: Arealet ligger 3,2 km sør for Ski stasjon langs Østfoldbanen.

Påkoblingsløsning: Planskilt løsning i en ende og kryss i plan i andre enden.

Antall hensettingsplasser: Planlegges for 95 hensettingsplasser. På grunn av anleggets størrelse, bør systemet takle at tre eller flere tog fra hensetting kjører inn hver time.

Trafikkmengde: Seks IC-/regiontog, ett fjerntog og ett godstog i grunnrute, dette tilsvarer scenario nr. 5 fra analysen uten godstog. Åtte IC-/regiontog og ett fjerntog per time i høytrafikkperiodene.

Kapasitetsutnyttelsen, ventetidene og den gjennomsnittlige totale innkjøringstiden for denne situasjonen er vist i tabell 19.

Tabell 19: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Kjølstadskogen

Grunnrute	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	71 %	22 min	22 min
Andre tog	79 %	59 min	73 min
Tredje tog	86 %	60 min	147 min

Vurdering: Som tabell 19 viser, vil bare situasjonen med ett tog fra hensetting oppfylle alle de tre definerte vurderingskriteriene. For de to andre situasjonene overstiger alle tre kriteriene de definerte grenseverdiene. I grunnrute vil systemet bare takle ett tog fra hensetting. Det er ikke nok for et anlegg av denne størrelsen.

I analysene har ikke situasjoner med mer enn seks InterCity-tog i timen blitt analysert. Uavhengig av hvordan ruteplanene defineres, framstår det som vanskelig å flette inn tog fra hensetting om trafikken på dobbeltsporet allerede består av ni tog per time. Med ni tog per time vil man også overstige UIC sine anbefalinger om 75 % kapasitetsutnyttelse i høytrafikk for linjer med blandet trafikk. Kjølstadskogen planlegges imidlertid med planskilt løsning i en ende, noe som kan bedre forholdene for innfletting av tog fra hensetting noe.

Diling og Såstadskogen

Plassering: Langs Østfoldbanen henholdsvis ca. 3,2 km og 4,5 km sør for Moss stasjon.

Påkoblingsløsning: Kryss i plan med ventespor til ny InterCity-trasé.

Antall hensettingsplasser: Både Diling og Såstadskogen er planlagt for tolv hensettingsplasser, det innebærer at arealene har plass til seks dobbeltsett. Med seks dobbeltsett vil det antagelig ikke være realistisk at mer enn ett til to dobbeltsett kjører ut fra hensettingsanlegget per time.

Trafikkmengde: Fire av de åtte IC-/regiontogene som kjører på Østfoldbanen i høytrafikk-perioder vil snu i Moss, trafikken forbi Diling og Såstadskogen vil derfor reduseres til fire IC-/regiontog og ett fjerntog per time, samt ett godstog per time utenfor høytrafikk-periodene. Dette tilsvarer scenario nr. 3 i analysen med godstog.

Kapasitetsutnyttelsen, ventetidene og den gjennomsnittlige totale innkjøringstiden for denne situasjonen er vist i tabell 20.

Tabell 20: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Diling og Såstadskogen

Grunnrute	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	57 %	5 min	5 min
Andre tog	64 %	19 min	24 min
Tredje tog	73 %	18 min	41 min

Vurdering: Som tabell 20 viser, vil alle situasjonene oppfylle de definerte kriteriene. Det framstår derfor som relativt uproblematisk å flette inn tog fra hensetting ved Diling og Såstadsbogen. Grunnet anleggets beskjedne størrelse, er det antagelig ikke realistisk at tre tog fra hensetting kjører inn på dobbeltsporet per time. Om dette likevel skulle bli aktuelt, ser påkoblingsløsningen ut til å takle også denne situasjonen godt.

Valle

Plassering: 9,3 km fra Sarpsborg stasjon og 5,8 km fra Fredrikstad stasjon på Østfoldbanen.

Påkoblingsløsning: Kryss i plan med ventespor i begge ender.

Antall hensettingsplasser: Planlagt for 30 hensettingsplasser, det vil si at anlegget har plass til 15 dobbeltsett. På grunn av anleggets størrelse bør dobbeltsporet forbi Valle kunne takle opptil tre tog fra hensetting per time.

Trafikkmengde: I likhet med de to forrige anleggene, vil trafikken forbi Valle reduseres til fire IC-/regiontog, ett fjerntog og ett godstog per time da flere av togene på Østfoldbanen snur i Moss. Dette tilsvarer også scenario nr. 3 i analysen med godstog som er vist i tabell 20. Om to av InterCity-togene på strekningen skal snu i Fredrikstad og ikke i Sarpsborg, vil trafikken forbi Valle reduseres ytterligere til to InterCity-tog, i tillegg til ett fjerntog og ett godstog per time.

Situasjonen med to InterCity-tog, ett fjerntog og ett godstog er vist i tabell 21:

Tabell 21: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Valle

Grunnrute	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	43 %	2 min	2 min
Andre tog	50 %	9 min	11 min
Tredje tog	57 %	10 min	21 min

Vurdering: Kapasitetsutnyttelsen og ventetiden for scenario 3 blir tilsvarende som vist i tabell 20 for Diling og Såstadsbogen. I likhet med situasjonen for Diling og Såstadsbogen, bør det være relativt uproblematisk å flette inn opptil tre tog fra hensetting per time.

Situasjonen med bare to InterCity-tog per time er vist i tabell 21. Denne situasjonen er enda mer gunstig for innfletting av tog fra hensettingsanlegget, da alle tilfellene vist i tabellen er langt unna å overstige de definerte kriteriene. For Valle konkluderes det derfor med at kryss i plan med ventespor er en egnet påkoblingsløsning.

Tolpinrud

Plassering: 1,2 km fra Hønefoss stasjon. Per i dag ligger anlegget ved den enkeltsporede Randsfjordbanen, men dette vil endre seg etter utbyggingen av den nye Ringeriksbanen. Det skal bygges 40 km med dobbeltsporet jernbane mellom Sandvika og Hønefoss med dimensjonerende hastighet 250 km/t (Bane NOR, 2016e).

Påkoblingsløsning: Kryss i plan. Ifølge Bane NOR (2015) vurderes det som krevende å få til et 250 m langt ventespor her, det er derfor mest aktuelt å bygge påkoblingen uten ventespor. Situasjonen uten ventespor er ikke analysert i denne studien, men Tolpinrud sammenlignes likevel med de eksisterende resultatene.

Antall hensettingsplasser: Planlegges for 45 hensettingsplasser. På grunn av anleggets størrelse bør påkoblingen kunne takle tre eller flere tog fra hensetting per time.

Trafikkmengde: Med fire IC-/regiontog og ett fjerntog per time, som vist i tilbudskonseptet for Ringeriksbanen, tilsvarer denne situasjonen scenario nr. 3 fra analysen uten godstog.

Kapasitetsutnyttelsen, ventetidene og den gjennomsnittlige totale innkjøringstiden for dette scenarioet er vist i tabell 22.

Tabell 22: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Tolpinrud

Grunnrute	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	40 %	4 min	4 min
Andre tog	50 %	17 min	21 min
Tredje tog	59 %	19 min	40 min

Vurdering: Som tabellen viser er kapasitetsutnyttelsen relativt lav, og for alle situasjonene overholdes de definerte kriteriene for casestudien. Mangelen på ventespor kan imidlertid

vanskeliggjøre situasjonen en del. Uten ventespør må tog fra hensetting ha ledige tidsluker i begge retninger samtidig for at innkjøringen skal kunne skje. Det antas derfor at påkoblingen vil takle opptil to tog fra hensetting per time. Situasjonen med tre tog fra hensetting vurderes som vanskelig uten ventespør. Den foreslåtte påkoblingsløsningen vurderes derfor som utilstrekkelig for et såpass stort anlegg.

Kleggen og Ryggkollen

Plassering: Begge anleggene ligger vest for Drammen, derfor forutsetter de bygging av dobbeltspor mellom Gulskogen og hensettingsanlegget for å oppnå ønsket kapasitet. I 2015 besluttet regjeringen at det skal planlegges utbygging av dobbeltspor på strekningen fra Gulskogen til Hokksund for hastigheter mellom 160 og 200 km/t (Bane NOR, 2016c).

Påkoblingsløsning: Både Kleggen og Ryggkollen er planlagt med kryss i plan med ventespør. Ifølge Jernbaneverket et al. (2015a) bør anlegg av denne størrelsen ha planskilt påkobling. Det vurderes imidlertid som krevende å bygge planskilt påkobling for disse anleggene.

Antall hensettingsplasser: Både Kleggen og Ryggkollen planlegges for 85 hensettingsplasser. Anleggene bør kunne takle tre eller flere tog fra hensetting og inn på dobbeltsporet per time.

Trafikkmengde: Fire regiontog, ett fjerntog og ett godstog skal trafikkere strekningen per time i høytrafikkperiodene. Dette tilsvarer scenario nr. 3 fra analysen med godstog. Utenfor høytrafikkperiodene reduseres antallet regiontog til to tog per time, dette tilsvarer scenario nr. 1 fra analysen med godstog.

Kapasitetsutnyttelsen, ventetidene og den gjennomsnittlige totale innkjøringstiden for de aktuelle scenarioene er vist i tabell 23.

Tabell 23: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Kleggen og Ryggkollen

Høytrafikkperiode	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	57 %	5 min	5 min
Andre tog	64 %	19 min	24 min
Tredje tog	73 %	18 min	41 min
Grunnrute			
Første tog	43 %	2 min	2 min
Andre tog	50 %	9 min	11 min
Tredje tog	57 %	10 min	21 min

Vurdering: Som tabellen viser oppfylles de definerte kriteriene for alle situasjonene med opptil tre tog i timen fra hensetting både i grunnrute og høytrafikkperioder. På grunn av hensettingsanleggets størrelse bør påkoblingen også takle mer enn tre tog i timen fra hensetting. Det kan bli særlig vanskelig i høytrafikkperioden, men også i grunnrute vil dette medføre problemer. I tillegg bør påkoblingen takle mer enn ett godstog per time på strekningen da Gulskogen – Hokksund er en viktig godslinje for gods til Ganddal og Bergen. Kryss i plan med ventespor vurderes derfor som utilstrekkelig for situasjoner med mer enn tre tog fra hensetting per time. Påkoblingsløsningen vurderes heller ikke som tilstrekkelig ved mer enn ett godstog per time på strekningen.

Tuft og Tønsberg nord

Plassering: Tuft ligger ca. 9,2 km sør for Drammen stasjon, mens Tønsberg nord ligger langs dobbeltspor ca. 3 km nord for Tønsberg. Begge anleggene ligger ved Vestfoldbanen. Dagens Vestfoldbane har veldig varierende standard og har bare korte strekninger med dobbeltspor. I nasjonal transportplan for 2014-2023 er det en målsetning at Vestfoldbanen skal ha sammenhengende dobbeltspor innen 2030 (Bane NOR). Dermed vil også et eventuelt anlegg ved Tuft ligge ved dobbeltspor i framtiden.

Påkoblingsløsning: Både Tuft og Tønsberg nord planlegges med planskilt påkobling i en ende og kryss i plan i den andre enden.

Antall hensettingsplasser: Tuft planlegges for 85 hensettingsplasser, for et såpass stort hensettingsanlegg bør anlegget kunne takle tre eller flere tog inn på dobbeltsporet per time. Tønsberg nord planlegges for 30 hensettingsplasser, dvs. 15 dobbeltsett. På grunn av anleggets størrelse bør dobbeltsporet forbi Tønsberg nord kunne takle opptil tre tog fra hensetting per time.

Trafikkmengde: Seks IC-/regiontog og ett fjerntog i høytrafikkperioder. Dette tilsvarer scenario nr. 5 fra analysen uten godstog. Utenfor høytrafikkperioder trafikkeres Vestfoldbanen av fire IC-/regiontog, ett fjerntog og ett godstog. Dette tilsvarer scenario nr. 3 fra analysen med godstog.

Kapasitetsutnyttelser, forventede ventetider og total innkjøringstid for begge situasjonene er vist i tabell 24.

Tabell 24: Kapasitet, ventetid og innkjøringstid for Tuft og Tønsberg nord

Høytrafikkperiode	Kapasitetsutnyttelse	Forventet ventetid	Total innkjøringstid
Første tog	55 %	22 min	22 min
Andre tog	66 %	59 min	82 min
Tredje tog	73 %	60 min	142 min
Grunnrute			
Første tog	57 %	5 min	5 min
Andre tog	64 %	19 min	24 min
Tredje tog	73 %	18 min	41 min

Vurdering: Som tabellen viser vil gjennomsnittlig total innkjøringstid og forventet ventetid overgå de definerte grenseverdiene både for to og tre tog fra hensetting i høytrafikkperioden. I grunnrute er derimot alle de tre situasjonene innenfor de definerte grensene. I høytrafikkperiodene takler anleggene ett tog fra hensetting.

Basert på størrelsen til hensettingsanlegget på Tuft, burde påkoblingen her taklet minst tre tog i timen fra hensetting. I grunnrute takler påkoblingen opptil tre tog i timen fra hensetting, med flere enn tre tog vil kapasitetsutnyttelsen overstige den definerte grenseverdien. Kryss i plan med ventespor vurderes derfor som utilstrekkelig for den antatte trafikkmengden fra hensetting

og på dobbeltsporet for Tuft. Hensettingsanlegget planlegges imidlertid med planskilt løsning i en ende, noe som kan bedre situasjonen.

Tønsberg nord er en del mindre, men burde likevel taklet opptil tre tog per time. I grunnrute vurderes påkoblingen derfor som tilstrekkelig, mens den vurderes som utilstrekkelig i høytrafikkperiodene. I likhet med Tuft planlegges også Tønsberg nord med planskilt løsning i en ende. Det kan medføre at påkoblingen også blir tilstrekkelig i høytrafikkperioder.

5.8 Sammendrag og konklusjon for casestudien

Tabell 25 viser et sammendrag av resultatene fra casestudien. I tabellen har de ulike anleggene fått fargekoder som representerer påkoblingsløsningens grad av tilstrekkelighet. I tabellen er anleggene med rød bakgrunn vurdert som utilstrekkelige, anleggene med gul bakgrunn er vurdert som delvis utilstrekkelige og anleggene med grønn bakgrunn er vurdert som tilstrekkelige.

Tabell 25: Konklusjon for casestudien

Anlegg	Vurdering av tilstrekkelighet
Rishagen	Trafikkmengden forbi Rishagen består av tolv eller tretten tog per time. Selv med eventuell planskilt løsning i begge ender vurderes påkoblingsløsningen som tilstrekkelig. Om trafikken fra hensettingsanlegget derimot føres inn på et nytt dobbeltspor for Hovedbanen, kan påkoblingen kanskje fungere.
Borghytholen	Takler ett tog fra hensetting per time i høytrafikkperioden og to tog i grunnrute gitt kryss i plan. Planlegges imidlertid med planskilt løsning i en ende, det kan medføre at systemet takler flere tog fra hensetting.
Kjølstadskogen	Takler bare ett tog fra hensetting i grunnrute. Innfletting kan ikke skje i høytrafikk. Har imidlertid planskilt i en ende, det kan bedre forholdene noe.
Diling, Såstadskogen og Valle	Relativt uproblematisk å flette inn opptil tre tog fra hensetting per time. Alle de definerte kriteriene oppfylles. Kryss i plan med ventespør vurderes som en god løsning for disse anleggene.
Tolpinrud	Påkoblingen mangler ventespør, det kan vanskeliggjøre innflettingen. Antar likevel at dobbeltsporet kan takle opptil 2 tog per time fra hensetting. Påkoblingsløsningen vurderes likevel som utilstrekkelig for et så stort anlegg.

Kleggen og Ryggkollen	Påkoblingen vil ikke takle mer enn tre tog fra hensetting og mer enn et godstog per time på strekningen. Vurderes som utilstrekkelig for den antatte trafikkmengden fra hensetting og på dobbeltsporet.
Tuft	Takler ett tog fra hensetting i høytrafikkperiodene, og tre i grunnrute. Burde taklet flere med tanke på hensettingsanleggets størrelse. Vurderes som utilstrekkelig for den antatte trafikkmengden fra hensetting og på dobbeltsporet. Planlegges imidlertid med planskilt løsning i en ende, det kan bedre situasjonen noe.
Tønsberg nord	Takler ett tog fra hensetting i høytrafikkperiodene, og tre i grunnrute. I grunnrute vurderes dette som tilstrekkelig. I høytrafikk er påkoblingsløsningen utilstrekkelig. Planlegges imidlertid med planskilt løsning i en ende, det kan bedre situasjonen.

6. DISKUSJON

I dette kapittelet diskuteres resultatene presentert i kapittel 5, samt gjennomføringen av oppgaven. Først gis en gjennomgang og tolkning av resultatene fra delkapittel 5.1 til 5.5, deretter diskuteres resultatene fra sensitivitetsanalysen og fra casestudien. Til slutt diskuteres resultatenes pålitelighet og anvendbarhet.

6.1 Gjennomgang og tolkning av presenterte resultater

Ett tog fra hensetting

Resultatene viser at forventet ventetid for ett tog fra hensetting har moderat stigning fram til ca. 58 % kapasitetsutnyttelse, deretter vil den forventede ventetiden stige raskt (figur 24 i delkapittel 5.1). Dette stemmer overens med UIC 406 som sier at forsinkelsen normalt vil øke mye når utnyttelsen overstiger 60 % for linjer med blandet trafikk, som gjennomgått i delkapittel 2.1. Resultatene stemmer også overens med teorien om forsinkelser og trafikklaster fra Schwanhäußer (1974) som sier at når trafikklaster på en strekning øker, øker forsinkelsene eksponentielt som respons. Når den utnyttede kapasiteten nærmer seg den teoretiske kapasiteten, går forsinkelsene mot uendelig.

Resultatene viser at fram til ca. 60 % kapasitetsutnyttelse er den forventede ventetiden under 5 minutter, mens forventet ventetid stiger til nærmere 30 minutter ved ca. 70 % kapasitetsutnyttelse. Det kan derfor se ut som kryss i plan med ventespore er mest egnet for strekninger med maksimalt 60 % kapasitetsutnyttelse.

Alle analyser ble utført for vridninger av ruteplanene fra ingen vridning til 55 minutters vridning da det ble antatt at vridning av ruteplanene har påvirkning på ventetiden. I gjennomsnitt for alle scenarioene gir den beste vridningen en reduksjon i forventet ventetid på 59,6 % i forhold til den verste vridningen.

I den vektete analysen ble det vist at den mest ugunstige vridningen av ruteplanen er 0 min, altså ingen vridning, mens den mest gunstige vridningen er 35 min. Generelt viste resultatene at en vridning på 0, 15, 30 eller 45 minutter gir lange ventetider, mens vridninger på 5, 20 eller 35 minutter ser ut til å gi de laveste ventetidene. Da ventesporet er plassert midt på det 30 km lange dobbeltsporet, vil tog som starter samtidig fra hver sin stasjon passere ventesporet samtidig. Det vil føre til lange ventetider for togtrafikken fra hensettingsanlegget som først

trenger ledig tidsluke i en retning for å kjøre inn på ventesporet og deretter en ny tidsluke i den andre retningen for å kjøre inn på strekningen. Ruteplanene er basert på den sveitsiske modellen for taktruteplaner med avganger enten hvert 60., 30. eller 15. minutt, derfor vil den samme situasjonen oppstå for vridninger av ruteplanene på 15, 30 eller 45 minutter. Situasjoner der trafikken i de to retningene møtes ved ventesporet samtidig bør unngås dersom ventetiden for tog fra hensetting skal reduseres.

To og tre tog fra hensetting per time

Situasjonen der to og tre tog fra hensettingsanlegget kjører inn på dobbeltsporet per time ble analysert for å se om påkoblingsløsningen kan takle denne situasjonen. Hensettingsanleggene som analyseres i utredningen *Hensetting Østlandet* planlegges for mellom 12 og 95 hensettingsplasser, de må derfor dimensjoneres for at flere enn ett tog kan kjøre ut fra hensettingsanlegget og inn på dobbeltsporet per time.

Gjennomsnittlig total innkjøringstid brukes som et vurderingskriterium for hvor mange tog per time fra hensetting påkoblingsløsningen takler. Om total innkjøringstid overstiger 60 minutter, er kapasitetsutnyttelsen for høy til at systemet takler at det gitte antallet tog fra hensetting kjører inn på dobbeltsporet per time. I kapittel 5 ble det vist at den gjennomsnittlige totale innkjøringstiden for det andre toget fra hensetting overstiger 60 minutter for scenario nr. 5, mens gjennomsnittlig total innkjøringstid for det tredje toget fra hensetting overstiger 60 minutter for både scenario nr. 4 og 5. I disse scenarioene er kapasitetsutnyttelsene henholdsvis 79 og 86 %.

Siden kapasitetsutnyttelsen beregnes ved komprimeringsmetoden inkludert trafikken fra hensetting, vil kapasitetsutnyttelsen øke med økende antall tog fra hensetting per time. Det forventes derfor at både forventet ventetid og gjennomsnittlig total innkjøringstid vil øke med økende antall tog fra hensetting per time. Et tog fra hensetting utgjør ca. 8 % av kapasitetsutnyttelsen i infrastrukturmodellen. Ved planlegging av hensettingsanlegg er det viktig å ta hensyn til at også hensettingstogene bruker av den ledige kapasiteten. Om flere tog fra hensetting skal kunne kjøre inn på dobbeltsporet per time, bør ikke kapasitetsutnyttelsen på strekningen overstige UICs anbefalinger.

Figur 27 fra kapittel 5.2, som viser ventetidene for ett, to og tre tog fra hensetting, viser at kurvene følger eksponentiell vekst som forventet, men med ett unntak. Ventetiden for scenario nr. 4 for situasjonen med to tog fra hensetting ligger en del lavere enn forventet, og gir en tydelig

uregelmessighet i figuren. Ellers er ventetidsutviklingen som forventet; ventetiden er sterkt stigende med økende kapasitetsutnyttelse.

Det forventes at kurvene ville blitt glattere ved bruk av klokkevriddinger for hvert minutt og analyser av flere ruteplaner for hvert scenario. Begrensningene i analysen har betydning for hvordan resultatene blir, og begrensningene gir noen avvik fra forventede verdier. Analysen er utført på basis av en definert traktruteplan. En annen taktruteplan ville ha gitt andre verdier, men det forventes ikke at dette påvirker konklusjonen. Det antas at det diskuterte avviket for scenario nr. 4 skyldes analysens begrensninger. Avviket kan også skyldes unøyaktig avlesning, men dette anses som mindre sannsynlig da avviket er såpass tydelig. Unøyaktige avlesninger forventes å gi veldig små utslag da ventetidene beregnes som gjennomsnittet av veldig mange analyseverdier.

Uten godstog på strekningen: Fra resultatene for analysen uten godstog framkommer det at både kapasitetsutnyttelsen og forventet ventetid reduseres for situasjonen uten godstog sammenlignet med den opprinnelige analysen. For strekninger som ordinært trafikkeres av godstog er det trolig mest aktuelt å la et eventuelt forbud gjelde bare i høytrafikkperioden. Da kan innflettingen av tog fra hensetting skje i periodene uten godstog.

Ved å fjerne godstogene fra strekningen vil farten på strekningen harmoniseres og den tilgjengelige kapasiteten kan utnyttes på en bedre måte. Med godstog på strekningen er det vanskelig å utnytte den tilgjengelige kapasiteten på en optimal måte da de saktegående godstogene tar opp mye kapasitet på grunn av hastighetsforskjellen mellom dem og de øvrige togene.

Som beskrevet i forrige kapittel, vil kapasitetsutnyttelsen i gjennomsnitt reduseres med 29,6 %, mens forventet ventetid i gjennomsnitt reduseres med 29,0 % som følge av at godstog ikke tillates på strekningen. Dette er en betydelig reduksjon, denne endringen er derfor effektiv for å redusere ventetiden.

Halvert blokk lengde: Å redusere blokk lengden muliggjør at togene på strekningen kan kjøre tettere, noe som forventes å ha en positiv innvirkning på kapasitetsutnyttelsen og dermed også på ventetiden. Fra resultatene fremkommer det at kapasitetsutnyttelsen i gjennomsnitt reduseres med 2,7 % og at forventet ventetid i gjennomsnitt reduseres med 9,4 % som følge av at blokk-

lengden halveres fra 5 km til 2,5 km. Dette tiltaket er vesentlig mindre effektivt enn å ikke tillate godstog å trafikere strekningen.

Planskilt løsning: Ved å innføre planskilt løsning i stedet for kryss i plan viste resultatene at den forventede ventetiden i gjennomsnitt reduseres med 15,2 %. Basert på sammenligningen av planskilt løsning og kryss i plan presentert i kapittel 5.5 er det lite å vinne med å innføre planskilt påkobling ved middels til høy utnyttelse. Det skyldes at det finnes få tidsluker som er store nok i ruteplanen ved middels til høy utnyttelse. Innføringen av planskilt løsning framfor kryss i plan framstår derfor som et middels effektivt tiltak for å redusere ventetiden.

For analysen med planskilt påkobling ble det tatt utgangspunkt i sporveksler med 130 km/t i avvik, slik at akselerasjonen kan starte før togene kjører inn på ventesporet. Sporveksler med 130 km/t i avvik er svært sjeldent i norsk sammenheng, men de ble vurdert som nødvendige for at en planskilt løsning skulle kunne fungere.

Som gjennomgått i kapittel 5.5 trenger tog fra hensetting en tidsluke på 5 minutter og 12 sekunder for innfletting ved bruk av planskilt løsning. Ved kryss i plan trengs til sammenligning en tidsluke på 5 minutter og 44 sekunder. Man sparer derfor 32 sekunder per innfletting ved bruk av planskilt løsning i forhold til kryss i plan. Dette kommer i tillegg til at det ene konflikt-punktet unngås.

Forsinkelser og ventetid

I analysene utført i denne oppgaven har forventet ventetid på ventesporet blitt beregnet, denne ventetiden utgjør den planlagte ventetiden på ventesporet. Den totale ventetiden består av planlagt ventetid i tillegg til driftsforsinkelser (eller uplanlagt ventetid). Driftsforsinkelser oppstår om systemet utnyttes over den praktiske kapasiteten. Driftsforsinkelser må også tas hensyn til ved dimensjonering av jernbanelinjer. Forsinkelser kan også oppstå etter innfletting til dobbeltsporet på veg mot rutens startstasjon som følge av forsinkelser i øvrig togtrafikk eller uforutsette hendelser på sporet. Slike forsinkelser er imidlertid ikke tatt hensyn til i denne oppgaven. Heller ikke eventuell ventetid før kryssing av første spor er tatt med. Ved høy utnyttelse av dobbeltsporet, kan ventetiden for å krysse første spor bli betydelig selv om kryssingen bare beregnes å trenge en tidsluke på ett og et halvt minutt.

Når trafikklasten på en strekning øker, øker forsinkelsene eksponentielt som respons. Når den utnyttede kapasiteten nærmer seg den teoretiske kapasiteten, går forsinkelsene mot uendelig.

Det er derfor ugunstig å utnytte systemet over den praktiske kapasiteten. Kapasitetsutnyttelsene bør derfor ikke overstige UICs anbefalinger på 60 % og 75 % utnyttelse henholdsvis over dagen og i rushtiden.

Om ventetiden på ventesporet blir veldig lang, vil dette få økonomiske konsekvenser for togoperatøren og infrastruktureieren. Det er kostbart å la tog fra hensetting vente lenge på ventesporet, da toget okkuperer ventesporet for andre tog slik at forsinkelsene kan øke for etterfølgende tog. I tillegg får lokføreren lønn mens toget står på ventesporet. Lang ventetid på ventesporet er også risikabelt, da store forsinkelser kan føre til at togene fra hensetting ikke rekker oppstarten på sin rute. Dette kan gi forsinkelsespropagering gjennom hele systemet.

Som nevnt i kapittel 2.1 har Schwanhäußer studert sammenhengen mellom økonomi og kapasitetsutnyttelse. Om systemet utnyttes over den optimale kapasiteten, kan togoperatøren risikere å tape penger grunnet økte forsinkelser og færre passasjerer. Denne situasjonen kan oppstå om kapasitetsutnyttelsen på dobbeltsporet blir såpass høy at tog fra hensetting får lange ventetider på ventesporet. Da vil økte forsinkelser føre til økte kostnader. Forsinkelseskostnadene i systemet forventes å stige kraftig om kapasitetsutnyttelsen overstiger UICs anbefalinger.

Som en av forutsetningene for analysen ble det slått fast at innflettingen av tog fra hensettingsanleggene aldri skulle føre til at øvrig togtrafikk måtte bremse ned eller stoppe. Det innebærer at alle tog på ruteplanen skal ha minst ett minutt buffer foran og bak seg. Dette er en konservativ forutsetning, det kan tenkes at «litt» hindring av de etterfølgende togene kan tillates ved høye kapasitetsutnyttelser. Flere minutters kjøreforlengelse vil tvilsomt tillates, men opptil ett minutt kan kanskje aksepteres. Ved å tillate at togene fra hensetting hindrer trafikken på dobbeltsporet noe, kan forventet ventetid på ventesporet reduseres, og tidsluker som egentlig ikke er store nok for innfletting av tog fra hensetting, kan kanskje likevel utnyttes.

Det må imidlertid tas hensyn til at om forutsetningen om hindring av øvrig trafikk ikke overholdes like strengt, vil dette gå utover buffertiden for togene i ruteplanen. Ifølge Landex (2008) øker risikoen for forsinkelsespropagering når buffertidene reduseres, da buffertiden skal kompensere for små forsinkelser. Ved å redusere buffertiden vil ruteplanstabiliteten reduseres.

Ruteplaner og tilgjengelig kapasitet

Ifølge Abril et al. (2008) er den tilgjengelige kapasiteten differansen mellom utnyttet kapasitet og praktisk kapasitet. Den tilgjengelige kapasiteten indikerer hvor mye tilleggstrafikk strekningen kan takle. Når et hensettingsanlegg oppføres ved en strekning, vil tomtog fra hensetting måtte bruke av den tilgjengelige kapasiteten på strekningen. Det forutsetter at den tilgjengelige kapasiteten er stor nok til at trafikken til og fra hensettingsanlegget også kan kjøre på strekningen og at den tilgjengelige kapasiteten er mulig å utnytte.

Ifølge Tyler (2003) tapes fleksibilitet ved at man velger taktruteplaner foran konvensjonelle ruteplaner fordi man velger å tilpasse seg tidsspesifikke markedskrav. Fra et kapasitetsperspektiv kan taktruteplaner føre til problemer i områder med høy kapasitetsutnyttelse, ifølge Olsson og Veiseth (2011). Det vil kanskje ikke være mulig å utnytte strekningens kapasitet optimalt når flere stive ruter møtes på en banestrekning. Dette kan man også observere fra resultatene i denne oppgaven. For scenario 5 for analysene kan man observere at det bare er en tilgjengelig tidsluke per time på tross av at kapasitetsutnyttelsene i flere av analysene er ca. 70 %. Hadde man gått bort fra prinsippet om taktruteplaner kunne man kanskje utnyttet den tilgjengelige kapasiteten på en bedre måte og fått lavere forventede ventetider.

Hvor tett det er mulig å skyve blokktrappene sammen avhenger av togmiksen på den aktuelle delstrekningen, da blandet trafikk vil redusere kapasiteten på en jernbanelinje på grunn av at ruteleier elimineres av hastighetsforskjellene mellom saktegående og hurtiggående tog. Det ser vi også fra resultatene, da kapasitetsutnyttelsen reduseres mye når godstogene fjernes. Da harmoniseres togmiksen på strekningen. Godstog etterfulgt av InterCity-tog har minste togfølgetid lik 12 minutter og 24 sekunder. Med buffertid i tillegg tar godstoget opp nesten ett kvarter av ruteplanen. Det gir vanskelige forhold for innfletting av tog fra hensetting, samtidig som det reduserer hvor mange øvrige tog ruteplanen har plass til.

Valg av kryssløsning

Persontogene som trafikkerer InterCity-nettet er av typen Bm74/75. Ett dobbeltsett består av to vogner med lengde 106 m, dermed vil dobbeltsettet totalt være 212 m langt. Uansett om det bygges 250 m eller 400 m lange ventespor, vil det ikke være tilstrekkelig lengde til at toget rekker å akselerere på ventesporet, dermed må toget kjøre inn på dobbeltsporet med lav starthastighet. Det gjør at toget trenger en stor tidsluke for å rekke å akselerere til

dimensjonerende hastighet på dobbeltsporet. Det kan vanskeliggjøre innflettingen på strekninger der kapasitetsutnyttelsen er høy.

Kryss i plan med ventespor medfører at man trenger ekstra avstand mellom dobbeltsporene slik at ventesporet får plass i midten. Byggingen av dobbeltspor på InterCity er allerede godt i gang. Flere steder er dobbeltsporene ferdigstilte, og andre steder er de under bygging eller under planlegging. Om dobbeltsporene er planlagt uten tanke på hvor hensettingsanlegg skal plasseres i framtiden, risikerer man at infrastrukturjusteringer må til for å gi plass til ventespor når hensettingsanleggene skal bygges. Det kan gi økonomiske konsekvenser.

Ved å bygge kryss i plan med ventespor vil fleksibiliteten i ruteplanleggingen øke i forhold til bruk av kryss i plan uten ventespor. Ved økt trafikkmengde i framtiden, som for tilbuds-konseptet for 2050, kan denne fleksibiliteten være særlig viktig.

Ved veldig lave kapasitetsutnyttelser er de forventede ventetidene korte, og det er ikke nødvendig å bygge ventespor. Å bygge ventespor ved veldig lave kapasitetsutnyttelser er heller ikke økonomisk forsvarlig. Ventespor er unødvendig om kapasitetsutnyttelsen er såpass lav at det er stor sannsynlighet for å få ledig tidsluke i hver retning samtidig. Da kan det heller være aktuelt å bygge kryss i plan uten ventespor. For kapasitetsutnyttelser på mindre enn ca. 45 % viser resultatene at de forventede ventetidene bare er noen få minutter. I disse tilfellene bør det derfor være tilstrekkelig med kryss i plan uten ventespor.

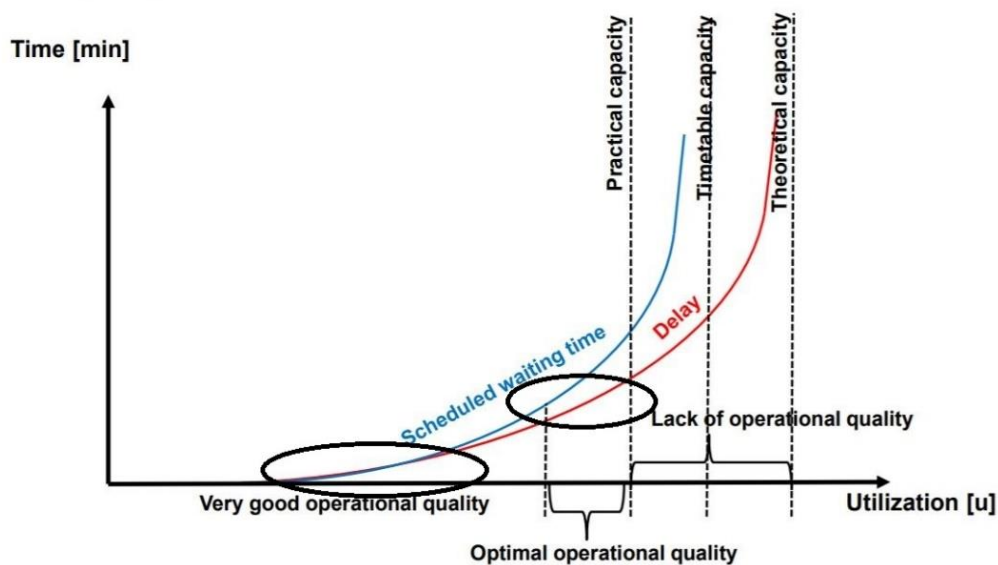
Ifølge Harris et al. (2016) må valget av krysstype for en jernbanestrekning ses i sammenheng med ønsket kapasitet og fleksibilitet, i tillegg må investeringskostnader og vedlikeholdsbehov vurderes. Kryss i plan gir lavere kapasitet og mindre fleksibilitet enn planskilte kryss. Planskilte kryss gir derimot veldig lite kapasitetstap, men de krever mer areal og infrastruktur, investeringskostnadene er derfor større for planskilte kryss enn for kryss i plan.

Det bør vurderes om planskilt løsning faktisk er nødvendig for linjer med høy kapasitetsutnyttelse. Fra resultatene i delkapittel 5.5 ser det ut som planskilt løsning gir liten gevinst ved høye kapasitetsutnyttelser. Samlet sett er ikke nødvendigvis en planskilt påkobling den beste løsningen da en slik løsning også krever større investeringer. Som beregnet i kapittel 2.5 krever planskilt påkobling 540 m lange oppkjøringsramper om togene fra hensetting skal kunne akselerere til 130 km/t før de kjører inn på dobbeltsporet. Oppkjøringsrampene er arealkrevende og dyre å bygge. Sporveksler med opptil 130 km/t i avvik utgjør også store investeringer, i tillegg til at de er arealkrevende. Det er flere elementer som avgjør hva som er den beste påkoblingsløsningen for en strekning, og alle elementene bør tas hensyn til i

vurderingene. Ved høy utnyttelse er det strekningskapasiteten som er hovedproblemet da det eksisterer få tidsluker i ruteplanene. En planskilt løsning vil ikke gi flere tidsluker. Ved høy utnyttelse bør man heller øke strekningskapasiteten ved å bygge mer spor, for eksempel et tredje spor. Planskilt påkobling gir liten gevinst når man ikke har ledige tidsluker til togene fra hensetting.

6.2 Sensitivitetsanalysen

I sensitivitetsanalysen ble endringer for både lav og høy kapasitetsutnyttelse beregnet, der skillet mellom de to kategoriene defineres ved 50 % kapasitetsutnyttelse. Denne oppdelingen skyldes at ved lav kapasitetsutnyttelse forventes sammenhengen mellom ventetid og kapasitetsutnyttelse å være tilnærmet lineær, deretter går sammenhengen over til å bli eksponentiell ved høy kapasitetsutnyttelse. Det tilnærmet lineære området er vist i den nederste ringen i figur 33 som er basert på Pachl (2014). Ved 40 til 60 % kapasitetsutnyttelse går sammenhengen over til å bli eksponentiell, dette området er vist i den øverste ringen i figur 33. Det forventes at å legge til eller trekke fra ett tog i timen gir større endringer i forventet ventetid i det eksponentielle området enn i det lineære området.



Figur 31: Tilnærmet lineært og eksponentielt område. Basert på Pachl (2014)

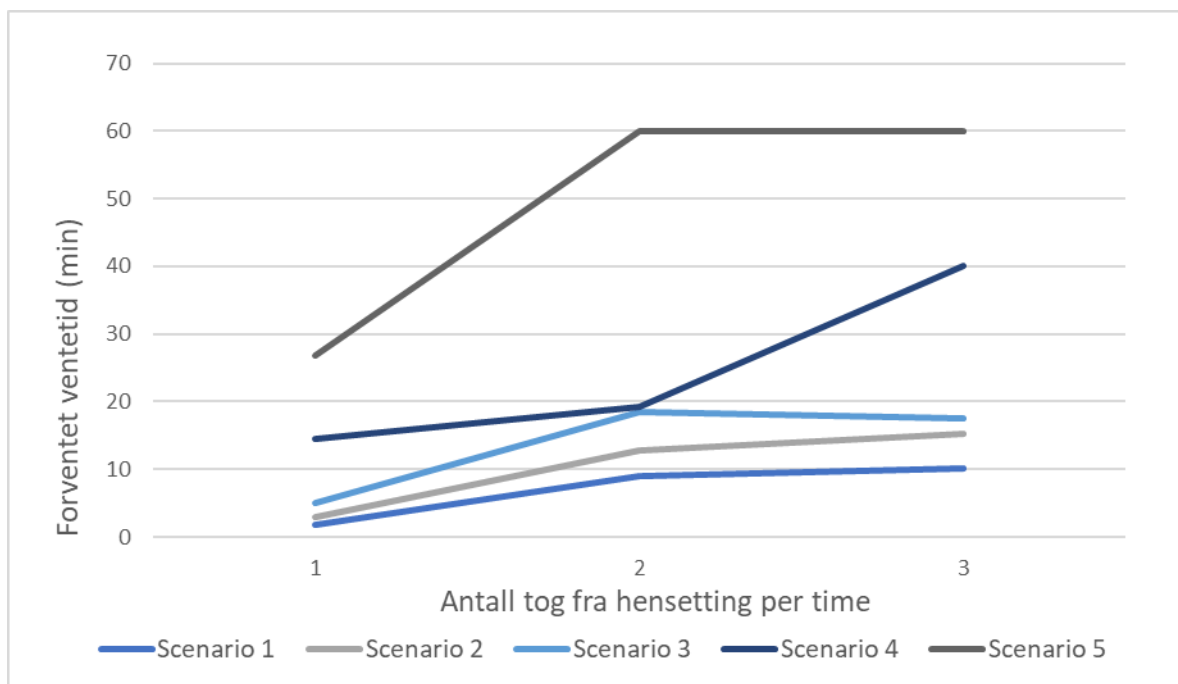
Fra resultatene for sensitivitetsanalysen presentert i tabell 15 fra kapittel 5.6 ser det ut til at å redusere antall tog per time, fra hensetting eller på dobbeltsporet eller ved å fjerne godstog, som

alle er endringer i ruteplan, gir betydelig større effekt enn endringer i infrastrukturen, som å redusere blokk lengden eller innføre planskilt løsning. Parameterne kan derfor deles inn i infrastrukturendringer og ruteplanendringer, der ruteplanendringer gir større utslag enn infrastrukturendringer.

Det forventes at å legge til eller trekke fra ett tog i timen gir større endringer i forventet ventetid i det eksponentielle området enn i det lineære området. Fra tabell 15 i kapittel 5.6 ser ikke dette ut til å stemme om antallet tog fra hensetting per time reduseres. Antagelsen stemmer heller ikke for situasjonen med halvert blokk lengde. Resultatene i sensitivitetsanalysen for disse situasjonene avviker fra forventet utvikling da endringen er større ved lav kapasitetsutnyttelse enn ved høy kapasitetsutnyttelse.

For situasjonen med halvert blokk lengde reduseres forventet ventetid betydelig for scenario nr. 1 sammenlignet med den opprinnelige analysen, deretter er reduksjonen liten for de følgende scenarioene. Scenario nr. 1 befinner seg under lav kapasitetsutnyttelse, og dermed vil den ene store verdien gjøre at endringen blir større i det tilnærmet lineære området enn i det eksponentielle området.

For å se nærmere på resultatene for når antallet tog fra hensetting per time reduseres, er ventetidene for økende antall tog fra hensetting framstilt for hvert scenario i figur 34. Da resultatene avviker fra forventet utvikling, brukes figuren til å vurdere resultatene og deres overensstemmelse med teorien. Figuren brukes til å studere ventetidsutviklingen for hvert scenario når antall tog fra hensetting økes fra ett til tre tog per time.



Figur 32: Forventet ventetid og antall tog fra hensetting per time for scenario 1 til 5

Som figuren viser vil høyere utnyttelse (høyere scenarionummer) gi høyere ventetid som forventet. For scenario nr. 1 til 3 er utnyttelsen fortsatt relativt lav, det medfører små sprang i ventetiden ved økende antall tog fra hensetting. Dette stemmer overens med at disse situasjonene befinner seg i det tilnærmet lineære området. For scenario nr. 4 og 5 er kapasitetsutnyttelsen derimot høy, og ventetiden får store hopp ved økende kapasitetsutnyttelse. Det stemmer overens med at disse situasjonene befinner seg i det eksponentielle området. Scenario nr. 4 og 5 er derfor veldig følsomme for økt kapasitetsutnyttelse, dermed blir endringen i forventet ventetid stor. Figuren viser også at økt utnyttelse i form av økende scenarionummer gir en drastisk økning i ventetiden, dette kan man for eksempel se fra hvor høyt scenario nr. 5 ligger i forhold til scenario nr. 4.

Om godstog fjernes fra ruteplanen eller antallet InterCity-tog reduseres med ett i timen, er det tydelig at endringen er større i det eksponentielle området enn i det tilnærmet lineære området fra resultatene i kapittel 5.6. For begge disse parameterne reduseres kapasitetsutnyttelsen betraktelig ved at ett tog per time fjernes fra ruteplanen. For innføringen av planskilt løsning er endringen omtrent lik i både det tilnærmet lineære området og det eksponentielle området.

Etter hvert som kapasitetsutnyttelsen på en strekning øker, vil man nå et tak for hvor mye infrastruktur man kan bygge for å kjøre et ønsket tilbudskonsept. Når man når dette taket vil effekten av å gjøre små infrastrukturendringer, som halvering av blokk lengden, være liten i

forhold til å gjøre ruteplanendringer som å redusere antallet tog per time. Da kan det heller være aktuelt å gjøre store infrastrukturendringer, som å bygge et nytt, eget spor fra hensettingsanlegget til startstasjonen for den aktuelle ruten. Eventuelt kan det være aktuelt å kombinere og optimalisere flere av de nevnte tiltakene.

Som rangeringen i kapittel 5.6 viste, ser kapasitetsutnyttelsen på dobbeltsporet ut til å være den viktigste parameteren for forventet ventetid, deretter kommer antall tog fra hensetting per time, togmiks på dobbeltspor og valg av påkoblingsløsning. Blokk lengden ser ut til å være den av de studerte parameterne som har minst betydning for ventetiden på ventesporet. De parameterne som omhandler ruteplanendringer er tydelig mer effektive enn parameterne som omhandler infrastrukturendringer.

6.3 Casestudien: pålitelighet og usikkerhet

Som gjennomgått i kapittel 1.3 er det knyttet usikkerheter til informasjonen som er hentet fra utredningen *Hensetting Østlandet*. Det er også knyttet usikkerheter til hvor stor trafikkmengden på de ulike banestrekningene blir i framtiden. Tilbudskonseptene for 2050 beskrives av Bane NOR som sannsynlige tilbudskonsept i perioden 2035 til 2060. De skal ikke forstås som endelige beskrivelser av det fremtidige konkrete rutetilbudet på de respektive strekningene, de viser kun ruteplanmessig togtrafikk basert på transportetterspørsel ifølge Jernbaneverket (2016c). For noen ruter er det ikke avgjort hvor ruten skal vende, det kan ha betydning for noen av anleggene som har blitt vurdert.

Det er også knyttet usikkerhet til flytogets tilbudskonsept for 2050, vurderingene tar derfor utgangspunkt i dagens trafikkmengder. Det er usikkert hvordan utviklingen blir, men det er naturlig å anta at antallet avganger per time for flytoget øker fram til 2050 heller enn at det holdes konstant.

Casestudien er derfor basert på informasjon som har en del usikkerhet. På tross av noe usikkerhet, antas det at hovedtrekkene i casestudien stemmer. Det er vanskelig å sette en klar definert grense for når kryss i plan som påkoblingsløsning kan fungere eller ikke, da dette avhenger av flere faktorer. Derfor vurderes flere av anleggene som delvis utilstrekkelige. For anleggene som ligger ved dobbeltspor med liten kapasitetsutnyttelse er det mindre usikkerheter knyttet til vurderingen. Disse anleggene er i konklusjonen vurdert som tilstrekkelige. Det samme gjelder for anleggene ved strekninger med veldig høy kapasitetsutnyttelse. Da er det i

flere tilfeller åpenbart at løsningen ikke vil fungere på en god måte, påkoblingsløsningene for disse anleggene er derfor vurdert som utilstrekkelige. Anleggene ved strekninger med middels høy kapasitetsutnyttelse er vanskeligst å vurdere. Disse anleggene kan imidlertid fungere dersom et tredje spor etableres fra hensetting. På den måten økes strekningskapasiteten.

Et sammendrag og en konklusjon for casestudien er presentert i kapittel 7.2. For anleggene som er vurdert som delvis utilstrekkelige kan det være nødvendig med mer utfyllende analyser og/eller mer presis informasjon for å konkludere om anlegget er tilstrekkelig eller ikke. Konklusjonen for casestudien utført i denne oppgaven bør utgjøre et godt grunnlag for en silingsprosess før eventuelle grundigere studier av anleggene. Det anbefales ikke å analysere anleggene som er vurdert som utilstrekkelige særlig mer grundig, da sannsynligheten for at kryss i plan ikke er egnet som påkoblingsløsning vurderes som stor for disse anleggene. Det antas at resultatenes pålitelighet er stor også for anleggene som er vurdert som tilstrekkelige i casestudien, da disse anleggene er plassert ved strekninger med lave kapasitetsutnyttelser der forholdene for innfletting av tog fra hensetting er god.

6.4 Pålitelighet og anvendbarhet

Resultatenes pålitelighet

I denne oppgaven er de beregnede ventetidene de viktigste resultatene. Beregningene baserer seg på en infrastrukturmodell oppbygd av kandidaten. Infrastrukturmodellen tar utgangspunkt i krav og anbefalinger fra Bane NORs tekniske regelverk for prosjektering av norske jernbanelinjer, samt egendefinerte forutsetninger og antagelser for analysen. Modellen er en forenkling av virkeligheten, disse forenklingene er nødvendige for å kunne studere egenskapene som er interessante for denne studien. Selv om modellen er forenklet er det mulig å observere tydelige trender i kapasiteten for de ulike analysescenarioene.

Resultatene i oppgaven baserer seg på manuell avlesning av blokktrapper, manuell komprimering av ruteplaner og manuell plotting av tidspunkter fra LUKS til Excel. Det manuelle arbeidet kan gi en usikkerhet og mulig feilkilde ved reproduksjon av resultatene. Det antas at denne usikkerheten er liten og bare handler om få sekunder. Noen sekunder fra eller til vil ha minimal påvirkning på sluttresultatet.

Resultatenes pålitelighet styrkes av at resultatene i stor grad stemmer overens med kjent litteratur. Det ble vist at forventet ventetid for ett tog fra hensetting stemmer med anbefalte

utnyttelsesgrader fra UIC 406 (International Union of Railways, 2004), som sier at forsinkelsen normalt vil øke mye når utnyttelsen overstiger 60 % for linjer med blandet trafikk. Som forventet vil også ventetiden reduseres når blokk lengden reduseres, planskilt påkobling innføres eller godstogene fjernes fra ruteplanen.

Alle analyser utført i denne studien er utført for et sett av forhåndsdefinerte ruteplaner og forhåndsdefinerte betingelser for en definert infrastrukturmodell. Det tas derfor forbehold om at resultatene avhenger av disse valgene. Andre analysebetingelser kunne gitt noe annerledes resultater.

Det forventes at dersom oppgaven hadde inneholdt flere ruteplaner med ulike varianter for takting, hadde resultatene vist et mer nøyaktig bilde av ventetidsutviklingen. Resultatene i denne oppgaven baserer seg på en enkelt definert ruteplan for hvert scenario, da begrensninger måtte gjøres for at oppgaven skulle kunne fullføres i løpet av ett semester. Ruteplanbegrensningene medfører en stor usikkerhet i modellen. Ideelt sett burde hvert scenario blitt analysert for flere ruteplaner med ulik takting, deretter kunne gjennomsnittlig ventetid for de ulike ruteplanene blitt beregnet. Da ville usikkerheten i forbindelse med ruteplanvalg i analysen blitt kraftig redusert. Den forenkla modellen viser likevel tydelige trender i ventetid og kapasitet. Resultatene viser en trend med eksponentiell vekst i ventetid med økende kapasitetsutnyttelser på strekningen, som samsvarer med kjent teori fra Schwanhäußer (1974).

Resultatenes anvendbarhet

Resultatene er interessante for valg av påkoblingsløsning vedrørende bygging av hensettingsanlegg ved dobbeltspor. Resultatene fra oppgaven bør være interessante for Bane NOR som infrastrukturforvalter i forbindelse med løsninger for det økte hensettingsbehovet på Østlandet. Resultatene bør også kunne anvendes ved vurderinger av påkoblingsløsninger for hensettingsanlegg andre steder enn på Østlandet. Kryss i plan med ventespør foreslås som påkoblingsløsning for flere av hensettingsarealene som vurderes i utredningen *Hensetting Østlandet*. I casestudien utført i denne oppgaven har alle anlegg fra *Hensetting Østlandet* som er planlagt med kryss i plan i minst en ende blitt analysert. For anleggene som i casestudien vurderes som utilstrekkelige, frarådes bruk av kryss i plan som påkoblingsløsning.

Resultatene fra denne studien utgjør et effektivt verktøy for en silingsprosess av mulige hensettingsanlegg. Om de aktuelle hensettingsanleggene ser ut til å kunne bruke en påkoblings-

løsning med kryss i plan basert på resultatene i denne oppgaven, kan mer detaljerte simuleringsstudier utføres for å studere anleggene i mer detalj.

Resultatene kan anvendes som et grunnlag for å utarbeide et verktøy som tar hensyn til antall tog i timen og togmiks, gjennomsnittlig hastighet og antall tog i timen fra hensetting som skal flettes inn på dobbeltsporet, og gir en anbefaling av valg av påkoblingsløsning. Et slikt verktøy kan være nyttig for framtidig prosjektering av hensettingsanlegg. De beregnede ventetidene fra denne studien gir en antydning om hvor store ventetidene kan bli i en reell situasjon, de bør likevel ikke forstås som en fasit for hvor lange ventetidene blir da denne studien har betydelig usikkerhet.

Det er også flere vurderinger enn kapasitet og ventetid som må tas hensyn til ved bygging av hensettingsanlegg og tilhørende påkoblingsløsning. Det økonomiske aspektet, tilgjengelig areal, ønsket fleksibilitet og framtidige behov bør også tas med i vurderingen.

Om utbyggingen av aktuelle hensettingsanlegg planlegges som en del av dobbeltsporutbygginger, kan de totale byggekostnadene reduseres. Om planleggingen av hensettingsanlegg og tilhørende påkoblingsløsning gjøres etter ferdigstillelse av dobbeltspor, kan det medføre at infrastrukturen for dobbeltsporet må bygges om i ettertid. Resultatene fra denne oppgaven kan derfor være nyttige å ta hensyn til i planleggingsprosessene ved bygging av ny jernbaneinfrastruktur.

7. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID

I dette kapitlet oppsummeres resultatene fra kapittel 5 og diskusjonen fra kapittel 6 til en konklusjon for den utførte studien. I konklusjonen besvares forskningsspørsmålene som ble definert i innledningen. Avslutningsvis diskuteres videre arbeid som kan utføres for å studere problemstillingen nærmere.

7.1 Konklusjon

Den forventede ventetiden på ventesporet for tog fra hensetting stiger raskt når utnyttelsen på dobbeltsporet, inkludert tog fra hensetting, overstiger ca. 60 %. Det konkluderes derfor med at kryss i plan med ventespor fungerer best for strekninger med maksimalt 60 % kapasitetsutnyttelse. Det tilsvarer ett til to tog i timen fra hensetting ved fire til seks tog i timen på dobbeltsporet (scenario 1 til 3).

Antallet ledige tidsluker og forventet ventetid avhenger imidlertid sterkt av ruteplanen som legges til grunn for analysene.

Ventetid på grunn av forsinkelser kommer i tillegg til den forventede ventetiden og vil dermed forverre det totale bildet. Derfor bør scenarioer som befinner seg nær grensen for om de er egnet for kryss i plan med ventespor analyseres nærmere i hvert enkelt tilfelle.

For kapasitetsutnyttelser på mindre enn ca. 45 % er de forventede ventetidene bare noen få minutter. For disse tilfellene konkluderes det med at kryss i plan uten ventespor er tilstrekkelig. Dette tilsvarer ett, eller maksimalt to, tog fra hensetting og opptil fire tog i timen på dobbeltsporet (scenario 1).

Ved mer enn 60 % kapasitetsutnyttelse på dobbeltsporet, inkludert togene fra hensetting, er planskilt påkobling aktuelt for å oppnå den ønskede kapasiteten. Dette er imidlertid ikke en helt definert grense da andre elementer også har betydning for ventetiden. En togmiks uten godstog på strekningen muliggjør i større grad høyere kapasitetsutnyttelser uten at ventetiden blir for lang, enn situasjonen med godstog på strekningen. Før planskilt løsning eventuelt bygges, bør tiltak for å redusere kapasitetsutnyttelsen og ventetiden vurderes.

Det er flere elementer som avgjør hva som er den beste påkoblingsløsningen for en strekning, og alle elementene bør tas hensyn til i valget av påkoblingsløsning. Disse elementene kan være

økonomi, fleksibilitetsbehov, hensettingsanleggets størrelse, kapasitetsutnyttelse på dobbeltsporet, togmiks og framtidig trafikktilbud på strekningen.

Basert på de studerte parameterens utslag på den forventede ventetiden kan parameterens betydning for ventetiden på ventesporet rangeres etter følgende rekkefølge, der nummer 1 har størst betydning:

1. Kapasitetsutnyttelse på dobbeltspor
2. Antall tog fra hensetting inn på dobbeltspor per time
3. Togmiks på dobbeltsporet
4. Valg av påkoblingsløsning
5. Blokk lengde på dobbeltspor

Ruteplanendringer har større utslag på ventetiden enn det infrastrukturendringer har. For å redusere ventetiden på ventesporet for tog fra hensetting er det derfor mer effektivt å endre ruteplanen på strekningen enn å gjøre infrastrukturendringer. Man vil etter hvert nå et tak for kapasitetsutnyttelsen, der både planskilt påkobling og blokkoptimalisering gir liten gevinst på ventetiden. En kombinasjon og optimalisering av både planskilt påkobling og blokk lengde kan eventuelt være aktuelt. Ved høy utnyttelse kan et eget spor fra hensettingsanlegget til startpunktet for pendel være en god løsning.

7.2 Videre arbeid

For hensettingsanleggene som ble vurdert i casestudien kan simuleringsstudier eller andre detaljstudier være aktuelle å utføre når konkrete planer om strekningene foreligger. Slike studier kan gi svar på om resultatene fra det overordnede studiet som ble utført i denne oppgaven stemmer for reelle situasjoner på detaljnivå. Detaljstudier kan særlig være viktige for anleggene som ble vurdert som delvis utilstrekkelige i casestudien.

I denne oppgaven ble et begrenset antall parametere som ble antatt å ha påvirkning på ventetiden for kryss i plan studert. Andre parametere enn de studerte kan også være aktuelle å se nærmere på. Flere aktuelle parametere er påpekt i delkapittel 4.2, men det er også mulig at parametere som ikke er nevnt i denne oppgaven kan ha betydning for ventetiden.

Som gjennomgått i diskusjonskapittelet, medfører ruteplanbegrensningene i denne oppgaven en stor usikkerhet for resultatene. Som en del av eventuelt videre arbeid kan det derfor være

aktuelt å utføre de samme analysene for flere ruteplaner med ulike varianter for takting. Det forventes at analyser av flere ruteplaner ville gitt et mer nøyaktig bilde av ventetidsutviklingen. Analyser av flere ruteplaner kunne styrket indikasjonene fra denne oppgaven.

Som nevnt i delkapittel 6.4 kan resultatene brukes som grunnlag til å utarbeide et verktøy som tar hensyn til antall tog i timen og togmiks, gjennomsnittlig hastighet og antall tog i timen fra hensetting som skal flettes inn på dobbeltsporet. En del av det videre arbeidet kan være å utvikle dette verktøyet. Dette kan være et enkelt Excel-verktøy som tar inn de ulike parameterne og gir en anbefaling for hvilken påkoblingsløsning som bør velges.

8. REFERANSER

- ABRIL, M., BARBER, F., INGOLOTTI, L., SALIDO, M., TORMOS, P. & LOVA, A. 2008. An assessment of railway capacity. *Transportation Research. Part E, Logistics & Transportation Review*, 44.
- AVINERI, E. 2004. A Cumulative Prospect Theory Approach to Passengers Behavior Modeling: Waiting Time Paradox Revisited. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 8, 195--204.
- BANE NOR. *Vestfoldbanen* [Online]. banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/Jernbanen/Banene/Vestfoldbanen/> [Accessed 08.10.17].
- BANE NOR. 2015. *Utredning Hensetting Østlandet* [Online]. banenor.no: Bane NOR, . Available: <http://www.banenor.no/Prosjekter/Utredninger/Jernbaneverkets-Utredninger/hensetting/> [Accessed 29.01.18].
- BANE NOR. 2016a. *BLAD NR. 1, LILLESTRØM - CHARLOTTENBERG* [Online]. banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/globalassets/kundeportal/dokumenter/grafiske-togruter-r17/blad-nr.-1-lillestrom---charlottenberg.pdf> [Accessed 05.11.17].
- BANE NOR. 2016b. *BLAD NR. 99. GARDERMOBANEN* [Online]. banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/globalassets/kundeportal/dokumenter/grafiske-togruter-r17/blad-nr.-99.-gardermobanen.pdf> [Accessed 05.11.17].
- BANE NOR. 2016c. *Dobbeltspor Gulskogen-Hokksund: Bakgrunn for prosjektet* [Online]. Banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/Prosjekter/prosjekter/dobbeltspor-gulskogen-hokksund/bakgrunn-for-prosjektet/> [Accessed 08.10.17].
- BANE NOR. 2016d. *Grafiske togruter for gjeldende rutetermin R17* [Online]. banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/kundeportal/ruter-og-sportilgang/grafiske-togruter2/> [Accessed 05.11.17].
- BANE NOR. 2016e. *Ringeriksbanen og E16 - fellesprosjektet: Fakta om prosjektet* [Online]. banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/Prosjekter/prosjekter/ringeriksbanenoge16/om-prosjektet/> [Accessed 08.10.17].
- BANE NOR. 2017a. *Se punktlighetstall og tiltak* [Online]. banenor.no. Available: <http://www.banenor.no/Nyheter/Togenes-punktlighe-og-regularitet/> [Accessed 17.10.17].
- BANE NOR. 2017b. *Teknisk regelverk: Overbygning/Prosjektering/Sporveksler* [Online]. Available: https://trv.banenor.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Sporveksler#St.C3.B8rste_hastighet_i_sporveksler [Accessed 06.02.18].
- BANE NOR. 2017c. *Teknisk regelverk: Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Akselteller* [Online]. Available: <https://trv.banenor.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Akselteller> [Accessed 14.02.18].
- BANE NOR. 2018a. *Teknisk regelverk: Forside* [Online]. Available: <https://trv.banenor.no/wiki/Forside> [Accessed 06.02.18].

- BANE NOR. 2018b. *Teknisk regelverk: Signal/Prosjektering/ATC* [Online]. Available: [https://trv.banenor.no/wiki/Signal/Prosjektering/ATC#Fullstendig_ utrustet_omr.C3.A5de_28FATC.29](https://trv.banenor.no/wiki/Signal/Prosjektering/ATC#Fullstendig_utrustet_omr.C3.A5de_28FATC.29) [Accessed 06.02.18].
- BANE NOR & NORCONSULT AS 2017. Konsekvensutredning: Kommunedelplan for dobbeltspor på Sørlandsbanen på strekningen Gulskogen - Hokksund.
- BURDETT, R. L. & KOZAN, E. 2006. Techniques for absolute capacity determination in railways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40, 616--632.
- BØE, K. R. 2017. *Analyse av kryss i plan for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor*. NTNU, Fakultet for ingeniørvitenskap, Institutt for bygg- og miljøteknikk
- HANDSTANGER, A. C. T. 2009. Scheduled waiting time from crossing on single track railway lines.
- HANSEN, I. A. & PACHL, J. 2014. *Railway Timetabling & Operations: Analysis, Modelling, Optimisation, Simulation, Performance Evaluation*, Hamburg, Germany, Eurailpress.
- HARRIS, N. G., HAUGELAND, H., OLSSON, N. & VEISETH, M. 2016. An Introduction to Railway Operations Planning. XI, 244 s.
- INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS 2004. UIC Code 406 Capacity.
- INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS 2013. UIC Code 406 Capacity.
- INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS 2014. UIC, The Worldwide Railway Organisation.
- JENSEN, L., LANDEX, A., NIELSEN, O., KROON, L. & SCHMIDT, M. 2017. Strategic assessment of capacity consumption in railway networks: Framework and model. *Transportation Research, Part C*, 74, 126--149.
- JERNBANEVERKET. 2014. ERTMS for Dummies 1 - Grunnleggende funksjonalitet. 001.
- JERNBANEVERKET 2015. InterCity-prosjektet: Vedlegg 1 til Konseptdokument: Tilbudskonsept Vestfold-, Østfold- og Dovrebanen. Oslo: Jernbaneverket.
- JERNBANEVERKET 2016a. 160408 Jernbaneverkets termer for beregning av framføringstid revisjon 1.0.
- JERNBANEVERKET 2016b. Godsstrategi for jernbanen 2016-2029. RK Grafisk, Oslo.
- JERNBANEVERKET 2016c. InterCity-prosjektet: Konseptdokument: Vestfoldbanen, Østfoldbanen, Dovrebanen og Ringeriksbanen. Oslo: Jernbaneverket.
- JERNBANEVERKET, NORCONSULT, BANEDIVISJONEN, N. S. B. & NORGE, J. 2015a. Østlandet : hensetting Østlandet : delrapport 3. Oslo: Jernbaneverket.
- JERNBANEVERKET, NORCONSULT, NSB BANEDIVISJONEN & JERNBANEDIREKTORATET. 2015b. Vedlegg 1.1 Analyse arealer Lillestrøm-Eidsvoll.
- JERNBANEVERKET, NORCONSULT, NSB BANEDIVISJONEN & JERNBANEDIREKTORATET. 2015c. Vedlegg 3.2. Analyse arealer Hønefoss.
- JOHNSON, D., SHIRES, J., NASH, C. & TYLER, J. 2006. Forecasting and appraising the impact of a regular interval timetable. *Transport Policy*, 13, 349-366.
- KAAS, A. H. 2000. Punctuality model for railways. *WIT Transactions on The Built Environment*, 50, 8.

- LANDEX, A. 2008. *Methods to estimate railway capacity and passenger delays; PhD Thesis*. Technical University of Denmark, Department of Transport.
- 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: TU Delft*.
- LANDEX, A., KAAS, A. H., SCHITTENHELM, B. H. & SCHNEIDER-TILLI, J. 2006. Evaluation of railway capacity. *Annual Transport Conference at Aalborg University 2006*
- 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, 55-64.
- OLSSON, N. O. E. & VEISETH, M. 2011. *Jernbanetraffikk*, Trondheim, Tapir akademisk forl.
- PACHL, J. 2015. *Railway Operation and Control*, Mountlake Terrace, USA, VTD Rail Publishing.
- PAWAR, S. P. S. 2011. *An Analysis of Single Track High Speed Rail Operation*. Master thesis, University of Birmingham.
- PETERSEN, T. 2016. Watching the Swiss: A network approach to rural and exurban public transport. *Transport Policy*, 52, 175--185.
- POURYOUSEF, H., LAUTALA, P. & WHITE, T. 2015. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*, 23, 30--42.
- SAMFERDSELSDEPARTEMENTET 2016-2017. Meld.St. 33: Nasjonal transportplan 2018-2029. Oslo: Samferdselsdepartementet.
- SANGPHONG, O., SIRIDHARA, S. & RATANAVARAHHA, V. 2017. Determining critical rail line blocks and minimum train headways for equal and unequal block lengths and various train speed scenarios. *Engineering Journal*, 21, 281--293.
- SCHWANHÄÜBER, W. 1974. *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. Fakultät für Bauwesen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- SKARTSÆTERHAGEN, S. 1993. Kapasitet på jernbanestrekninger.
- SPÖNEMANN, J. & WENDLER, E. 2010. Synthesis of railway infrastructure. *WIT Transactions on The Built Environment*, 114, 395-405.
- STADLER. Electric low-floor multiple unit FLIRT. Available: https://www.stadlerail.com-live-01e96f7.s3-eu-central-1.amazonaws.com/filer_public/01/79/0179dc1a-031a-4c65-98e7-0573f6c1e99b/fjoy0908e.pdf [Accessed 14.12.17].
- STATISTISK SENTRALBYRÅ. 2016. *Befolkningsframskrivninger, 2016-2100* [Online]. ssb.no: SSB. Available: <https://www.ssb.no/befolkning/statistikker/folkfram/aar/2016-06-21> [Accessed 29.01.18].
- THE RAILWAY TECHNICAL WEBSITE. 2018. *Signalling* [Online]. Available: <http://www.railway-technical.com/signalling/> [Accessed 06.03.18].
- TYLER, J. 2003. *The philosophy and practice of Taktfahrplan: a case-study of the East Coast Main Line*, Institute of Transport Studies, University of Leeds.

VIA CONSULTING & DEVELOPMENT 2016. LUKS Manual. VIA Consulting & Development,.

WHITE, T. 2006. Examination of the use of delay as a standard measurement of railroad capacity and operation. *Transport Research Board 85th Annual Meeting* [Online].

VEDLEGG

Vedlegg 1: Oppgavetekst for masteroppgaven

MASTEROPPGAVE

(TBA4955 JERNBANE, masteroppgave)

VÅREN 2018
for
Karina Rangnes Bøe

Kryss i plan for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor: En kapasitetsanalyse

BAKGRUNN

Som en del av InterCity-prosjektet vil jernbanenettet på Østlandet gjennomgå store endringer i årene som kommer for å kunne håndtere den forventede befolkningsveksten. Med full utbygging av InterCity forventes det 17,8 millioner årlig reisende, i motsetning til dagens 8,8 millioner (Samferdselsdepartementet, 2016-2017). Som følge av den økte etterspørselen, vil andelen rullende materiell måtte øke betraktelig. Dermed vil også behovet for hensetting øke, og nye hensettingsanlegg trengs. I utredningen *Hensetting Østlandet delrapport 3* vurderes det framtidige hensettingsbehovet på Østlandet, og løsninger for hvordan etterspørselen kan løses presenteres.

Noen av de nye hensettingsanleggene planlegges bygd langs dobbeltsporene av InterCity der dimensjonerende hastighet er 250 km/t. Det er stor konkurranse om arealer i byene, og det er ofte vanskelig å finne store nok arealer. Dermed må innflettingen fra hensetting skje under store hastigheter. Et av kryssutformingsalternativene som vurderes er kryss i plan med midtstilt ventespor. I denne oppgaven studeres forventede ventetider for tog fra hensettingsanlegg ved bruk av kryss i plan med midtstilt ventespor.

OPPGAVE

Oppgavens formål er å analysere bruken av kryss i plan med ventespor for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor på InterCity fra et kapasitetsperspektiv.

Basert på oppgavens formål er følgende problemstilling definert:

Hvordan vil påkoblingsløsningen med kryss i plan med ventespor fungere i praksis på en InterCity-strekning for påkobling fra hensettingsanlegg til dobbeltspor?

For å løse problemstillingen skal følgende forskningsspørsmål besvares:

1. For hvilke kapasitetsutnyttelser kan man bruke kryss i plan med ventespor som påkobling for tog fra hensetting, uten at ventetiden på ventesporet blir for lang?
2. Ved hvilke kapasitetsutnyttelser på dobbeltspor, og antall tog per time fra hensetting, trengs planskilt påkobling for å oppnå ønsket kapasitet?

3. Hvilke parametere har størst betydning for ventetiden på ventesporet for påkoblingsløsningen kryss i plan?

Målsetningen for masteroppgaven er å gi en mer nøyaktig inndeling i hvilke løsninger som vil være nødvendige for ulike kombinasjoner av strekningers kapasitetsutnyttelse og størrelsen på hensettingsanlegg enn de eksisterende inndelingene.

Oppgaven skal besvares ved hjelp av ruteplan- og kapasitetsanalyser i analyseverktøyet LUKS. Analysene skal utføres både for forhåndsdefinerte analysescenarier der ulike parametere studeres og for en casestudie av hensettingsarealer med kryss i plan som ble vurdert i utredningen *Hensetting Østlandet*.

GENERELT

Oppgaveteksten 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 bearbeidingen 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/>)
- 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.

Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.

Oppgaven er skrevet med ekstern veiledning fra medveileder Anne Christine Torp Handstanger fra Infraplan. Jernbanedirektoratet har gitt økonomisk støtte til masteroppgaven.

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, befarang, feltkurs eller ekskursionsjoner, 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 (Infraplan)

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 15.01.2018, revidert: 15.05.2018

Underskrift



Faglærer

Vedlegg 2: Beregning av blokk lengder

Nødvendige blokk lengder kan beregnes etter følgende formel, gjengitt fra kapittel 2.

$$MA = \frac{L}{3,6} * T + \frac{L^2 - MH^2}{2R * 3,6^2} \quad \text{Formel V.1}$$

I formel V.1 er MA lik målavstand [m], det som i denne oppgaven omtales som blokk lengde. L er linjehastigheten [km/t] og MH er mål hastigheten [km/t]. Mål hastigheten settes lik null i beregningene siden full stopp er målet. T er summen av reaksjonstiden og tilsetningstiden [s], ifølge Bane NOR (2018b) skal T være lik åtte sekunder for signalbalisegrupper. R er retardasjonen [m/s^2], den beregnes fra formel V.2:

$$R = -0,2 * \frac{L - 150}{150} - \frac{C}{100} + 0,7 \quad \text{Formel V.2}$$

I formel V.2 er C gjennomsnittlig fall [%] over målavstanden, i dette tilfellet er strekningen uten fall. For hastigheter mindre eller lik 150 km/t skal ikke første ledd i formelen brukes. I denne oppgaven er det ikke aktuelt å stryke første ledd da InterCity-nettet er dimensjonert for 250 km/t.

Beregning av blokk lengder for hastigheter på 200 og 250 km/t er vist i tabell V.1.

Tabell V.1: Beregning av blokk lengder

Forklaring	Enhet	Situasjon	
		1	2
Linjehastighet	L [km/t]	250	200
Mål hastighet	MH [km/t]	0	0
Reaksjonstid + tilsetningstid	T [s]	8	8
Fall	C [%]	0	0
Retardasjon	R [m/s^2]	0.57	0.63
Målavstand	MA [m]	4810.73	2881.09

Som tabellen viser vil hastigheter på 200 og 250 km/t gi henholdsvis 4811 m og 2881 m blokk lengde. InterCity-nettet er dimensjonert for 250 km/t, derfor brukes 5 km som blokk lengde i de fleste analysene utført i LUKS i denne oppgaven.

For å se på blokk lengdenes påvirkning på ventetiden for tog fra hensetting utføres også noen analyser med kortere blokk strekninger.

Vedlegg 3: Beregning av midlere minste togfølgetid vha. ruteplanuavhengig metode

Minste togfølgetider for de ulike kombinasjonene av første og etterfølgende tog er funnet ved å lese av fra *blocking time model* i LUKS som beskrevet i litteraturgjennomgangen. De avleste minste togfølgetidene er vist i tabell V.2. Togfølgetidene er oppgitt i minutter og sekunder.

Tabell V.2: Minste togfølgetider avlest fra LUKS

Første tog → Etterfølgende tog ↓	InterCity-tog	Fjerntog	Godstog
InterCity-tog	04:17	02:57	12:24
Fjerntog	06:09	04:34	13:56
Godstog	04:03	04:04	05:09

Togmiksen på strekningen må være kjent for at man skal kunne beregne midlere minste togfølgetid. I disse beregningene tas det utgangspunkt i en togmiks bestående av seks InterCity-tog, ett fjerntog og ett godstog per time.

Ved bruk av ruteplanuavhengig metode har ikke avgangstidspunktene noen betydning. Basert på togmiksen og togfølgetidene fra tabell V.2, kan midlere minste togfølgetid beregnes etter formel V.3.

$$\overline{t_{s,min}} = \sum \frac{n_i * n_j * t_{ij}}{N * N} \quad \text{Formel V.3}$$

I formelen er n_i det totale antallet av tog i, mens n_j er det totale antallet av tog j. N er det totale antallet tog i timen, i dette tilfellet åtte. t_{ij} er minste togfølgetid for tog i etterfulgt av tog j.

Tabell V.3: Summen av togfølgetidene utgjør midlere minste togfølgetid

Første tog → Etterfølgende tog ↓	InterCity-tog	Fjerntog	Godstog
InterCity-tog	02:24	00:16	01:09
Fjerntog	00:34	00:04	00:13
Godstog	00:22	00:03	00:04

Summen av tidene i tabell V.3 utgjør den midlere minste togfølgetiden. I dette tilfellet er den midlere minste togfølgetiden 5 min og 14 sekunder, som tilsvarer 5,23 minutter.

Den teoretiske kapasiteten kan da beregnes etter formel V.4 som også ble vist i litteraturgjennomgangen.

$$K_{teo} = \frac{T}{t_{s,min}} = \frac{60}{5,23} = 11,46 \text{ tog/time} \quad \text{Formel V.4}$$

Etter anbefalinger fra UIC International Union of Railways (2013) bør kapasiteten over døgnet være omtrent 60 % av teoretisk kapasitet for linjer med blandet trafikk. Det gir en praktisk kapasitet på 6,88 tog/time.

$$K_p = K_{teo} * U = 11,46 * 60 \% = 6,88 \text{ tog/time} \quad \text{Formel V.5}$$

Vedlegg 4: Ruteplaner benyttet i analysene

De vedlagte ruteplanene viser originale tidspunkter før eventuell vridning av ruteplanene. Ruteplanen i retning mot stigende kilometer holdes konstant gjennom hele analysen, mens ruteplanen i retning mot synkende kilometer vris med 0 til 55 minutter.

Ruteplaner benyttet for ett til tre tog fra hensetting, for planskilt løsning og for blokk lengde 2,5 km:

Scenario 1:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:15	Fjerntog
XX:30	IC
XX:40	Godstog

Scenario 2:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:05	Godstog
XX:20	Fjerntog
XX:30	IC
XX:45	IC

Scenario 3:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:05	Godstog
XX:15	IC
XX:30	IC
XX:40	Fjerntog
XX:45	IC

Scenario 4:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:05	Godstog
XX:15	IC
XX:24	IC
XX:30	IC
XX:40	Fjerntog
XX:45	IC

Scenario 5:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:05	Godstog
XX:15	IC
XX:23	IC
XX:30	IC
XX:40	Fjerntog
XX:45	IC
XX:53	IC

Ruteplaner benyttet for analysen uten godstog:

Scenario 1:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:15	Fjerntog
XX:30	IC

Scenario 2:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:15	IC
XX:30	Fjerntog
XX:45	IC

Scenario 3:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:10	Fjerntog
XX:15	IC
XX:30	IC
XX:45	IC

Scenario 4:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:10	Fjerntog
XX:15	IC
XX:30	IC
XX:37	IC
XX:45	IC

Scenario 5:

Tidspunkt	Togtype
XX:00	IC
XX:10	Fjerntog
XX:15	IC
XX:23	IC
XX:30	IC
XX:37	IC
XX:45	IC

Vedlegg 5: Nøkkeltall for analysene

Ett tog fra hensetting:

Scenario	IC-tog	Fjerntog	Godstog	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Antall tidsluker
1	2	1	1	43	1.9	3
2	3	1	1	49	2.8	4
3	4	1	1	57	5.1	3
4	5	1	1	63	14.6	2
5	6	1	1	71	26.8	1

Ventetid for det andre toget fra hensetting:

Scenario	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Total innkjøringstid [min]
1	50	9.0	11
2	57	12.8	16
3	64	18.5	24
4	72	19.3	34
5	79	59.9	73

Ventetid for det tredje toget fra hensetting:

Scenario	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Total innkjøringstid [min]
1	57	10.1	21
2	66	15.3	31
3	73	17.5	41
4	79	40.0	74
5	86	60.0	147

Ett tog fra hensetting inkludert ventetid for å kjøre inn på ventesporet:

Scenario	IC-tog	Fjerntog	Godstog	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Antall tidsluker
1	2	1	1	43	4.3	3
2	3	1	1	49	5.2	4
3	4	1	1	57	8.0	3
4	5	1	1	63	19.3	2
5	6	1	1	71	32.4	1

Planskilt løsning, ett tog fra hensetting:

Scenario	IC-tog	Fjerntog	Godstog	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Antall tidsluker
1	2	1	1	43	3.7	3
2	3	1	1	49	4.3	4
3	4	1	1	57	6.6	3
4	5	1	1	63	16.3	2
5	6	1	1	71	28.4	1

Blokk lengde 2,5 km, ett tog fra hensetting:

Scenario	IC-tog	Fjerntog	Godstog	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Antall tidsluker
1	2	1	1	42	1.5	4
2	3	1	1	46	2.6	4
3	4	1	1	54	4.6	3
4	5	1	1	60	13.9	2
5	6	1	1	68	26.0	1

Uten godstog, ett tog fra hensetting:

Scenario	IC-tog	Fjerntog	Godstog	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Antall tidsluker
1	2	1	0	26	1.4	3
2	3	1	0	33	1.7	4
3	4	1	0	40	4.3	3
4	5	1	0	47	7.7	2
5	6	1	0	55	22.3	1

Ventetid for det andre toget fra hensetting for situasjonen uten godstog:

Scenario	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Total innkjøringstid [min]
1	37	6.6	8
2	44	10.2	12
3	50	16.8	21
4	59	28.8	36
5	66	59.4	82

Ventetid for det tredje toget fra hensetting for situasjonen uten godstog:

Scenario	Utnyttet kapasitet [%]	Forventet ventetid [min]	Total innkjøringstid [min]
1	44	7.2	15
2	52	11.9	24
3	59	18.7	40
4	66	30.0	66
5	73	60.0	142