

Økonomisk analyse av godskapasitet på jernbanen mellom Trondheim og Oslo

Eivind Thorvaldsen

Industriell økonomi og teknologiledelse

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Alexei A. Gaivoronski, IØT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse

Sammendrag

Målet med denne oppgaven er å utrede hvordan en kan få økt strekningskapasitet for gods på jernbane mellom Trondheim og Oslo. Det er forventet med en bortimot dobling av godstransport på bane mot 2050, noe som stiller krav til forbedring av kapasiteten på jernbanenettet (Jernbaneverket 2015a). I oppgaven skal vi se på hvordan vi kan maksimere tilgjengelig kapasitet i forhold til kostnader og finne ut hvilke tiltak og investeringer som bør gjøres for å møte den framtidige etterspørselen. Med tiltak mener vi hvordan man vil organisere togframføringen for å oppnå størst mulig kapasitet; dette innebærer bl.a. rutetrasé og rekkefølge av tog. Vi vil i hovedsak undersøke effekten av å innføre retningsdrift på deler av strekningen. Med utgangspunkt i resultatet vi får for optimal togframføring, vil vi gjøre en økonomisk analyse av hvilke investeringer som bør gjøres for å skape størst mulig kapasitet per investerte krone og for å kunne oppnå ønskede kapasitetsmengder for framtiden.

På dobbeltspor kan man gjøre relativt presise kapasitetsberegninger ved å bruke kapasitetsteori. På enkeltspor vil derimot beregningene være mer unøyaktige, da vi må ta hensyn til kryssinger av motgående tog som gjør trafikkbildet mer uoversiktlig. Vi har i denne oppgaven bygd en modell for å kunne beregne kapasiteten også på enkeltspor. Vi har i beregningene våre fokusert på strekningen mellom Hamar og Støren, da vi her kan undersøke effekten av retningsdrift. Beregningene vil belyse forskjellen i nødvendige investeringer vi må gjøre for å oppnå ønsket kapasitet ved de ulike valgene av strategier.

Vår analyse konkluderer med at IC-strekningen mellom Hamar og Lillehammar bør bygges ut snarest. Andre utbygginger vil ikke haste og vi kan vente og anse trafikkveksten. Ved stor trafikkvekst kan det være nyttig å elektrifisere Rørosbanen, med lav trafikkvekst anbefaler vi å forlenge kryssingssporene slik at man kan kjøre med lenger tog.

Abstract

The aim of this thesis is to find a way to increase the track capacity for freight on rail between Trondheim and Oslo. It is expected an almost doubling of freight transport on rail towards 2050, this demand an improvement of the capacity of the rail network. In the thesis we will research how to maximize available capacity relative to cost and find which measures and investments that should be done to meet the future demand. With measures we mean how to organize the departures of train to achieve as great capacity as possible; which include route selection, and the order of trains. We will mainly research the effect of introducing direction operated trains, on parts of the stretch. Based on the result we get for optimal scheduling of trains, we will make an economical analysis of which investments that should be done to achieve the largest amount of capacity per invested capital, and to achieve our capacity goals for the future.

On doubletracks it is possible to make quite precise calculations of capacity. On single tracks however these calculations will be more imprecise, as we have to account for crossings, which will make the traffic more chaotic. In this thesis we have built a model to calculate the capacity also on single tracks. We have in our calculations focused on the stretch between Hamar and Støren, as we here can research the effect of direction oriented driving. The calculations will highlight the difference in investments that is needed for each strategy to achieve the desired capacity.

Our analysis shows that the Intercity track between Hamar and Lillehammer should be constructed as soon as possible. Other investments is not rushed and we can wait and see the development in traffic. With large growth in traffic it might be beneficial to electrify Rørosbanen, with low growth we recommend to extend the existing crossings in order to drive with longer trains.

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	1
ABSTRACT	2
INNHALDSFORTEGNELSE	3
TABELLER	5
FIGURLISTE	6
1 INNLEDNING	7
1.1 PROBLEMSTILLING	7
1.2 AVGRENSNING	8
1.3 FORMÅL.....	8
1.4 MÅLGRUPPE	9
1.5 FREMGANGSMETODE.....	9
1.5.1 VALG AV BEREGNINGSMETODE.....	9
2 KAPASITETSBEHOVET	11
3 SITUASJONSBESKRIVELSE	13
3.1 BANER MELLOM ALNABRU OG HEIMDAL	13
3.1.1 Dovrebanen	14
3.1.2 Hovedbanen.....	14
3.1.3 Gardermobanen.....	15
3.1.4 Rørosbanen.....	15
3.1.5 Solørbanen.....	15
3.1.6 Kongsvingerbanen	15
3.2 ALTERNATIVE RUTER MELLOM TRONDHEIM OG ALNABRU	16
3.3 FORSLAG TIL KAPASITETSØKENDE TILTAK	17
4 KAPASITETSTEORI.....	19
4.1 BEREGNING AV TOGFØLGETID	19
4.1.1 Enkeltspor/dobbeltspor.....	20
4.1.2 Signalsystem	20
4.1.3 Ensartet og blandet trafikk	22
4.1.4 Togfølgetider på enkeltspor.....	24
4.1.5 Sammenfatning	24
4.2 PRAKTISK KAPASITET	24

4.2.1 Stive ruter	26
4.2.2Automatisk sikringssystemer.....	26
5. MODELLEN	28
5.1.DIMENSJONERENDE STREKNING	28
5.1.1Toggrupper	28
5.1.2Togrekkefølge	28
5.1.3 Andel av tog fra hver toggruppe	29
5.1.4 Togmix	31
5.1.5 Kjøretidsforskjell	31
5.1.6 Forbikjøring	32
5.1.7 Kryssinger.....	32
5.2 DIMENSJONERENDE STREKNING FOR BLANDET TRAFIKK PÅ ENKELTSPOR	33
5.3 TOGFØLGETIDER	34
5.3.1 Togfølgetid for tog i likgående retning	34
5.3.2 Togfølgetid for tog i motgående retning	35
6. VARIABLER OG PARAMETERE	37
6.1.1 Hastighet.....	37
6.1.2 Lengden på godstog.....	39
6.1.3 Aksellast.....	39
6.2 PARAMETERVERDIER	40
7.KAPASITETSBEREGNINGER	42
7.1 DAGENS TRAFIKK	42
7.1.1 Beregning av togfølgetid for dimensjonerende strekning og utnyttelsesgrad.	44
7.2 MÅLBILDE FRAMTIDENS TRAFIKK.....	47
7.3 NØDVENDIGE TILTAK VED GODSKJØRING KUN OVER DOVREBANEN	48
7.3.1 Hamar-Lillehammer	48
7.3.2 Fortsatt bruk av 480 meter lange tog	49
7.4 TILTAK	51
7.4.1 Økt toglengde.....	51
7.4.2 Retningsdrift	52
7.5 SAMMENLIGNING AV TILTAK	53
8 KONKLUSJON	54
KILDER.....	55

Tabeller

TABELL 1: ÅRSAKER TIL KJØRETIDSFORSKJELL	31
TABELL 2: SAMMENHENG MELLOM AKSELLAST OG TILLATT HASTIGHET FOR ULIKE OVERBYGNINGSKLASSER. (JERNBANEVERKET 2016E.)	38
TABELL 3: STØRSTE TILLATTE HASTIGHET FOR GODSTOG VED ULIKE TOGLENGDER (JERNBANEVERKET 2016F, AVSNITT 3.3.2.5)	38
TABELL 4: VERDIER (SKARTSÆTERHAGEN 1993, 17)	40
TABELL 5:DAGENS TRAFIKK (MAN-FRE), TALL FRA GRAFISK RUTETABELL, NSB (NSB 2016A).	44
TABELL 6: DIMENSJONERENDE STREKNING STØREN-DOBÅS	44
TABELL 7: DIMENSJONERENDE STREKNING DOBÅS-LILLEHAMMER.....	45
TABELL 8: DIMENSJONERENDE STREKNING HAMAR-LILLEHAMMER	45
TABELL 9: MÅLBILDE FOR GODSTRAFIKK I 2050 (JERNBANEVERKET 2016H).....	47
TABELL 10: PASSASJERTRAFIKK I 2050 (JERNBANEVERKET 2016H).....	47
TABELL 11:BLOKKSTREKNINGER SOM TRENGER TILTAK.	50
TABELL 12: BLOKKSTREKNINGER SOM TRENGER TILTAK	51

Figurliste

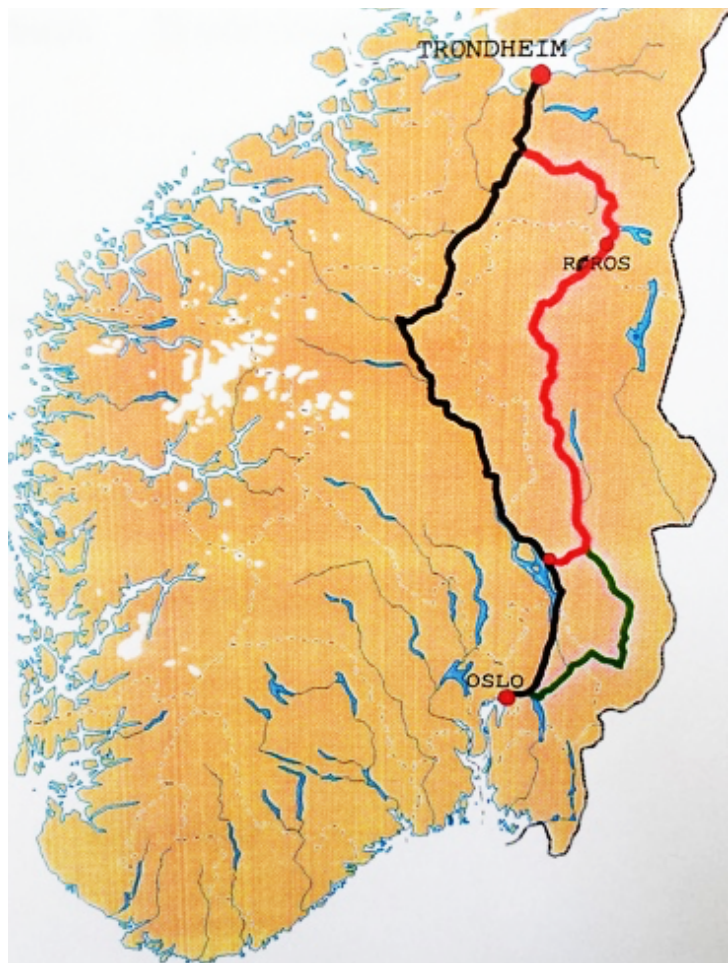
FIGUR 1: TOGBANER MELLOM OSLO OG TRONDHEIM	7
FIGUR 2: TRANSPORTTILBUD PÅ KORT OG LANG SIKT (JERNBANEVERKET 2015B).....	11
FIGUR 3 KAPASITETSUTNYTTELSE I MAKSTIMEN (JERNBANEVERKET 2014A).....	12
FIGUR 4:VISER ELEKTRIFISERTE STREKNINGER (JERNBANEVERKET 2015B, 9)	13
FIGUR 5:UTBYGGINGSTRINN DOVREBANEN (JERNBANEVERKET 2015C)	14
FIGUR 6: TYPISKE KAPASITETSNIVÅER (KVALITATIVT) (SKARTSÆTERHAGEN 2015, 33)	17
FIGUR 7: PLASSERING AV HOVEDSIGNAL FOR INN- OG UTKJØR PÅ ENKELTSPOR.	20
FIGUR 8: KOMPONENTENE I MINSTE TOGFØLGETID. (GOVERDE 2013, 7)	21
FIGUR 9: MINSTE TOGFØLGETID. ØVERST UTEN BLOKKPOST. I MIDTEN FØRSTE DEL DIMENSJONERENDE. NEDERST ER SISTE DEL DIMENSJONERENDE.	22
FIGUR 10: BLANDET TRAFIKK, DOBBELTSPOR ET RASKT OG ET TREGT TOG	22
FIGUR 11: PULJEKJØRING MED TRE LIKE TOG ETTER HVERANDRE (SKARTSÆTERHAGEN 1993, 10)	23
FIGUR 12: TOGFØLGETIDER MELLOM TO KRYSSINGER VED ENKELTSPORET DRIFT (SKARTSÆTERHAGEN 1993, 45).....	24
FIGUR 13: AUTOMATISKE SIKRINGSSYSTEM (JERNBANEVERKET 2013C)	26
FIGUR 14: LOKAL- OG REGIONTOGSTRAFIKK OG PRIMETIMEVINDUET FOR GODSTOG.....	30
FIGUR 15: MIDDELPUNKT VED MOTRETTEDE BEVEGELSER (JERNBANEVERKET 2010A, PKT. 2.2.3)	35
FIGUR 16: FIGUR SKILTET HASTIGHET DOMBÅS-OPPDAL (JERNBANEVERKET 2014C).....	39
FIGUR 17: PLASSERING AV FRITTSTÅENDE FORSIGNAL	41
FIGUR 18: DAGENS GODSTOGVINDU	43
FIGUR 18: FIGUREN TIL VENSTRE VISER KAPASITETSUTNYTTELSE I DØGNET OG FIGUREN TIL HØGRE VISER KAPASITETSUTNYTTELSE I MAKSTIMEN (JERNBANEVERKET, 2014A).	46

1 Innledning

Det er forventet en stor økning av trafikk på jernbanen i årene fremover. I en perspektivanalyse har jernbaneverket anslått at det i 2050 vil være en økning av godstransport på nær 90%, og en stor økning av persontransport, særlig i byområdene Oslo, Trondheim, Bergen og Stavanger med en vekst på 170% (Jernbaneverket 2015a). På store deler av jernbanenettet er kapasiteten sprengt, og det vil ikke være mulig å kjøre en tilnærmet dobbelt mengde tog uten tiltak og investeringer.

1.1 Problemstilling

Oppgaven tar for seg hvordan en skal legge til rette for den økte godstransporten mellom Trondheim og Alnabru. I dag går all godstrafikk mellom Alnabru og Trondheim over Dovrebanen til Eidsvoll, for deretter å følge Hovedbanen videre til Alnabru. Det finnes også alternative traseer, men disse blir i dag bare benyttet til godstrafikk i avvikssituasjoner. Grunnen for at disse alternative traseene ikke blir brukt er at de holder en lavere standard ved at de inneholder strekninger som ikke er elektrifisert, eller som mangler fjernstyringssystemer. Vi vil studere om det er økonomisk gunstig å inkludere disse alternative traseene for å kunne håndtere de framtidige transportbehovene, eller om en videre utbygging og oppgradering av Dovrebanen er ideelt. Vi vil studere hvilket valg av rutetrase og kjøremønster som kombinert med investeringer i infrastruktur vil være den beste strategien for fremtiden.



Figur 1: Togbaner mellom Oslo og Trondheim

Hvilken frekvens man kan framføre tog med er et viktig mål på kapasiteten på jernbanen. Hovedfaktoren som bestemmer denne frekvensen er antall spor vi har tilgjengelig, i Norge er det i hovedsak snakk om enkelt eller dobbeltspor. På enkeltspor vil vi ha trafikk i begge retninger og togene er avhengig av å ha kryssingsspor for å kunne passere hverandre, og et tog vil da sperre av linjen mellom de to kryssingsporene. En annen faktor som påvirker frekvensen er kjøretidsforskjellen mellom tog: Om et rask tog starter etter et saktegående tog må det raske toget starte mye senere enn det trege toget for å kunne opprettholde en høyere fart og slik oppnå en kort reisetid. Vi vil i oppgaven lage en modell som vi kan nytte til å anslå hvilken frekvens vi kan kjøre togene med når vi gjør endringer i infrastrukturen og kjøremønsteret.

En måte å øke kapasiteten på er å "konstruere" ett dobbeltspor ved å kjøre retningsdrift på to enkeltspor som sammen danner en sluttet ring. Mellom Trondheim og Alnabru, er det aktuelt å benytte retningsdrift mellom Støren og Hamar, og mellom Hamar og Lillestrøm.

En annen måte å oppnå økt kapasitet på er ved å gjøre investeringer i ny infrastruktur for å forbedre kapasiteten, dette kan være bygging av kryssingsspor, endring i signalsystemet, eller øke standarden på sporet. Vi vil også studere hvilken effekt det vil ha på kapasiteten å øke toglengden.

1.2 Avgrensning

Oppgaven ser på kapasiteten for godstrafikken mellom Trondheim og Alnabru. Vi har i hovedsak valgt å studere en del av strekningen Hamar-Støren. Det er flere faktorer som bestemmer kapasiteten på jernbanen, strekningskapasitet, stasjonskapasitet, vendekapasitet, hensettingskapasitet, verkstedskapasitet, banestrømforsyningskapasitet, telekapasitet, terminalkapasiteten, og tilgangen på togmateriell og arbeidere. Vi vil avgrense oss ytterligere ved å kun gjøre beregninger på strekningskapasitet, og tar hensyn til de andre faktorene kun gjennom føringer de setter. Strekningskapasitet er den kapasiteten som jernbanesporet og signalsystemet gir muligheter for å kjøre med.

1.3 Formål

Vi vil i denne teksten fokusere på hvordan vi kan oppfylle krav til framtidige kapasitetsmengder på jernbanen på en mest økonomisk måte, samtidig som vi tar hensyn til de ulike interessentene sine behov. I oppgaven vil vi se på hvilken utbyggingsstrategi som lønner seg for å møte

kapasitetsbehovet i 2050, formålet med å se på dette nå er å kunne velge investeringer de neste årene som også vil ha en høy nytteverdi på lang sikt.

1.4 Målgruppe

Målgruppen for oppgaven er i hovedsak strategi-, kapasitet- og ruteplanutrederer ved Jernbaneverket, samt beslutningstakere for jernbaneutbygging.

1.5 Fremgangsmetode

Vi vil finne den optimale utbyggingsstrategien ved å finne det kjøremønsteret som best kan utnytte eksisterende infrastruktur til å oppnå en høy kapasitet, og se det i sammenheng med muligheten for investeringer i infrastruktur.

For å finne nødvendige tiltak vil vi legge vekt på kapasitetsbehovet i ”prime time” for gods, siden det er da det er størst press på kapasiteten på Dovrebanen.

1.5.1 Valg av beregningsmetode

Hvilke metoder kan vi bruke for å vurdere hvordan et tiltak påvirker kapasiteten? Vi kan sette opp faktiske planer for togene og se på resultatet. Alternativt kan vi gjøre mer generelle kapasitetsvurderinger ved å lage en forenklet modell og beregne kapasiteten teoretisk.

De to ulike tilnærmingene har hver sine styrker og svakheter. For å gjøre små endringer, som også kan tre i kraft ved en rimelig kort tidshorisont, er det det beste valget å gå inn og se på eksisterende planer og se hvordan man kan justere og tilpasse disse for å optimalisere forandringene. I oppgaven vil vi derimot undersøke såpass store endringer at hele ruteplanen må endres. Å sette opp ruteplaner for alle tenkelige investeringer er et voldsomt arbeid og vi blir nødt til å se teoretisk på det. I denne oppgaven vil vi dermed lage en forenklet kapasitetsmodell og gjøre generelle anslag på nytten av ulike tiltak som gjennomføres. Vi vil nå kunne få et oversiktlig metode for å undersøke effekten av de ulike tiltakene. Det negative ved å lage en generell modell er at en går glipp av den ideelle løsningen som gir best kapasitet ved et spesifikt tilfelle. Det som likevel gjør at en generell modell er at det finnes store usikkerhetsmomenter knyttet til fremtiden.

Disse usikkerhetsmomentene er først og fremst hva transportbehovet blir på de ulike strekningene. En annen er at det stadig skjer forsinkelser og et idealisert tilfelle med små marginer vil kunne være mer sårbart for avvik enn en togplan som gir generelt god kapasitet. Det er videre knyttet usikkerhet ved utvikling av ny teknologi som kan påvirke kjøretidene, og bestemmelser som blir innført for eksempel ved innføringen av nytt signalsystem ERTMS.

Ved så store usikkerhetsmomenter ser vi det da som mest hensiktsmessig å se på hva som generelt vil gi størst kapasitet og ikke se på et spesifikt tilfelle som kanskje kun gjelder under gitte forutsetninger. Disse usikkerhetsmomentene vil også påvirke de generelle beregningene, men disse vil kanskje gi oss et like greit svar, på en mer oversiktlig måte.

Vi vil i beregningene gå ut i fra at avgangene for persontrafikk må være spredd utover døgnet slik som dagens togtilbud.

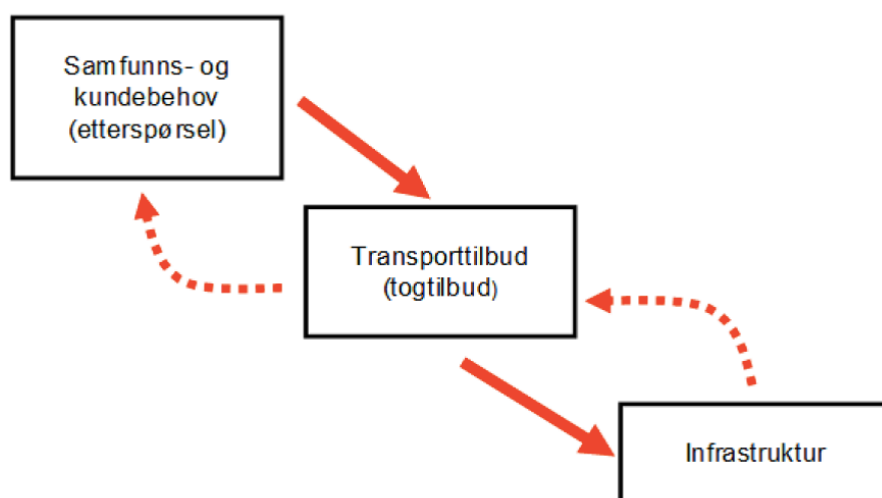
For å beregne kapasiteten benytter vi teori om kapasitet i henhold til Skartsæterhagen (Skartsæterhagen 1993). Dette er beregninger som baserer seg på UIC 405E, som er en kapasitetsmodell fra International union of railways.

Når vi har beregnet kapasiteten ved de ulike kjøremønstrene vil vi finne flaskehalser i systemet og finne ut hvordan vi kan gjøre investeringer for å omgå flaskehalsen og slik øke kapasiteten. For å beregne kostnadsnivå vil vi gjøre relativt grove overslag, ved å sammenligne kostnad for nye lignende prosjekter.

2 Kapasitetsbehovet

Skartsæterhagen omtaler strekningskapasitet som hva strekningen evner å transportere (Skartsæterhagen 1993). Dette kan måles i antall tog pr. tidsenhet, passasjerer pr tidsenhet, vogner pr tidsenhet, eller tonn pr tidsenhet.

På kort sikt vil infrastrukturen være styrende for hvilket transporttilbud som kan opprettes, på lang sikt bør etterspørsel og transporttilbud være styrende for utviklingen av infrastrukturen (Jernbaneverket 2015b).

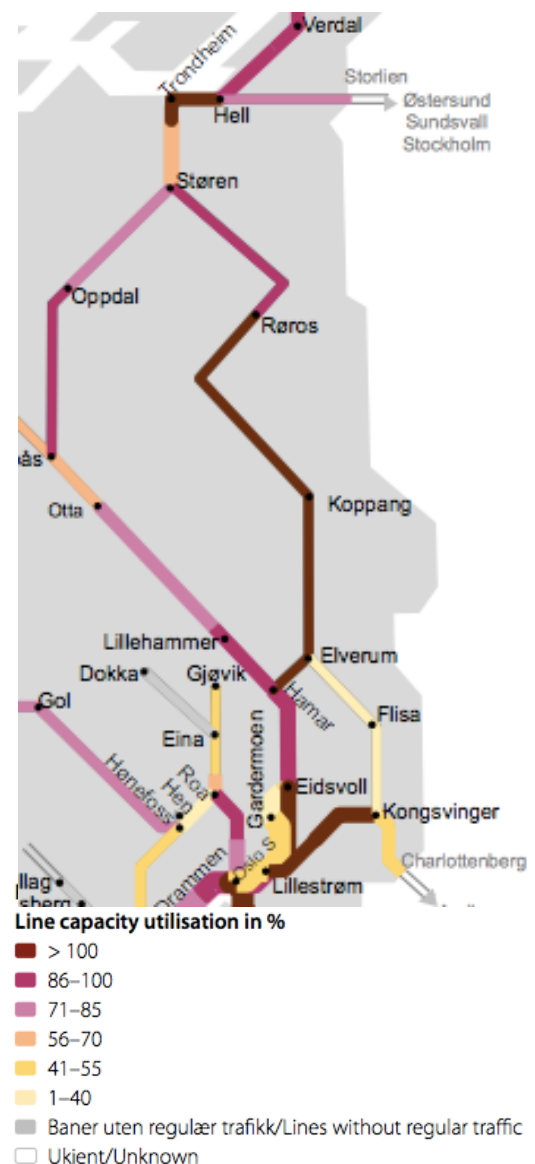


Figur 2: Transporttilbud på kort og lang sikt (Jernbaneverket 2015b).

For å møte framtidens etterspørsel for transport må vi altså bygge ut infrastrukturen slik at den får tilstrekkelig kapasiteten. Fra et kapasitetsmessig ståsted er ønskelig å kjøre like tog etter hverandre i samme retning slik at de kan følge samme frekvens og dermed kan kjøre tettere, mer om dette senere. Sammen med behovet for kapasitet har de ulike kundene ønsker og premisser for togframføringen som vi må ta hensyn til.

Det er flere krefter som strider imot en togframføring som gir maksimal utnyttelse av strekningskapasiteten, og isteden vil ha spredte avganger. Befolkningen ønsker spredde avganger for å benytte toget som et transportmiddel, godsekspeditørene vil ha spredde avganger for å holde kostnadene nede ved å benytte togene mest effektivt. Samtidig ønsker staten spredte avganger for å utnytte terminalkapasiteten best mulig og slik slippe å investere store midler i utvidelser av denne. Her må de må veie kostnadene for økt terminalkapasitet opp mot kostnadene for økt strekningskapasiteten.

Ved å etterkomme ønsker fra interessentene om spredte avganger med blandet trafikk, blir det press på tilgjengelig kapasitet. Det er i dag sprengt kapasitet på store deler av jernbanenettet, se figur 3. For å oppnå NTP sitt mål om nesten en dobling av framførte tog på strekningen (Jernbaneverket 2014a), må vi gjøre tiltak for å kunne imøtekomme den framtidige etterspørselen. Vi vil forsøke å finne de løsningene som kan imøtekomme framtidenes behov på en mest mulig lønnsom måte. Vi vil studere hvordan vi kan kjøre mer effektivt og hvilke investeringer som kan hjelpe oss med å gjennomføre dette.



Figur 3 Kapasitetsutnyttelse i makstimen (Jernbaneverket 2014a)

3 Situasjonsbeskrivelse

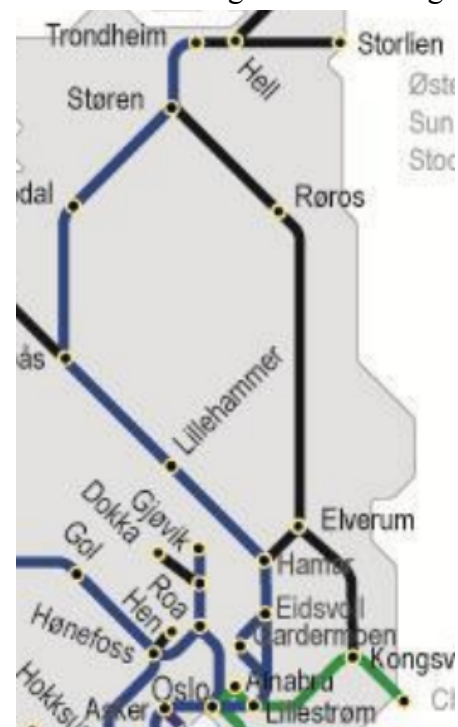
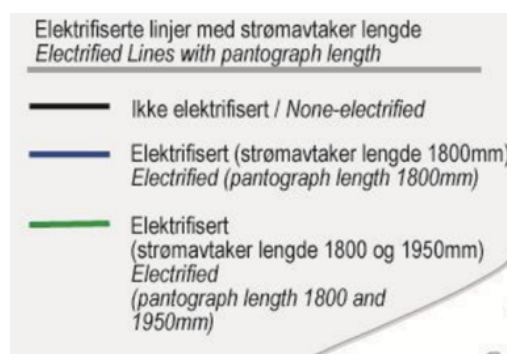
Da vi fokuserer på gods, starter vi med å se på hvor godsterminalene i de to byene ligger. I Oslo er terminalen plassert på Alnabru, mens i Trondheim ligger godsterminalen på Brattøra. Terminalen i Trondheim er planlagt flyttet, og Jernbaneverket har anbefalt ny terminal ved Torgård i nærheten av Heimdal (Jernbaneverket 2014b; Hansen 2015). Vi velger dermed Heimdal som plassering for terminalen. til tross for behovet for utvidet kapasitet der. Hvorvidt vi velger Trondheim eller Heimdal i beregningene gir ikke så stort utslag, så en eventuelt bygging av terminal på Heimdal påvirker ikke aktualiteten av rapporten i noe særlig grad.

3.1 Baner mellom Alnabru og Heimdal

Vi vil nå se på hvilke alternative ruter vi har for å kjøre tog mellom Alnabru og Heimdal. I dag går all godstrafikk over Hovedbanen fra Alnabru til Eidsvoll og Dovrebanen fra Eidsvoll til Trondheim, dette tilsvarer den vestlige linjen på figur 1. Som vi kan se inntegnet finnes det også alternative traseer for transport, men disse blir i dag bare benyttet til godstrafikk i avvikssituasjoner.

Fra Støren til Trondheim går det bare en bane, Dovrebanen. Sør for Støren forgrener banen seg ut i Rørosbanen(Rød linje) og Dovrebanen, disse møtes igjen på Hamar. Videre sørover kan vi benytte Hovedbanen, eller Solør- og Kongsvingerbanen (grønn linje).

Grunnen for at disse alternative traseene ikke blir brukt, er at de holder en lavere standard; fra Støren til Kongsvinger er det ikke elektrifisert, det er dårlig utbygd for kryssingsspor og mellom Støren og Røros mangler det fjernstyringssystemer.



Figur 4: Viser elektrifiserte strekninger (Jernbaneverket 2015b, 9)

3.3.1 Dovrebanen

Dovrebanen går fra Eidsvoll til Trondheim (Jernbaneverket 2016a). Trafikken på Dovrebanen består av regiontog, fjerntog og godstog. Som sagt benytter all godstrafikk mellom Oslo og Trondheim seg av banen, dette utgjør omtrent 50% markedsandel mellom Oslo og Trondheim. Banen transporterte også nesten 3 millioner passasjerer på togene 2014. Den store trafikken gjør at banen sliter med for liten kapasitet sør for Lillehammer. Dovrebanen har de siste årene også slitt med stadige stengninger på grunn av ras.

Som en del av intercityutbyggingen er det planlagt store forbedringer av infrastrukturen mellom Eidsvoll og Lillehammer. Det er planlagt dobbeltspor til Hamar innen 2024 og til Lillehammer innen 2030.

”Fra konseptvalgutredningen for InterCity-strekningen Oslo – Lillehammer foreligger det et vedtatt konsept, som innebærer trasé for hastighet opp mot 250 km/t, forbikjøringsspor for saktegående tog og nedleggelse av gammel bane hvor den blir erstattet av ny trasé.” (Jernbaneverket 2015c)



**Figur 5: Utbyggingstrinn
Dovrebanen (Jernbaneverket 2015c)**

3.1.2 Hovedbanen

Hovedbanen går fra Oslo S til Eidsvoll og tar av seg all trafikk inn til Alnabru. Banen er også en viktig kollektivtrafikkåre nordover fra Oslo for lokaltogtrafikk. ”Det er i dag store kapasitetsproblemer på strekningen og nord for Lillestrøm er banen erklært for overbelastet” (Jernbaneverket 2013a). Det er 20 km med dobbeltspor på strekningen.

3.1.3 Gardermobanen

Høyhastighetsbane mellom Oslo S og Eidsvoll, men utenom Alnabru. Det er dobbeltspor fra Oslo S til Venjar ca 4 km sør for Eidsvoll og det er planlagt videre dobbeltsporutbygging mot Eidsvoll som en del av intercityutbyggingen, med byggestart 2018 (Jernbaneverket 2016b). Banen blir benyttet av flytog, raske intercity- og lokaltog samt fjerntog. De eneste godstogene som benytter banen er tog med drivstoff til å forsyne flytrafikken. Gardermobanen er en sterkt trafikkert strekning med 10-minuttsavganger for flytog det meste av dagen. Vi ser på den som uaktuell til godstransport.

3.1.4 Rørosbanen

Rørosbanen går fra Hamar til Støren. For store deler av strekningen har den gunstig trase med en betydelig lavere fjellovergang (670 moh), enn Dovrebanen(1024 moh) (Jernbaneverket 2013b). I dag er banen viktig for tømmertransport, den er også en avlastningsrute for gods. Det er tilnærmet 2- timersfrekvens mellom Røros og Hamar, og 2 daglige ruter mellom Røros og Trondheim.

3.1.5 Solørbanen

Solørbanen går fra Kongsvinger til Elverum (Jernbaneverket 2016c). Solørbanen benyttes kun til tømmertransport. Banen har gunstig trase med lange rettstrekker og minimale stigninger. I dag er bare stasjonene Kirkenær, Flisa og Braskeridfoss bemannet ved behov. Banen er anbefalt elektrifisert gjennom utredningsarbeid utført av Jernbaneverket høst 2015 (Jernbaneverket 2015d).

3.1.6 Kongsvingerbanen

Kongsvingerbanen går fra Lillestrøm til riksgrensen ved Sverige (Jernbaneverket 2016d). Banen stor trafikk av både gods og persontog, med faste timesavganger til og fra Kongsvinger, halvtimesavganger kan være aktuelt på mellomlangsikt (Jernbaneverket 2015d). 65% lokaltog, region og fjerntog 15% og godstog 20%. Viktig bane for tømmertransport i forbindelse med Solørbanen. Banen har få stigninger.

3.2 Alternative ruter mellom Trondheim og Alnabru

Alle naturlige ruter benytter seg av Dovrebanen på strekningen Trondheim-Støren og Hovedbanen på Lillestrøm-Alnabru. Vi lister opp fire hovedalternativer vi kan benytte mellom Støren og Lillestrøm:

Alternativ 1: Dovrebanen: Støren- Eidsvoll
Hovedbanen: Eidsvoll-Lillestrøm

Alternativ 2: Rørosbanen: Støren- Hamar
Dovrebanen: Hamar-Eidsvoll
Hovedbanen: Eidsvoll-Lillestrøm

Alternativ 3: Rørosbanen: Støren til Elverum
Solørbanen: Elverum til Kongsvinger.
Kongsvingerbanen: Kongsvinger til Lillestrøm.

Alternativ 4: Dovrebanen: Støren-Hamar
Rørosbanen: Hamar-Elverum
Solørbanen: Elverum-Kongsvinger
Kongsvingerbanen: Kongsvinger til Lillestrøm.

I tillegg til hovedalternativene finnes det flere alternativer ved å benytte Gardermobanen på deler av strekningen. Det kan også nevnes at det er mulig å komme seg fra Trondheim til Alnabru ved å ta i bruk det svenske jernbanenettet, dette er derimot en lang vei og vi vil her betrakte det kun som en mulig redundansstrekning og ikke regne det som et alternativ.

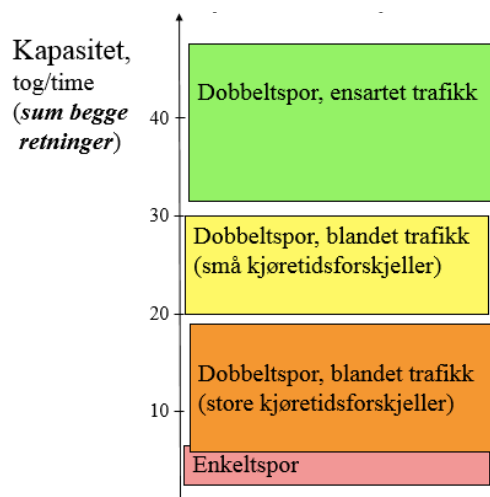
Det er selvsagt også en mulighet å bygge nye strekninger, men bygging av nye strekninger i sin helhet er generelt veldig dyrt, og ville trolig ikke gi mest økt kapasitet for investerte midler. Ved å forlenge gjøvikbanen videre nordøstover slik at den sammenkobles med Dovrebanen, vil en derimot benytte seg av en allerede nesten ferdig utbygd strekning til Alnabru og kan slik være aktuell. På den andre siden er det også trafikk på Gjøvikbanen i dag, så det er noe begrenset hvor stor kapasitetseffekt en slik utbygging vil ha.

3.3 Forslag til kapasitetsøkende tiltak

Vi vil studere hvilke rutevalg og investeringer som kan løse kapasitetsbehovet på en mest mulig effektiv måte. Det første alternativet er å finne de beste investeringene i kapasitet på den allerede benyttede banen. De andre alternativene bygger på at vi også kan dra større nytte av vi har alternative traseer på det meste av veien. I hovedsak ønsker vi å studere effekten av å kjøre retningsdrift, eller ved å separere trafikken.

Retningsdrift

Retningsdrift vil si å benytte et ringnettverk av to baner til å kjøre nordover på en bane og sørover på den andre banen. På denne måte kan vi i teorien benytte to enkeltsporstrekninger tilnærmet som et dobbeltspor, og kan slik oppnå en mye bedre kapasitet sammenlignet med å drifte de som to enkeltspor, se figur 6.



Figur 6: Typiske kapasitetsnivåer (kvalitativt) (Skartsæterhagen 2015, 33)

Vi har to hovedalternativ til retningsdrift: Vi kan kjøre retningsdrift fra Støren til Hamar, eller fra Støren til Lillestrøm. Dette er mulig da begge disse alternativene utgjør et sirkelnett. Den forholdsmessige kapasitetsgevinsten ved å legge om til retningsdrift vil være ekstra stor siden Rørosbanen og Solørbanen har så liten kapasitet på grunn av få kryssingsspor. Ved ren retningsdrift vil en kun ha behov for kryssingsspor til forbikjøring og vi kan dermed ha stor kapasitet med få kryssingsspor.

Grunnen til at dette ikke blir gjort er trolig at det meste av strekningen ikke er elektrifisert, så for å benytte retningsdrift medfører det at en må kjøre med diesellokomotiv i begge retninger.

Dette er ikke ønskelig da det bringer med seg flere negative konsekvenser hvor høyere driftspris og miljøskadelig er de viktigste. I tillegg må man anskaffe flere tog av ”gammel teknologi”.

Vi antar dermed at vi må elektrifisere strekningene om vi vil benytte dem til å kjøre retningsdrift. Et annet moment som taler imot retningsdrift er at det er tog som ikke kan ta del i retningsdriften av praktiske årsaker, for eksempel må regionstog kunne gå fram og tilbake på samme strekningen. Det vil også være svært tungvint for godstog fra Raumabanen og tømmertog på Dovre, Røros- og Solørbanen å ta del i retningsdriften. Dette fører til at vi bare kan drive delvis retningsdrift blir betydelig redusert på de stedene der den vil møte annen trafikk. Vi vil kunne kjøre uforstyrret retningsdrift på strekningen Koppang -Støren-Dombås, som utgjør omtrent halvparten av den lille ringstrekningen og en tredjedel av den store ringstrekningen. Det vil likevel fortsatt være mulig å benytte ren retningsdrift på visse tider av døgnet.

Hvilken strategi som blir fordelaktig må vi undersøke kvantitativt. Vi vil også ta for oss effekten av puljekjøring, økt toglengde, økt aksellast, økt hastighet, samtidig innkjør med flere. For å kunne finne ut hvilken strategi som er fordelaktig må vi undersøke dette kvantitativt gjennom en modell, først vil vi se nærmere på kapasitetsteori.

4 Kapasitetsteori

Vi vil i stor grad basere oss på teori fra Skartsæterhagen (Skartsæterhagen 1993).

For godstransport er det viktigste målet på strekningskapasitet hvor mange tonn en klarer å frakte over en gitt tidsenhet [tonn/tidsenhet], dette kaller vi Transportkapasitet (Jernbaneverket 2015e, 20). Denne kan økes ved å øke en av faktorene under.

- Trafikkkapasiteten [tog/tidsenhet]
- Toglengden [m]
- Aksellasten [tonn/m]

De ulike faktorene bringer med seg hver sine utfordringer: For å øke trafikkkapasiteten må en ha ett strekningsnett og kjøre togene i en rekkefølge som øker kapasiteten. Ved å øke toglengden vil en sette ekstra krav til lengde på kryssingsspor og terminalhåndtering. Mens det å øke aksellasten setter ekstra krav til sporet og dets underbygning. De to sistnevnte vil også sette krav til ekstra trekkraft fra lokomotivene. Vi vil i denne oppgaven rette fokuset mot trafikkkapasiteten og toglengden, og ta aksellasten som gitt til 22,5 tonn.

Vi definerer noen størrelser som vi trenger for å beregne trafikkapasitet, heretter omtalt som kapasitet:

T - tidsrom, vi operer vanligvis med et tidsrom på en time, eller 24 timer(døgn) [t]

K - teoretisk maksimal kapasitet i et tidsrom T [tog/t], t - togfølgetid [s]

Kapasiteten er nå gitt av følgende formel:

$$K=T/t$$

4.1 Beregning av togfølgetid

For å finne den teoretiske makskapasiteten vil vi beregne den minste mulige togfølgetiden. Med minste togfølgetid menes *den minste tidsavstanden hvor det ene toget kan kjøre uhindret av det*

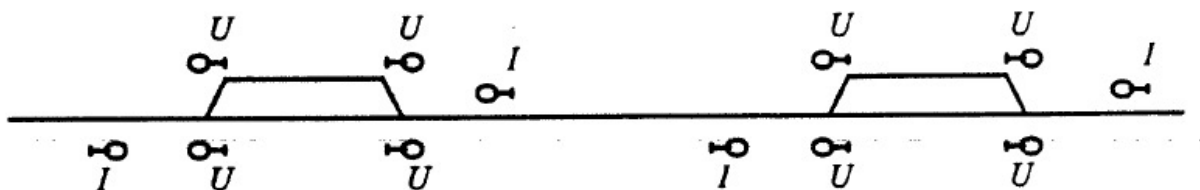
første (Skartsæterhagen 1993). Minste togfølgetid er avhengig av flere faktorer som vi vil ta for oss under.

4.1.1 Enkeltspor/dobbeltspor

På strekningen Alnabru-Heimdal har vi stort sett enkeltspor, men også noen strekninger med dobbeltspor nærme Oslo. Beregningene av togfølgetid er forskjellig for enkeltspor og dobbeltspor ettersom en på dobbeltsporene kjører tog i bare en retning, mens en på enkeltspor vil kjøre tog i begge retninger på de samme skinnene. For dobbeltspor er det essensielt å beregne kjøretidsforskjeller, mens en på enkeltspor vil beregne kjøretid over dimensjonerende strekning.

4.1.2 Signalsystem

For at et tog skal kunne kjøre trygt må det holde en gitt avstand til toget foran. En absolutt minimumsavstand for å forhindre ulykker er en bremselengde inkludert reaksjonstid og teknisk tid. Hvilken sikkerhetsavstand vi bruker i praksis kommer an på valg av signalsystem. I Norge benytter vi romblokkprinsippet som sikkerhetssystem, dette vil si at kun ett tog kan benytte en blokkstrekning samtidig. En blokkstrekningene er ”En sporstrekning hvor det til enhver tid bare kan befinne seg ett tog av gangen” (Jernbaneverket 2011). Blokkstrekningen styres av hovedsignal som viser om det er tillatt å kjøre. Når hele blokkstrekningen er fri for tog får det neste toget klarsignal til å kjøre. På enkeltsporede strekninger er hovedsignalene normalt plassert ved inn og utkørselen fra en stasjon, eller kryssingsspor, se figur 7.



Figur 7: Plassering av hovedsignal for inn- og utkjør på enkeltspor.

Et tog må være i stand til å stoppe ved et hovedsignal som viser rødt. Dette innebærer at toget ofte må holde lav fart slik at bremselengden til toget ikke overskrider siktavstanden til signalet. Siden et tog ikke alltid har nytte av å stoppe ved hver togstasjon, men vil opprettholde fart forbi stasjonen har vi også forsignal. Forsignalet står omtrent en bremselengde forann hovedsignalet

og viser om toget kan fortsette med full fart, eller må starte med nedbremsingen. Et signalsystem med et hovedsignal og et forsignal kaller vi 3-aspekt signalering, og er det som blir brukt på de fleste strekningene i Norge. Vi setter opp følgende uttrykk for minste togfølgetid ved 3-aspektsignalering

$$t = (b+f+l) / v + t_{\text{sikt}} + t_{\text{tekn}}$$

t_{min} - minste togfølgetid [s]

b - blokk lengde [m]

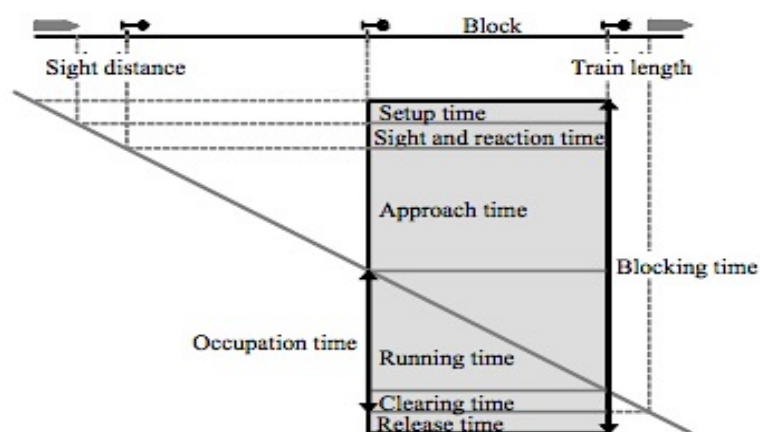
f - forsignalavstand [m]

l - toglengde [m]

v - snitthastighet [m/s]

t_{sikt} - siktaavstand, tiden fra bremsingen innledes til en passerer signalet [s]

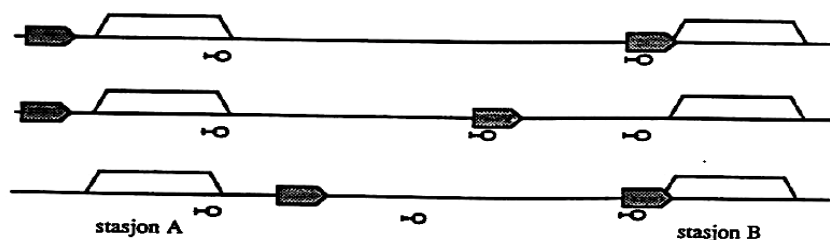
t_{tekn} - teknisk tid [s]



Figur 8: Komponentene i minste togfølgetid. (Goverde 2013, 7)

På blokkstrekninger hvor det er langt i mellom kryssingssporene er det vanlig å sette opp et ekstra hovedsignal kalt blokkpost for at to tog i samme retning kan kjøre tettere. I figuren under

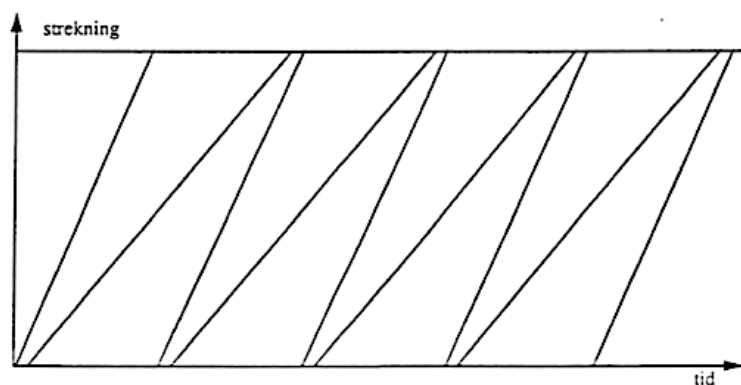
ser vi det tetteste to tog som kjører i samme retning kan ligge for å kjøre uhindret av hverandre (ikke få restriktive signaler), på strekninger med og uten blokkpost.



Figur 9: Minste togfølgetid. Øverst uten blokkpost. I midten første del dimensjonerende. Nederst er siste del dimensjonerende.

4.1.3 Ensartet og blandet trafikk

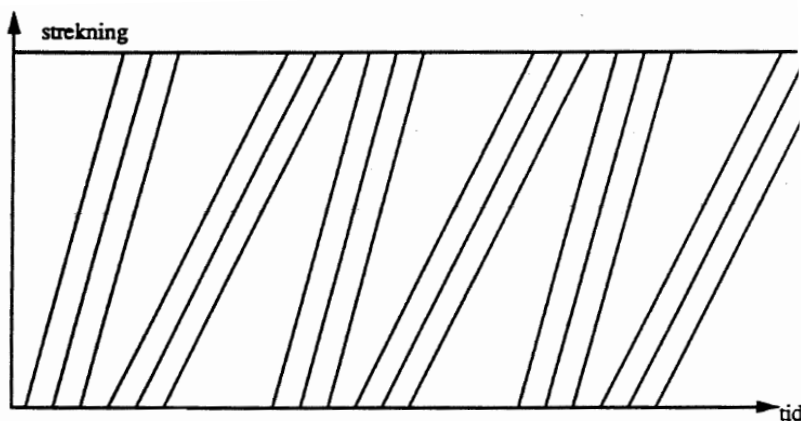
For ensartet trafikk på dobbeltspor kan vi finne den optimale hastigheten som gir teoretisk størst kapasitet. Ensartet trafikk vil si at togene kjører med lik fart og rytme og dermed bruker like lang tid på hver strekning, til forskjell fra blandet trafikk hvor vi vil se forskjeller i kjøretid. Ved blandet trafikk på dobbeltspor vil ofte kjøretidsforskjellen (Δt), mellom togene ha mye mer å si for strekningens kapasitet, enn akkurat hvilken hastigheten de holder. For blandet trafikk vil kjøretidsforskjellen (Δt), for de ulike togene bli lagt til på togfølgetiden til det raske toget. Dette kan vi se illustrert under i figurens x-akse hvor togfølgetiden er vekselvis liten og stor. Vi må her beregne den gjennomsnittlige togfølgetiden t_m og vekte etter antall forekomster av de ulike togfølgetidene.



Figur 10: Blandet trafikk, dobbeltspor et raskt og et tregt tog

Dersom togene hadde kjørt i like stor hastighet kunne vi hatt mange flere avganger og dermed høyere kapasitet. Vi kan illustrere dette med et enkelt regneeksempel: Dersom minste togfølgetid er 3 minutter, tog B er 9 min raskere enn tog A, og de kjører annenhver gang. Tog B må da starte $3+9=12$ minutt etter tog A for å holde minimum tillatt avstand hele veien. Vi ser dermed at tog B har fått en 4-doblet togfølgetid, mens tog A sin togfølgetid fortsatt er 3 min. Midlere togfølgetid blir da $(3+12)/2=7,5$ min og kapasiteten er dermed 40% av hva den var ved ensartet trafikk.

For å få høyere kapasitet er det mulig å minske kjøretidsforskjellen (å gjøre trafikken mer ensartet) ved å ikke kjøre de raske togene i full fart. Slik vil en oppnå høyere kapasitet, men forlenget reisetid for de raske togene. Et annet alternativ for å få høyere kapasitet er å kjøre puljekjøring, dette øker kapasiteten da en sjeldnere trenger å legge til Δt .



Figur 11: Puljekjøring med tre like tog etter hverandre (Skartsæterhagen 1993, 10)

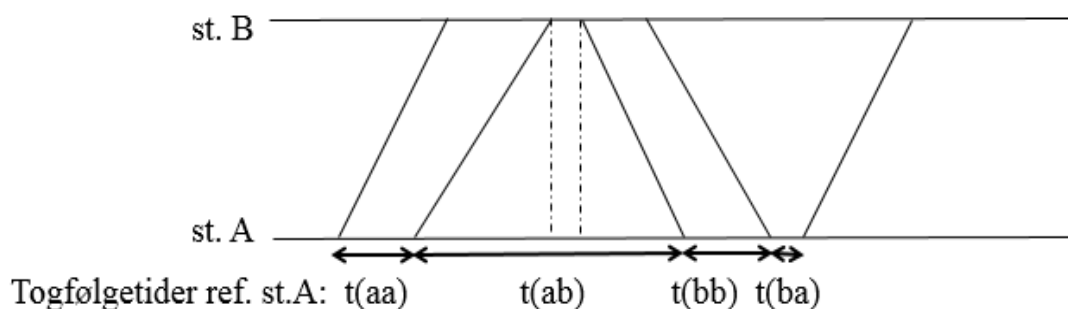
Ved to hastigheter på tog og vi kjører i puljer på n like tog etter hverandre blir togfølgetiden som gitt under. Vi ser at ved høyere n får kjøretidsforskjellen mye mindre å si for midlere togfølgetid.

$$t_m = \frac{[(2n - 1)t + (t + \Delta t)]}{2n} = t + \frac{\Delta t}{2n}.$$

På enkeltspor vil ikke blandet trafikk gi ett like stort utslag på kapasiteten siden vi da må ta hensyn til at det kjører tog også i motgående retning. De samme prinsippene vil likevel gjelde og man kan få nytte av puljekjøring særlig om man også kan benytte en annen form for puljekjøring hvor tog i samme retning kjører etter hverandre.

4.1.4 Togfølgetider på enkeltspor

Ved kjøring på enkeltspor må vi ta hensyn til retningen til de to etterfølgende togene, så vi definerer togfølgetidene t_{aa} , t_{ab} , t_{bb} og t_{ba} som vist i figuren under. Som i forrige avsnitt må vi finne den gjennomsnittlige togfølgetiden t_m .



Figur 12: Togfølgetider mellom to kryssinger ved enkeltsporet drift (Skartsæterhagen 1993, 45)

For å få en høyest mulig kapasitet på enkeltspor må vi redusere kjøretiden over den dimensjonerende strekningen. På strekninger med blokkposter, eller ved ERTMS (omtalt senere) vil det i tillegg gi en høyere kapasitet jo flere tog en kan framføre etter hverandre i samme retning.

4.1.5 Sammenfatning

For å beregne makskapasiteten til en strekning, ser vi altså på rekkefølgen togene benytter den dimensjonerende blokkstrekningen i og vekter etter dette. For tog som kjører i motgående retning må vi regne med at det skjer en kryssing i hver ende av blokkstrekningen de møtes. Grunnen til dette er at vi ser på flaskehalsen i systemet og det vil ved maks bruk av kapasiteten alltid være behov for kryssing her, og om man flytter kryssingen vil dette bare gjør at blokkstrekningen blir lengre. Dersom togene kjører i samme retning regner vi togfølgetiden mellom to blokkposter der dette finnes.

4.2 Praktisk kapasitet

Vi har til nå sett på teoretisk kapasitet, i praksis vil vi kjøre togene med større mellomrom enn det den teoretiske kapasiteten tilsier. Vi innfører begrepet praktisk kapasitet, Skartsæterhagen definerer dette som "Kapasiteten av en strekning er evnen til å fremføre tog med en akseptabel

punktlighet” (Skartsæterhagen 1993, 1). Punktligheten vil være høyere om vi legger inn en ekstra buffertid mellom togene slik at man i større grad kan forhindre forsinkelser i å forplante seg videre. For blandet trafikk ligger det noe naturlig slakk i systemet ved at et raskt tog kan holde lik fart som det trege toget og slik forhindre forplantninger av forsinkelser. Dette er mulig siden vi ikke trenger å legge til kjøretidstillegget og togfølgetiden blir da t_{min} istedenfor $(t_{min} + \Delta t)$ ref. Avsnitt 4.1.3 Ensartet og blandet trafikk. Ved ensartet trafikk er det ikke noen slik mulighet så her er det spesielt viktig å legge inn en buffer. Det er også noe naturlig slakk i systemet når de ulike strekningsavsnittene har ulik kapasitet, hvor det er mer slakk jo større forskjellen i kapasitet er. Skartsæterhagen skriver: ”Hvis strekningen med lavest kapasitet har markert lavere kapasitet enn de øvrige (”flaskehals”), synes det derimot rimelig å la den praktiske kapasitet for strekningsavsnittet også bli den praktiske kapasitet på totalstrekningen” (Skartsæterhagen 1993, 16).

Det kan også være aktuelt å legge til et tillegg som går på lengden av totalstrekningen i følge Skartsæterhagen ”Det synes jo rimelig at det er vanskeligere å framføre tog med en viss punktlighet over en lang strekning enn over en kort. Dette er særlig aktuelt hvis kapasiteten er omtrent like stor på de ulike strekningsavsnittene.” (Skartsæterhagen 1993, 16). Et slikt tillegg er likevel kun aktuelt ved noenlunde jevn tidsmessig avstand mellom kryssingsporene.

Som vi ser må det brukes skjønn tilpasset hver strekning, hvor vi må se om det er en, eller flere utpregede flaskehalser i systemet, og vurdere om det er en strekning hvor det forekommer mange forsinkelser av andre årsaker, det være feil på teknisk anlegg, naturens innvirkning, spredning av forsinkelser fra tilknyttede baner etc. Vi definerer disse tilleggene og setter opp en formel for beregning av praktisk kapasitet, sammen med erfaringstall for buffertid og tilleggstid som vi kan ta utgangspunkt i. Vi kan nå beregne den praktiske kapasiten for typiske kapasitetsnivåer se figur.

T	- Tidsperioden man beregner over
t_m	- Midlere minste togfølgetid over dimensjonerende strekningsavsnitt.
t_{buff}	- Buffertid. Anbefalt verdi: $0,33 * t_m$ (timekap.), eller $0,67 * t_m$ (døgncap.)
t_t	- Tilleggstid for totallengde ved jevn tidsmessig avstand mellom kryssingssporene. Antall strekningsavsnitt * 1/4 minutt.

$$K_p = T / (t_m + t_{\text{buff}} + t_t)$$

4.2.1 Stive ruter

Ved beregning av maksimal kapasitet har vi ikke tatt hensyn til stive ruter, bare rekkefølgen på togene og kapasiteten og behovet for buffertid kan da endre seg. Stive ruter vil si at en legger opp til tidsmessige bundne avganger, ved for eksempel å kjøre avganger hvert 15 minutt. Stive ruter vil føre til at kryssinger skjer på de samme stedene hver gang og slike minsker kompleksiteten og behovet for buffertid, samtidig kan en ved å bygge ut kapasiteten for kryssing rundt disse stedene også øke kapasiteten betydelig (Skartsæter 1993, 52). Om de stive rutene derimot bare gjelder for en del av trafikken, kan slike bindinger gjøre at kapasiteten blir mindre, eller at buffertiden blir skjevfordelt, enten ved at d skyver vekk et mellomgående tog, eller at det skaper ekstra togfølgetid mellom togene for å holde en fastsatt frekvens.

4.2.2 Automatisk sikringssystemer

Av sikkerhetsmessige grunner har vi automatiske sikringssystemer på de fleste togstrekningene. I dag har vi disse sikringssystemene en indirekte påvirkning på kapasiteten gjennom at de legger øvre grenser for hvor fort togene kan kjøre. For framtiden er det besluttet at vi skal innføre ERTMS

nivå 2 som sikringssystem, dette vil påvirker kapasiteten bl.a. ved at togene benytter kontinuerlige signal istedenfor dagens ytre signaler.

Dagens sikringssystem

Vi skiller mellom strekninger med FATC, DATC og strekninger uten fjernstyring. DATC skal hindre at tog kjører på rødt lys , mens FATC i tillegg kontrollerer om togene



Figur 13: Automatiske sikringssystem (Jernbaneverket 2013c)

- Strekning med FATC/Lin
- Strekning med DATC/Line with partially automatic train control
- Strekning uten DATC eller FATC/Line without automatic train control

kjører over tillatt hastighet (Jernbaneverket 2013c). Som vi ser på figuren er det installert DATC på de aktuelle strekningene med unntak av Støren-Røros og Elverum-Kongsvinger, hvor det ikke er noe automatisk styringssystem.

ERTMS

ERTMS sin hovedoppgave er å øke sikkerheten, men en innføring vil også påvirke kapasiteten på banen. Ofte vil en innføring av ERTMS øke kapasiteten på en strekning, men det kan også minske kapasiteten. Vi vil se nærmere på hvordan ERTMS påvirker kapasiteten. Hvor det stort sett er sikkerhetsmessige årsaker som reduserer kapasiteten.

Økt kapasitet:

- Tilnærmet fritt antall blokker, n-aspekt”, med blokkstrekninger ned mot 30 meter + bremselengde.
- Hvert tog starter bremsingen i en avstand tilpasset sine egenskaper.
- Lettere å unngå spredning av forsinkelser, da en har kontinuerlig oppdatering og kan dermed legge til en mindre buffertid for samme pålitelighet. (Skartsæterhagen 2015)

Redusert kapasitet:

- Større sikkerhetsmargin ved bremsing.
- Lengre reaksjonstider i de tekniske anlegg.
- Tettete hastighetsovervåkning, som sikrer mot at en ikke kjører over fartsgrensen. ATC griper inn ved 9 km/t over nominell mens ERTMS griper inn ved 3 km/t over tillatt hastighet.

Ved 3-aspekts signalering har vi følgende uttrykk for togfølgetid $t_m = (b+f+l) / v + t_{sikt} + t_{tekn}$.

Ved ERTMS nivå 2 vil togfølgetiden for tog i en retning bli: Bremselengde+ sikkerhetsavstand+ avstand mellom signal (minst 30 meter)+ t_{tekn} . Siktavstanden t_{sikt} regner vi som null, mens teknisk tid t_{tekn} vil øke. Dagens sikringsanlegg har teknisk tid på ca 1s, mens erfaringstall for ERTMS i Sveits viser 12 s, mens fra Norge er det 18-20 sek inkludert omlegging av sporveksel. (Skartsæterhagen 2015)

5. Modellen

Vi vil nå bygge opp en modell basert på kapasitetsteorien fra forrige kapitel. For å kunne gjøre dette må vi finne ut hvilke overordnede antakelser vi legger til grunn for togframføringen. Hvilke toggrupper har vi? Hvilken rekkefølge vil togene kjøre i? Hvilken prioritet har togene ved kryssinger og forbikjøringer? Disse og flere spørsmål vil vi vurdere og konkludere med her og legge til grunn for beregningene av togfølgetid og kapasitet. Vi vil med utgangspunkt i disse antakelsene se på hvordan vi beregner de ulike variablene. Til slutt vil vi anslå verdier for de ulike parametere som vi trenger for å beregne kapasiteten.

5.1. Dimensjonerende strekning

Som vi så i teorien i forrige kapitel, vil vi beregne kapasiteten til en strekning ved å se på kapasiteten til det dimensjonerende strekningsavsnittet. Hvilket strekningsavsnitt som er det dimensjonerende vil kunne variere ut i fra togmixen og togrekkefølgen, både med tanke på kjøretidsforskjeller og lengde på kryssingsspor. Ved hastighetsforskjeller vil tilgjengelighet på forbikjøringsmuligheter også spille en stor rolle for kapasiteten.

5.1.1 Toggrupper

For å kunne beregne kapasiteten må vi vite først vite hvilke typer tog som skal trafikkere strekningen. Vi deler togene opp i grupper etter deres kjøretid over dimensjonerende strekning, hvor grovinndeling av togene er raske tog (persontog) og trege tog (godstog). Enkelte steder kan vi være nødt til å dele gruppene videre opp i lokaltog og fjerntog. Den faktiske inndelingen vil variere noe fra strekning til strekning og vi vil presisere den for hver delstrekning senere. Vi velger i utregningene å se bort i fra tømmer tog da disse er relativt fleksible og rutene kan i fremtiden flyttes dit det er ledig kapasitet (Olsson 2016).

5.1.2 Togrekkefølge

Som vi har sett i teoridelen vil kapasiteten på en strekning være avhengig av togrekkefølgen. For enkeltspor må vi vite hvilken rekkefølge togene kjører i både med tanke på retning og i henhold til hvilken toggruppe de hører til. Det er vanlig å anta at tog kjøres i motsatt retning annenhver gang (Jernbaneverket 2010b, 42), siden det ofte er ønskelig å fordele avgangene og dette kan være kapasitetsmessig gunstig for strekninger som er relativt likt dimensjonerte. Grunnen til dette er at det vil sette veldig store krav til kapasitet på det stedet hvor gruppene

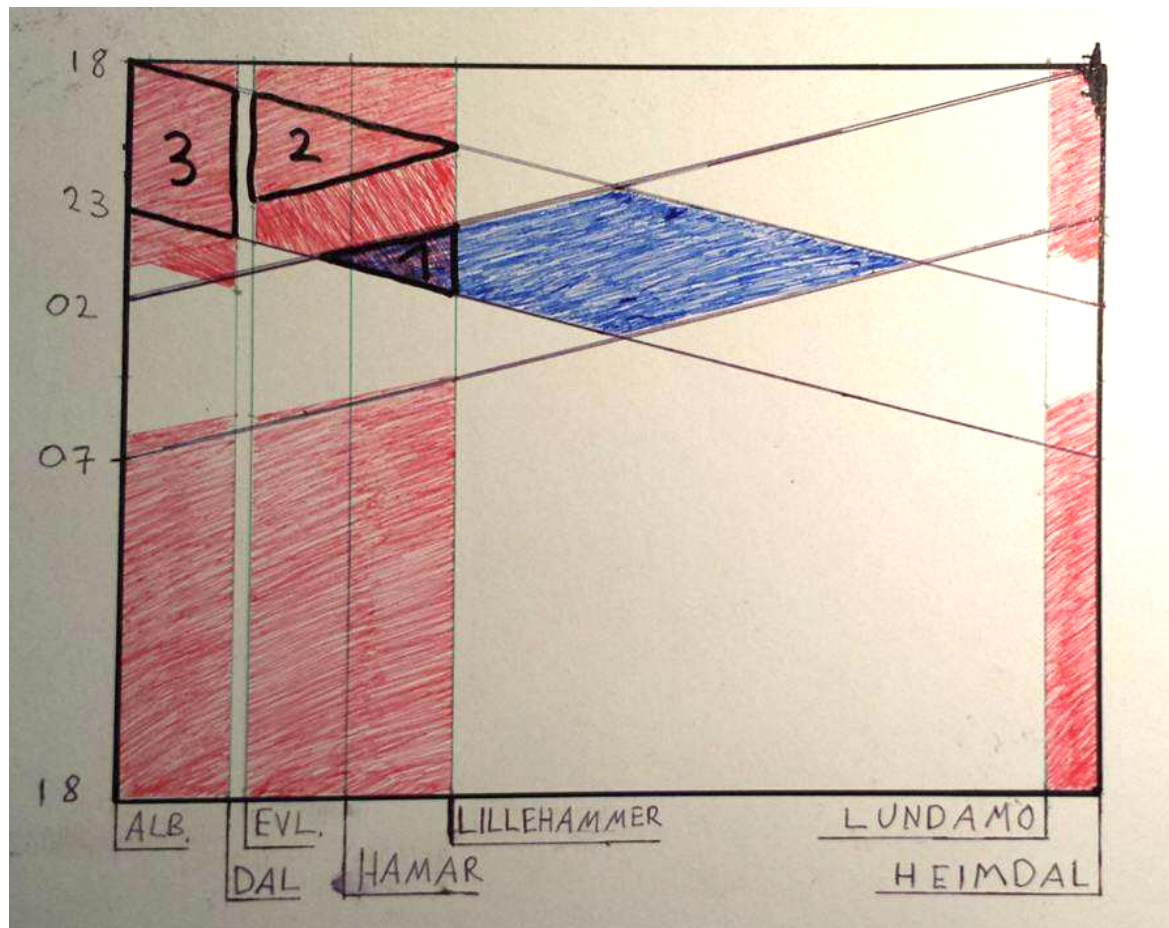
med puljekjøring skal krysse hverandre. Dersom en derimot har tilgang på dobbeltsporparseller kan en slik retningsstyrt puljekjøring øke kapasiteten betydelig.

5.1.3 Andel av tog fra hver toggruppe

Videre må vi vite hvilken andel av togene som hører til hver gruppe. Andelen av hver toggruppe vil variere mye i løpet av døgnet, hvor vi i hovedtrekk har at det kjøres mest gods på natten, og flest persontog på dagen. Vi vil som diskutert i innledningen ta fordelingen av persontrafikk og godstrafikk utover døgnet som gitt, da dette er i henhold til brukernes interesse, og er det behovet vi ønsker å dekke. Vi velger å se på trafikken i hverdager da det er her det er tettest trafikk og behovet for kapasitet er størst.

Det mest ettertraktede tidspunktet, ”prime time”, for godstransport er å sende gods av gårde ved endt arbeidsdag og motta gods i starten av arbeidsdagen. Vi anslår at prime time for gods er å forlate avgangsterminalen etter klokken 18 og komme fram til endeterminalen før klokken 7 neste morgen (Jernbaneverket 2010b, 27). Vi forutsetter at godstogene vil gå med dobbelt så høy frekvens innenfor dette tidsvinduet, som det det vil gjøre resten av døgnet. Et slikt trafikkbilde stemmer godt overens med dagens trafikk og mål for godstrafikk i 2050 (Jernbaneverket 2015a).

Vi antar en kjøretid for godstog på 8 timer (snittet av rute 5707 og 5709 i grafisk rutetabell) mellom Alnabru og Heimdal og forenkler det til at holdes jevn fart. Inntegnet i figuren er primetime-vinduet for gods i hver retning med avgang fra 18-23 og ankomst 2-7. Biten markert i blått er delen hvor godstog tilhørende primetime vinduet fra begge sider møtes. Det som er markert i rødt viser lokal- og regionstog, vi har inkludert trafikken mellom Oslo og Dal, selv om denne muligens vil benytte Gardermobanen på store deler av distansen.



Figur 14: Lokal- og regiontogtrafikk og primetimevinduet for godstog.

Figur 14 viser tidsrom og steder hvor det er behov for ekstra kapasitet, i figuren har vi markert 3 av disse:

- 1- Her møtes det dobbel mengde gods fra begge retninger, samt regionstog til Lillehammer.
- 2- Dobbelt mengde gods fra Alnabru, i tillegg til trafikk i begge retninger mellom Eidsvoll og Lillehammer.
- 3- Dobbelt mengde gods fra Alnabru, i tillegg til trafikk i begge retninger mellom Alnabru og Dal.

Det er naturlig å tenke at vi må beregne behovet for kapasitet i tidslukene med høyest trafikk, men som vi har sagt er praktisk kapasitet et spørsmål om punktlighet, og evnen til å hindre forsinkelser i å spre seg. Togene kan kjøre med en mindre buffertid for en time ($0,33 t_m$) enn over et døgn ($0,67 t_m$). Det er dermed ikke gitt hvilken av den vanlige og makstrafikken som setter størst krav til kapasiteten. I figuren vil de markerte områdene med ekstra trafikk være fra

omtrent 2-5 timer, vi anslår at vi da kan bruke en mellomting mellom de to estimatene for buffertid og setter denne skjønnsmessig til $0,5 t_m$. Samtidig anslår vi at tidsrommene med størst trafikk blir dimensjonerende for strekningen.

Figuren kan vi nå bruke til å anslå trafikken i hver retning for de ulike delstrekningene under maksbehovet for kapasitet. Makstrafikken mellom Alnabru og Lillehammer har vi allerede beskrevet under punkt 1,2 og 3 over. For den blå seksjonen som strekker seg fra Lillehammer til Kongsvoll vil trafikken være lik i begge retninger under makskapasitet, mens den vil være ulik mellom Kongsvoll og Heimdal.

5.1.4 Togmix

Kapasiteten er også avhengig av togmixen de ulike togene kjører i. Spesielt viktig er togmixen for dobbeltspor, men kan også ha noe å si på enkeltspor hvor det er lagt inn blokkposter, eller bruk av ERTMS. Togmixen vil ofte være gitt i tilfeller med stor forskjell i antall tog fra hver toggruppe, men der hvor det er omtrent lik mengde av tog kan togmixen ha mye å si for kapasiteten. Ved å tillate forbikjøringer vil tidstillegget for kjøretidsforskjellen synke betraktelig, da en kan regne kjøretidsforskjellen over en mye kortere strekning. Vi vil starte med å anta at togene i utgangspunktet kjører maksimalt blandet, dette vil gi oss et konservativ estimat av kapasiteten på strekningen.

5.1.5 Kjøretidsforskjell

Det er flere årsaker til kjøretidsforskjell, hvor den mest åpenbare er hastighetsforskjeller mellom togene, men det er også flere andre ting som spiller inn.

Tabell 1: Årsaker til kjøretidsforskjell

Årsaker til økt kjøretidsforskjell	Årsaker til minsket kjøretidsforskjell
Forskjell i tillatt hastighet	Rutemessige stopp for persontrafikk
Forskjell i akselerasjon	
Antall stopp	
Prioritet ved kryssing	

Ulik akselerasjonen vil være en faktor som fører til kjøretidsforskjeller. Godstog vil typisk ha dårligere akselerasjon, så ved mange stopp for kryssinger, vil dette føre til en økt kjøretidsforskjell. På den andre siden har ikke godstogene rutemessige stopp slik som persontog. Slike rutemessige stopp vil ofte skje i forbindelse med kryssinger av motgående tog og forskjellen i tidsbruk blir da bare ekstra tid som toget står på perrongen som følge av at passasjerer går av og på. Slike stopp vil i størst grad påvirke lokaltrafikken som har flest stopp. Den kanskje viktigste faktoren til kjøretidsforskjell er ulik prioritering av tog, hvor fjerntog og regionstog blir prioritert ved kryssing (Jernbaneverket 2010b; og Jernbaneverket 2015g)

5.1.6 Forbikjøring

Ved kjøretidsforskjeller kan det være aktuelt med forbikjøring for å øke kapasiteten (Skartsæterhagen 1993, 3-13). Grunnen til at forbikjøring her kan gi større kapasitet er at avstanden vi regner kjøretidsforskjellen Δt over minker. Med forbikjøring følger det også noen negative konsekvenser: For det første vil det binde opp et kryssingsspor den tiden forbikjøringen skjer. For det andre vil forbikjøring også øke kjøretiden til toget som blir forbikjørt med et minimum på 2 togfølgetider pluss tidstap for akselerasjon og retardasjon.

Forbikjøring er mulig når kryssingssporet er langt nok for toget som blir forbikjørt, som regel godstog, og Δt blir slik beregnet over avstanden mellom to mulige kryssingsspor. Vi antar videre at forbikjøringer kan skje fritt uten å minske kapasiteten. Bakgrunnen for denne antakelsen er at blokkstrekningene har ulik kapasitet og at vi kan utnytte dette til å gjennomføre forbikjøringer. Dette vil gi et noe optimistisk estimat på kapasiteten til strekningen.

5.1.7 Kryssinger

Kryssinger øker kjøretiden med omtrent 4 minutter (Skartsæterhagen 2015) for det ventende toget. Dette inkluderer kryssingslåsetid på 50 -70 sekunder (Skartsæterhagen 2015, 39), 1 minutt kjøretid for motgående tog fra dets forsignal og forbi kryssingspunkt ($800\text{m} + 250\text{m} + (l_{\text{tog}}=300\text{m})$), begge togs siktavstand/reaksjonstid ($2 \cdot 10\text{ s}$), begge togs teknisk tid for omlegging av sporveksel ($2 \cdot 10\text{ s}$) og til slutt tidstapet som følger av at toget må akselerere opp og ned i fart (77 sek gods og 50 persontog). Tidstapet ved konstant akselerasjon og retardasjon er gitt av henholdsvis $\frac{v}{2r}$ og $\frac{v}{2a}$. Antar hastighet på 80 km/t.

Samtidig innkjør

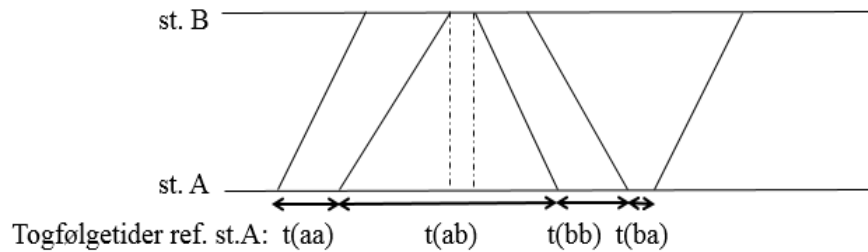
Ved vanlige kryssingsspor kan kun ett tog bevege seg inn på en stasjon om gangen, dette for å sikre mot kollisjon i tilfelle et tog ikke klarer å stoppe til utkjørssignalet og slik kan gli inn på felles spor som motgående tog. For at et tog skal slippe å vente på det andre toget kan vi benytte samtidig innkjør. Dette er mulig ved økte sikkerhetssoner på 250 meter foran stoppunkt samt økt overvåking av toget (Jernbaneverket 2010b, 26; Jernbaneverket 2010a). Samtidig innkjør gjør at ventende tog sparer over 2 minutt sammenlignet med ordinær kryssing siden t_{sikt} , kryssingslåsetid og kjøretid for motgående tog fra dets forsignal blir tatt bort ved samtidig innkjør (Skartsæterhagen 2015, 34-50). Dersom ikke kryssingssporet er veldig langt vil samtidig innkjør gjøre at begge tog må stoppe opp når de er inne på kryssingssporet og mye av gevinsten vil forsvinne.

Samtidig innkjør kan også brukes som en buffer mot avvik slik at vi kan legge til en lavere buffertid mellom togene for å oppnå samme robusthet.

5.2 Dimensjonerende strekning for blandet trafikk på enkeltspor

Ved blandet trafikk på enkeltspor må vi ta hensyn til togfølgetiden for tog både i samme retning og i motgående retning, som gjør dette noe komplisert siden vi dermed får flere kandidater til dimensjonerende strekning. Problemet oppstår fordi vi har ulik lengde på togene og ulik lengde på kryssingssporene: Mange kryssingsspor er lange nok til at et passasjertog kan bruke det, men ikke langt nok for et godstog. Dette resulterer i at kryssingssporet kan bli brukt i kryssinger med minst ett passasjertog, mens en kryssing mellom to godstog ikke er mulig. Et passasjertog kan heller ikke på en praktisk måte benytte et slikt kryssingsspor til forbikjøring.

Den første kandidaten til dimensjonerende strekning finnes ved å utelukkende se på godstogene og regne ut kapasiteten mellom to kryssinger som er lange nok for at to godstog kan krysse. Den andre kandidaten finner vi ved å ta hensyn til alle tog mellom kryssinger som er lange nok for persontog. Hvilken av de to kandidatene som blir dimensjonerende er avhengig av andelen godstog og lengden på togene og kryssingene.



For å beregne kapasiteten til kandidat to må vi benytte togfølgetidene. I kapittel 4.1.4 Togfølgetider på enkeltspor delte vi disse inn i t_{aa} , t_{ab} , t_{bb} og t_{ba} , men siden vi har blandet trafikk må vi nå også skille mellom persontog og godstog. Som følge av blandet trafikk vil det også oppstå kjøretidsforskjeller og rekkefølgen togene kommer i er dermed vesentlig.

5.3 Togfølgetider

Vi definerer togfølgetid som den tiden ett tog låser av en strekning for det neste toget. Inkludert i dette er kjøretidsforskjellen som oppstår mellom mulige forbikjøringspunkt, uavhengig om det er et raskt, eller tregt tog som kjører først.

5.3.1 Togfølgetid for tog i likgående retning

Vi beregner togfølgetid mellom to hovedsignal, dette inkluderer blokkposter, for at togene skal kunne kjøre uhindret av hverandre inkluderer vi også forsignalavstanden. For ensartet trafikk får vi da følgende uttrykk hvor b er avstanden mellom to hovedsignal:

$$t_{lik,ensartet} = t_{tekn} + t_{sikt} + \frac{b + f + l_{tog}}{v} + \frac{v - v_o}{2a} + \frac{v - v_o}{2r}$$

Farten er beregnet ut i fra fartsgrensen over strekket, og variasjoner i tillatt fart gir et tidstillegg for akselerasjon og retardasjon, hvor i sær tillegget for start og stopp vil gi et bidrag. Det er forutsatt at strekkene for å komme opp i tillatt fart er lange nok.

For blandet trafikk må noen ganger legge til for kjøretidsforskjellen mellom forbikjøringspunktene. Vi skille mellom om det første toget er raskt, eller tregt:

$$t_{lik,blandet,raskt} = \max \begin{cases} t_{lik,ensartet} \\ t_{ff} + \Delta_{ff} \end{cases}$$

$$t_{lik,blandet,tregt} = \max \begin{cases} t_{lik,ensartet} \\ t_{nf} + \Delta_{nf} \end{cases}$$

- t_{ff} -togfølgetid ved forrige forbikjøring
- t_{nf} -togfølgetid ved neste forbikjøring
- Δ_{ff} -kjøretidsforskjell fra forrige forbikjøringspunkt
- Δ_{nf} -kjøretidsforskjell til neste forbikjøringspunkt inkludert dimensjonerende strekning

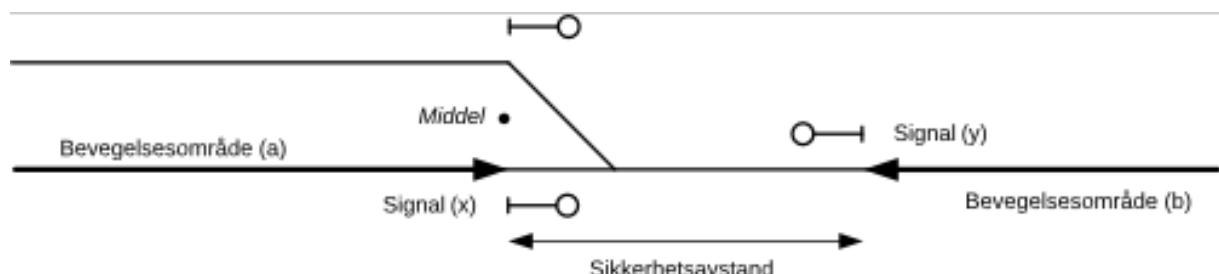
Forrige forbikjøring og neste forbikjøring vil naturligvis være avhengig av hvilken vei de likgående togene kjører. I uttrykket over har vi også gjort en forenkling, siden det også er mulig at blokkstrekninger i mellom kan påføre enda høyere kjøretidsforskjell. Dette vil vanligvis bare være aktuelt om t_{ff} , eller t_{nf} er mye mindre enn den er for blokkstrekningen ved siden av, i så fall kan vi regne togfølgetid og kjøretidsforskjell fra denne isteden.

5.3.2 Togfølgetid for tog i motgående retning

Ved normal kryssing må ett tog stanse på kryssingsspoet, og for å få maksimal kapasitet er det best om det neste toget som skal benytte dimensjonerende strekning står klar på kryssingsspoet. Dette kan enkelt regnes ut at kjøretiden over forsignal er større enn forskjell i tidstep for akselerasjon og retardasjon med våre parametere. Togfølgetiden blir gitt av:

$$t_{mot} = t_{xlås} + t_{tekn} + t_{sikt} + \frac{b + l_{tog} + sikkerhetsavstand}{v} + \frac{v - v_o}{2a} + \frac{v - v_o}{2r}$$

t_{sikt} representerer nå reaksjonstiden og starttiden for toget og vi antar at denne er lik normal verdi for t_{sikt} . Blokkstrekningen er her gitt av distansen fra utkjørssignal på det første kryssingsspoet til middepunkt på det andre kryssingsspoet. Sikkerhetsavstanden er minimum 250 meter (Jernbaneverket, 2016i).



Figur 15: Middepunkt ved motrettede bevegelser (Jernbaneverket 2010a, pkt. 2.2.3)

Merknad: Dersom kjøretidsdifferansen vi så på for likegående tog er større enn den samla kjøretiden over dimensjonerende strekning for de to motgående togene vil denne også være dimensjonerende for togfølgetiden i motgående retning. Kjøretidsforskjellene over de aktuelle strekningene er derimot ikke stor nok til at dette vil være aktuelt her.

Tilleggstid

Som vi har sagt blir regionstog og fjerntog prioritert foran godstog og lokaltog i de fleste kryssinger hvor dette er mulig. Forenklet kan vi si at i tilfeller med ulik prioritering av tog øker togfølgetiden for de to togene med 40 sekund. Dette tilsvarer den ekstra tiden det tar for det prioriterte toget å kjøre over forsignal (800m), sikkerhetssone(250m) og kryssingsspor(730m) i 80 km/t (andre effekter blir kansellert mot hverandre). Vi velger på grunn av kapasitetsnyttene å se bort i fra prioriteringen av tog akkurat over dimensjonerende strekning. Denne forutsetningen kan underbygges av at vi i grafisk rutetabell ser at fjerntog må vente på godstog noen ganger . Et eksempel på dette er tog 405 som venter 6 minutt på tog 5730 på sel kryssingsspor (740 meter). Uttalelser fra samferdselsministeren om at man er villig til å vurdere om godstogene kan få en annen prioritet i togframføringen, ikke minst på sen kveld og natt (Jernbaneverket 2015f), underbygger vår forutsetning videre.

Andre årsaker til tilleggstid er kryssingsspor som er for korte for godstog. Dette vil for hver for korte stasjon gi den samme effekten som ulik prioritering. Utbyggingen av samtidig innkjør vil også gjøre at togfølgetiden blir høyere enn beregnet i formelen over: Om vi antar en fart på 80 km/t gir økte sikkerhetssoner (250m) et tillegg på 11 sekund og behovet for full stopp for utkjørende tog inne på kryssingssporet ($a=-0,5$) et tillegg på 22 sekund som gir en total på 33 sekund. Samtidig innkjør vil her øke togfølgetiden, men det kan også føre med seg kapasitetsgevinster (mindre buffertid) som vil veie opp for dette (NSB,1992).

6. Variabler og parametere

6.1.1 Hastighet

Hvilken hastighet togene har lov å holde vil variere mye over en strekning og er avhengig av sporets kurvatur og overbyggingsklasse, planoverganger, sporvekslere etc. Lovlig hastighet vil også variere mellom de ulike togene etter deres egenskaper.

Vi vil i beregningene anta at persontogene vil holde maksimal tillatt fart for å få kortest mulig kjøretid, som er et viktig mål for persontrafikken (Jernbaneverket, 2016h). For å maksimere kapasiteten kommer det som en naturlig følge at godstogene også vil holde maksimal tillatt fart. Dette stemmer godt overens med dagens praksis: "Ved framføring av fjerngodstog vil lokomotivførerne ofte ligge tett opp mot tillatt hastighet, og det kan ikke utelukkes at man enkelte ganger går litt over tillatt hastighet" (NOU 2001:09).

I tabell 2 kan vi se hvor fort de ulike gruppene av tog har lov til å kjøre med ulike overbygningsklasser og aksellaster. På alle aktuelle strekninger, med unntak av enkelte korte partier på Rørosbanen har vi overbygningsklasse C (Jernbaneverket, 2015h). For blandede godstog og containerekspresser tillates kombinasjonen 22,5 tonn aksellast og hastighet 90 km/h i overbygningsklasse c under forutsetning av at andel av togstammen med 22,5 tonn aksellast ikke overstiger 25% (Jernbaneverket 2016e). Vi vil i våre beregninger anta godstogene mellom Alnabru og Heimdal holder 90 km/t (Jernbaneverket 2015i).

Tabell 2: Sammenheng mellom aksellast og tillatt hastighet for ulike overbygningsklasser. (Jernbaneverket 2016e.)

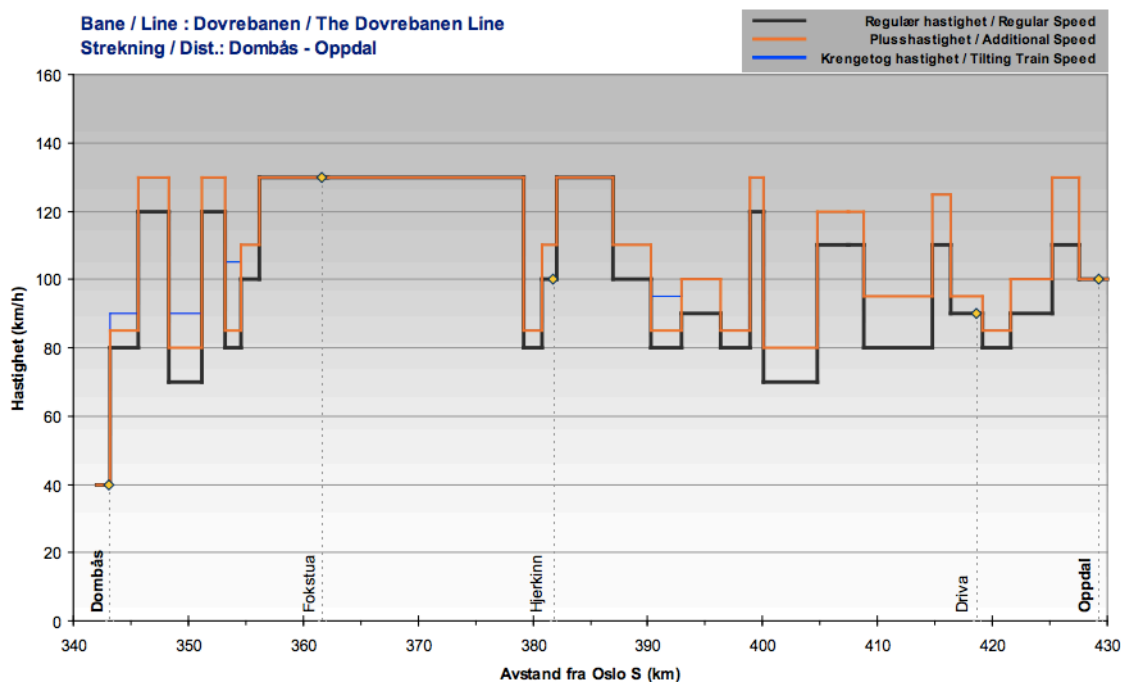
Overbygningsklasse	Vogner i persontog		Motorvognsett		Godstog/arbeidsmaskiner		
	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Nominell aksellast (tonn)	Maks hastighet (km/h)	Maks hastighet boggier godkjent iht EN 14363 (km/h)
a	16	90	16	90	22,5 16,5	30 70	30 70
b	18	100	18	100	22,5 20,5 18	30 70 80	30 70 80
c	18	160	20,5 18	130 160	22,5 20,5 18	80 90 100	90 100 110
c+	18	160	20,5	160	24 ¹ 22,5 20,5 18	50 90 100 110	50 100 110 120
d	18	230	20,5 20 18 17	160 200 250 300	25 22,5 18	70 100 110	70 120 120
Ofofbanen	18	130	20,5	130	30 22,5	50 70 ²	50 70 ²

Togene har også en maks tillatt fart i henhold til lengde. Med antakelsene vi gjorde under avsnittet om aksellast vil godstog opp til 600 meter ha en toppfart på 90 km/t.

Tabell 3: Største tillatte hastighet for godstog ved ulike toglengther (Jernbaneverket 2016f, avsnitt 3.3.2.5)

Lengde (m)	Maks hastighet (km/t)	Bremsegruppe
500	100	P
600	90	P
700	80	P
850	80	G

På de aktuelle strekningene er største tillatte hastighet 130 km/t da det av sikkerhetsgrunner kreves FATC for høyere hastigheter (Jernbaneverket 2016f, avsnitt 3.3.2.5). En innføring av ERTMS vil dermed gjøre at fartsgrensen noen steder kan økes fra 130- til 160 km/t.



Figur 16:Figur skiltet hastighet Dombås-Oppdal(Jernbaneverket 2014c)

Som vi ser på figuren over skiller vi mellom hastighetsklassene regulær, pluss og krengetog. I våre beregninger vil vi for persontog anta et snitt av krengetogshastighet og plussshastighet da da bare noen av togene har krengeing. For godstog vil vi anta regulær hastighet, men med en øvre grense på 80- eller 90 km/t etter hva som er tillatt.

6.1.2 Lengden på godstog

Dagens maksimallengde på alminnelige, rutegående godstog mellom Trondheim- Oslo 480 meter (Jernbaneverket 2015f). Vi vil studere effekten av å øke toglengden til 600 meter da dette er øverste tillatte lengde som kan holde 90km/t, og 740 meter da dette er standard lengde på godstog i Europa. Vi forsetter at det kun er lengden på kryssingsspor som er en begrensende faktor for toglengden.

6.1.3 Aksellast

Vi antar at togene vil kjøre med samme aksellast som i dag, da godstogene maksimalt kan ha 22,5 tonn aksellast med dagens overbyggingsklasse. Å oppgradere til en høyere overbyggingsklasse er for det første dyrt. I en utredning gjort av Jernbaneverket for 25 tonns aksellast på Rørosbanen i 1998 (Jernbaneverket 1998) konkluderte de med at prosjektet ble alt for dyrt. Prosjektet hadde den gang en beregnet prislapp på 3,3 Milliarder. For det andre vil en

ikke kunne utnytte økt aksellast for alle tog, da mange tog vil fortsette videre på strekninger som ikke er dimensjonert for økt aksellast. Det vil også gjøre det mer vanskelig ved behov for omkjøring i avvikssituasjoner.

Kjøring med økt aksellast vil også føre med seg en kraftig hastighetsreduksjon se tabell 2.

6.2 Parameterverdier

Lengde på blokkstrekninger b finner vi i grafisk rutetabell, og tillatt hastighet v over disse finner vi i hastighetsprofilene. For å få rett kjøretid over dimensjonerende strekning må vi legge til ekstra tid for akselerasjon og retardasjon, ved stopp og hastighetsforandringer. For stoppende tog må vi inkludere et tillegg i kjøretiden som følge av akselerasjon og retardasjon.

Tabell 4: Verdier (Skartsæterhagen 1993, 17)

Parameter	3-aspekt	ERTMS L2
t_{sikt} [s]	10	0
t_{tekn} inkludert sporveksel [s]	0	12,9

Parameter	Godstog [m/s ²]	Persontog
a [m/s ²]	$a_{\text{gods}} = 0,2$	$a_{\text{pers}} = 0,4$
R [m/s ²]	$r_{\text{gods}} = 0,5$	$r_{\text{pers}} = 0,5$

Tabell: Verdier benyttet for IC prosjektet akselerasjonsparametere (Tovås 2015, 29).

Bruk av konstant akselerasjon vil gi noe feil verdier ved tunge godstog, høy hastighet, stigning osv., men det er ok i de fleste sammenhenger (Skartsæterhagen 2015). Vi skiller her ikke mellom elektrisk og dieseldrevne tog.

Forsignalavstand

I et 3-aspekts signalsystem er den optimale plassering av forsignal avhengig av bremselengden til togene. Forsignal plasseres et minimum på 800 meter foran hovedsignal og denne avstanden vil øke ved høyere hastighet og ved fall etter tabellen under (Jernbaneverket 2010a, pkt. 2.1.3). Strekningene vi ser på har ferdig utbygd signalsystem og å forandre signalplasseringen vil gi

liten nytte igjen for kostnaden og nedetiden for sporet en slik utbygging medfører, særlig når det er bestemt at ERTMS, som ikke benytter ytre forsignaler skal innføres på alle aktuelle strekninger. Plasseringen av forsignal tar vi dermed som fast og antar denne er plassert 800 meter før hovedsignal, som samsvarer med bremselengde for persontog på 120-130 km/t og godstog 80-90 km/t (Skartsæterhagen 2015, 18).

Fall f [‰]	Strekningens høyeste tillatte kjørehastighet [km/h]														
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	≥ 130
	Avstand [m]														
f < 1	800	800	800	800	800	800	800	800	800	841	911	984	1060	1139	1220
1 < f < 5	800	800	800	800	800	800	800	800	816	888	963	1041	1121	1205	1292
5 < f < 10	800	800	800	800	800	800	800	800	865	942	1022	1106	1193	1282	1376
10 < f < 15	800	800	800	800	800	800	800	844	924	1007	1093	1183	1277	1374	1474
15 < f < 20	800	800	800	800	800	800	825	907	994	1084	1178	1276	1378	1483	1593
20 < f < 25	800	800	800	800	800	808	894	985	1080	1179	1282	1389	1501	1617	1738

Figur 17: Plassering av frittstående forsignal

7.Kapasitetsberegninger

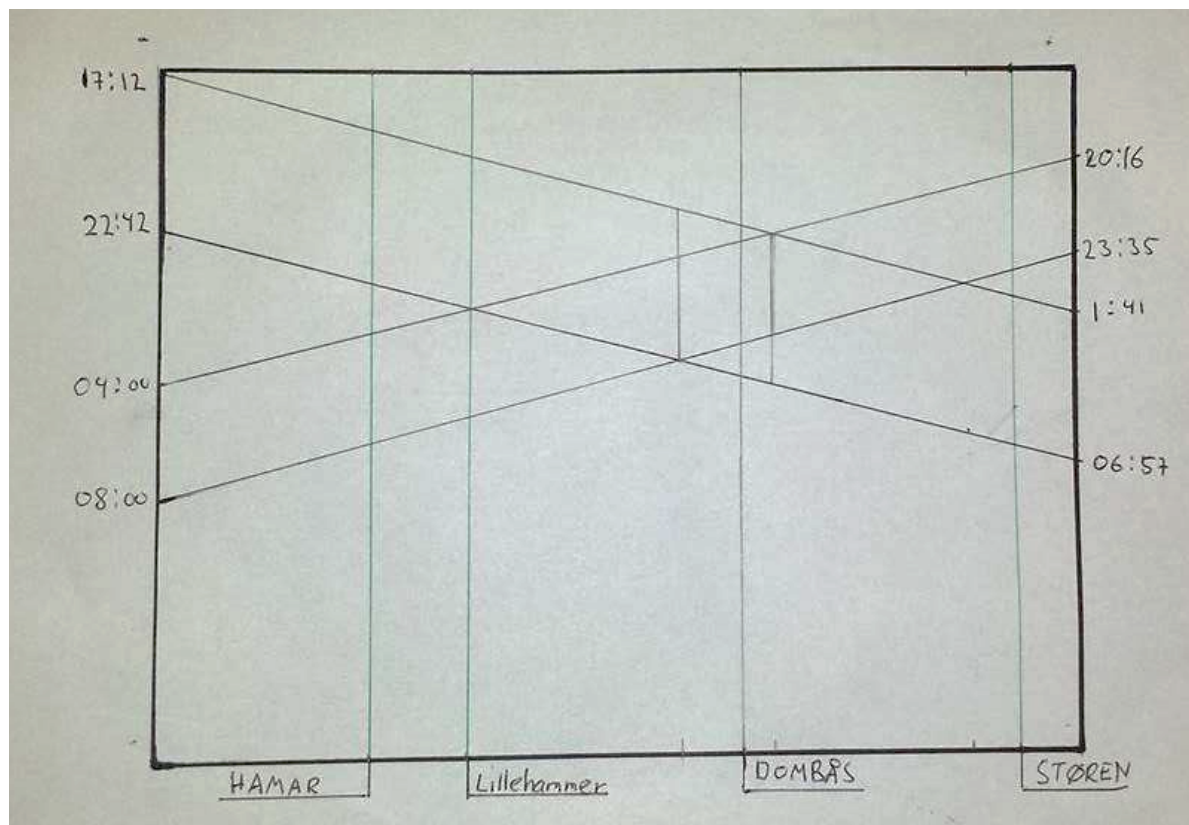
Vi ønsker å legge til rette for en effektiv utbygging av kapasiteten mellom Trondheim og Oslo i et langsiktig perspektiv. Ved å finne det mest effektive trafikkavviklingen i et langsiktig perspektiv kan vi velge kapasitetsutbygginger i årene framover som også vil være gunstige på lang sikt. Vi vil ta utgangspunkt i de ulike driftsstrategiene: Retningsdrift, separert trafikk og økt puljekjøring, samtidig som vi undersøker for ulike tog lengder.

Vi vil fokusere på strekningen Støren- Hamar da dette utgjør et sirkelnettverk og vi her kan teste ut de ulike strategiene opp mot hverandre. Denne strekningen utgjør også 70% av distansen mellom godsterminalene i Trondheim og Oslo. Enda en grunn til å se på denne strekningen er at den i liten grad (bare Hamar-Lillehammer) blir påvirket av den planlagte Intercityutbyggelsen og vi trenger da i mindre grad ta hensyn til endringer i infrastruktur og hastighet som følger med dette.

For å beregne kapasiteten velger vi å dele strekningen opp i mindre segmenter etter hvor det skjer kryssinger av baner, og etter hvor det skjer større endringer i togtilbudet. Vi vil først se på dagens trafikk og se hvor det er press på kapasiteten i dag. Vi vil deretter se på mål for trafikken mot 2050. Vi finner dimensjonerende strekning, togfølgetid og kapasitet som beskrevet i forrige kapittel.

7.1 Dagens trafikk

Trafikken vil variere mye i løpet av dagen, gjennom uken og noe gjennom året. Vi velger å se på den typiske trafikken for mandag til fredag siden er da det er mest trykk på banens kapasitet, og det er også da det kjøres mest godstrafikk. Som vi tidligere har nevnt vil vi oppleve en mye større trafikk av godstog om natten, og tiden med tette trafikk kaller vi godstogvinduet. For dagens trafikk er dette et 5,5 timers intervall nordover og et 3,5 timers intervall sørover, se figur 17. Vi vil se nærmere på hvordan jernbanen klarer å takle en økt godstrafikk så vi vil fokusere på det nordgående godstogvinduet. Det er trolig også innenfor denne tidsperioden det vil være størst behov for kapasitet på strekningsavsnittene listet under, med et mulig unntak for Lillehammer-Hamar.



Figur 18: Dagens godstogvindu

Vi ser at trafikken fra de to godstogvinduerne vil møte hverandre mellom Lillehammer og Oppdal. Samtidig ser vi at trafikken som kjøres i "prime time" er betydelig høyere enn den sørover og er også fordelt utover et større tidsrom. En mulig grunn til dette er at noe av trafikken kommer fra nord for Trondheim, en annen mulig grunn er at en vil forsøke å unngå problemområde 1 fra figur 14. All trafikken i godstogvinduet vil møte hverandre i løpet av et 5,5 timers intervall mellom Kvam og Dovre. Etter som vi beveger oss vekk fra disse kryssingene og mot henholdsvis Lillehammer og Støren vil det bli et stadig mindre tidsintervall hvor en trenger denne maksimalkapasiteten. Effekten av dette er at det reelle behovet for kapasitet vil bli noe mindre siden vi kan regne med en noe lavere buffertid i denne tidsperioden. Mellom Hamar og Lillehammer følger vi derimot bare det nordgående godstogvindu.

For å anta togrekkefølgen antar vi som begrunnet tidligere at trafikken er annenhver retning så godt det går. Etterfølgende tog i likgående retning setter vi opp etter skjønn. Vi regner med at tog nordover krysser først og sist, og det siste toget kan vi naturlig nok ikke ta med i beregningen.

Tabell 5:Dagens trafikk (man-fre), tall fra Grafisk rutetabell, NSB (NSB 2016a).

Strekningsavsnitt	Trafikk hver retning (døgn)	Trafikk i Nords godstogvinduet		
		Sørover	Nordover	Totale togfølger
Støren-Dombås:	4 F, (1R),6G	1F,3G	1F,5G	2M _P ,6M _G ,1L _{E,G}
Dombås-Lillehammer:	2R,4F,7G	1F,3G	1F,1R,6G	2M _P ,6M _G ,2L _{E,G} , 1L _{B,G}
Lillehammer-Hamar:	20R, 4F,7G	1F,4R	1F,7R,6G	8M _P ,2M _G ,2L _{E,P} ,3L _{B,P} ,3L _{B,G}
Støren-Røros:	3R	-	-	-
Røros-Elverum:	6R,1T	-	1R	1R
Elverum-Hamar:	6R, 2T	-	1R	1R

R=Region, F=Fjern, G=Gods,T=Tømmer, M=Møtende, L=Likgående. Subtyper: B=Blandet, E= Ensartet, G=Gods, P =Person.

7.1.1 Beregning av togfølgetid for dimensjonerende strekning og utnyttelsesgrad.

Vi beregner nå togfølgetider og utnyttelsesgrad med dagens trafikk i godstogvinduet nordover på Dovrebanen.

Tabell 6: Dimensjonerende strekning Støren-Dombås

Støren-Dombås: Minste togfølgetider			
Godstog			
Blokkstrekning	M _G	L _{E,G}	
Hjerkinn-Drivstua	23	12	
Antall	6	1	
Total togfølgetid	150		
All trafikk			
Blokkstrekning	M _p	M _G	L _{E,G}
Drivstua-Oppdal	16	18	9
Vekttall	2	6	1
Total togfølgetid	135		

For Støren-Dombås er vil Hjerkin-Drivstua være dimensjonerende med dagens trafikk. Siden denne strekningen er plassert i utkanten av godstogvinduet vil vi bare trenge å holde makskapasitet en kortere periode og setter buffertiden til 0,5 som diskutert tidligere $0,5 \cdot 150 = 75$ min. Det er 4 strekningsavsnitt som er omtrent like lange og vi legger til 0,25 min for hvert godstog for hver av disse $4 \cdot 7 \cdot 0,25 \text{ min} = 7 \text{ min}$. Praktisk togfølgetid utgjør dermed 232 min. Dette gir en utnyttelsesgrad på 70%.

Tabell 7: Dimensjonerende strekning Dombås-Lillehammer

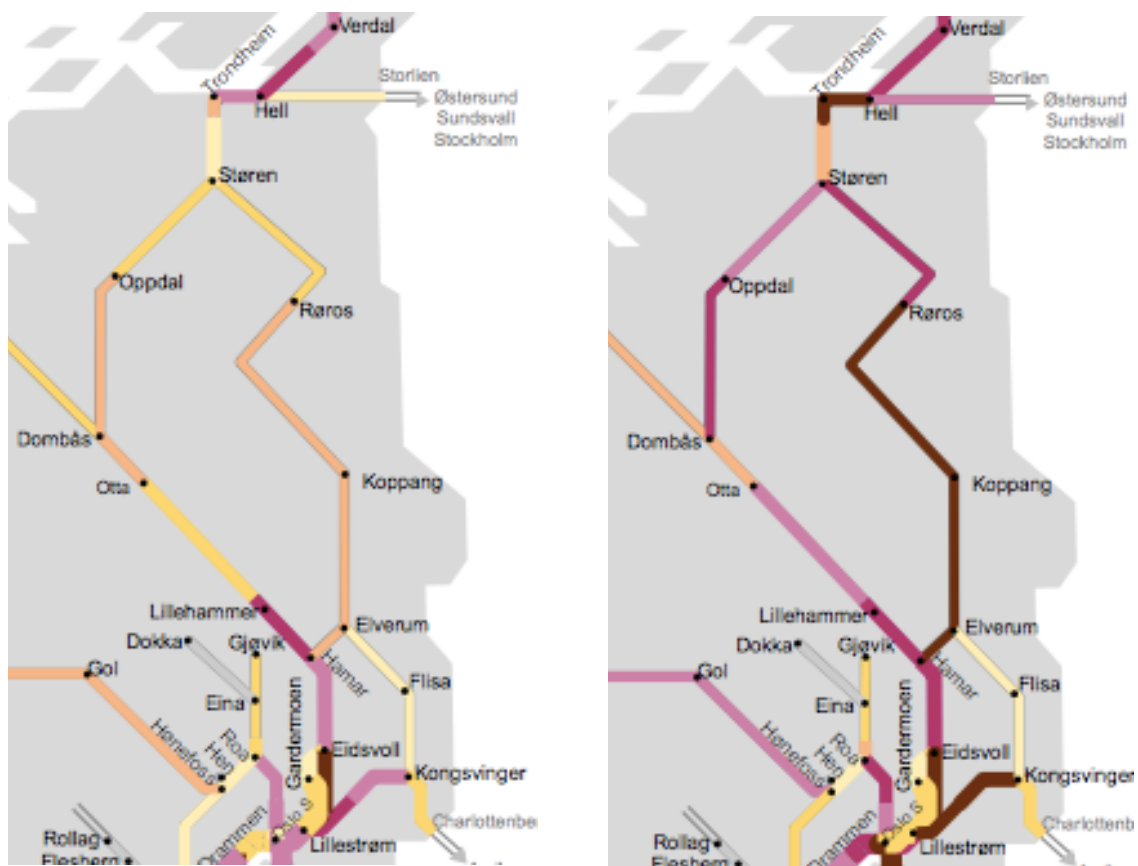
Dombås-Lillehammer: Minste togfølgetider				
All trafikk				
Blokkstrekning	M _P	M _G	L _{E, G}	L _{B,G}
Sel-Brennhaug	13	14	7	7
Antall	2	6	2	1
Total togfølgetid	131			

Alle kryssingsspor er lange nok så vi trenger ikke sjekke spesifikt for dette. Vi setter buffertiden til 0,67 da dette er midt i kryssingsbelte og vi får da ett tillegg på 88 min. Samtidig innkjør på Sel (Jernbaneverket 2016g) og siden dimensjonerende strekning peker seg ut som en del lenger enn de andre legger vi ikke til noe for antall strekningsavsnitt. Praktisk togfølgetid blir da 219 min som gir en utnyttelsesgrad på 66%.

Tabell 8: Dimensjonerende strekning Hamar-Lillehammer

Hamar-Lillehammer: Minste togfølgetider					
All trafikk					
Blokkstrekning	M _P	M _G	L _{E, P}	L _{B, P}	L _{B, G}
Bergseng-Lillehammer	9	10	4	4	7
Antall	8	2	2	3	3
Total togfølgetid	133				

Vi antar et buffertidstillegg på 0,67 da makstrafikken vil vare over nesten hele 5,5-timersintervallet dette gir et tillegg på $133 \cdot 0,67 = 89$ min. Det omtrent lik avstand mellom kryssingssporene, og de med lenger avstand er justert med blokkposter, for praktisk kapasitet legger vi da til 0,25 min per tog for hvert av de 7 strekningsavsnittene mellom Hamar og Lillehammer $7 \cdot 0,25 \cdot 18 = 31$ min. Praktisk total togfølgetid blir da 253 min, som gir en utnyttelsesgrad på 77%. Dette tallet tar ikke hensyn til at det er ønskelig med jevne avganger for persontrafikken mellom Hamar og Lillehammer. I NSB sin rutetabell (NSB 2016b) kan vi se at det kjøres med et nesten jevnt timesintervall, om vi tar hensyn til dette ligger nok utnyttelsesgraden trolig noe over de 77% vi kom fram til.



Figur 19: Figuren til venstre viser kapasitetsutnyttelse i døgnet og figuren til høyre viser kapasitetsutnyttelse i makstimen (Jernbaneverket, 2014a).

7.2 Målbilde framtidens trafikk.

For å anslå den framtidige trafikketterspørselen baserer vi oss på estimat fra Jernbaneverket. I Jernbaneverket sin perspektivanalyse "Jernbanen mot 2050", blir det anslått en generell vekst for godstransport på jernbane på nær 90%. I langsiktig Jernbanestrategi forventes det 2 tog/t i prime time, se tabell under. Det forventes altså å holde oppe en dobbelt så stor andel godstog i prime time som i resten av døgnet.

Tabell 9: Målbilde for godstrafikk i 2050 (Jernbaneverket 2016h)

	Kombi-transport og vognlast	Tømmer	Råvarer	Annen godstransport
Snitthastighet	80 km/t	75 km/t	Ingen minstekrav	75 km/t
Avganger «prime time»	2 tog/t pr. relasjon			
Avg. resten av døgnet	1 tog/t pr. relasjon	Faste ruter	Faste ruter	Faste ruter
Infrastruktur åpen for trafikk (% av tiden)	97,5 %	95 %	95 %	95 %
Punktlighet	90 %	90 %	90 %	90 %
Aksellast	≥ 22,5 tonn	≥ 22,5 tonn	≥ 30 tonn	≥ 22,5 tonn

Tabell 10: Passasjertrafikk i 2050 (Jernbaneverket 2016h).

	Bysentrum og forstad	Indre omland	Ytre omland
Ca. avstand fra sentrum	0-20 km	20-50 km	50-100 (200) km
Frekvens (minimum)	10 min. intervall	4 avg./t* 30 min. intervall**	30 min. intervall
Reisetid om bord i toget	Litt viktig. Bedre enn buss	Viktig. Bedre enn buss	Veldig viktig. Bedre enn bil
Reisekomfort	Ståplass maks. 15 min i rush	Ståplass maks. 15 min i rush	Sitteplass med mulighet til å arbeide
Punktlighet	95 %	95 %	95 %

* For stasjoner med høyt passasjergrunnlag

**For stasjoner med lavt/moderat passasjergrunnlag

Noe klart målbilde for antall fjerntog i 2050 er ikke gitt, og etterspørselen vil variere mye med tilbudet som blir gitt da det er stor mulighet for overføring fra andre transportmidler. Vi kan anta at behovet for personreiser vil øke med 40% som følge av befolkningsutvikling (Jernbaneverket 2015a). Det kan videre antas at vi vil se en overføring av reisende fra andre transportsektorer når strekningen får en kortere reisetid gjennom intercityutbyggingen. Vi vil altså se et økt antall avganger, som i seg selv gir et bedre tilbud og kan øke etterspørselen ytterligere. På bakgrunn av disse vurderingene vil vi anta en dobling av antall fjerntog i 2050.

Noe klart målbilde for antall fjerntog i 2050 er ikke gitt, og etterspørselen vil variere mye med tilbudet som blir gitt da det er stor mulighet for overføring fra andre transportmidler. Vi kan anta at behovet for personreiser vil øke med 40% som følge av befolkningsutvikling (Jernbaneverket 2015a). Det kan videre antas at vi vil se en overføring av reisende fra andre transportsektorer når strekningen får en kortere reisetid gjennom intercityutbyggingen. Vi vil altså se et økt antall avganger, som i seg selv gir et bedre tilbud og kan øke etterspørselen ytterligere. På bakgrunn av disse vurderingene vil vi anta en dobling av antall fjerntog i 2050.

Vi konkluderer med at vi ikke har i nærheten av nok kapasitet for fremtidens behov på noen av delstrekningene, med samme infrastruktur og kjøremønster som i dag.

7.3 Nødvendige tiltak ved godskjøring kun over Dovrebanen

7.3.1 Hamar-Lillehammer

Det strekket som sliter mest med å møte den voksende etterspørselen er strekningen mellom Hamar og Lillehammer, siden denne allerede ligger opp mot makskapasitet. Som tidligere nevnt er det planlagt dobbeltspor og en trase for hastighet opp mot 250 km/t. Fra tabellen over ser vi at det for strekningen Hamar-Lillehammer er beregnet en minimumsfrekvens på en gang i halvtimen. Denne strekningen er 58 km lang og for godstog vil den med en fart på 90km/t bruke 40 minutt inkludert akselerasjon og retardasjon i endene. Om vi forutsetter ERTMS må persontoget ligge et minimum på 3 minutter bak (bremsetid +teknisk tid+sikkerhetsmargin), godstoget kan derimot starte tett på persontoget da avstanden mellom dem vil øke etter hvert som togene akselerer opp i fart vi setter likevel denne tiden til 1 minutt. Persontoget vil bruke 16,5 minutter over strekningen. Total togfølgetid for et persontog og et godstog blir da 27,5 minutter.

Med et halvtimesintervall på persontrafikken på denne strekningen som listet i tabell 10 ser det ut som vi vil akkurat kunne klare å framføre et godstog mellom persontogene, og få en buffertid på 2,5 minutter, som er noe knapt. Om vi i tillegg antar at det nye dobbeltsporet får overbyggingsklasse D slik at godstogene kan holde 120 km/t blir reisetiden for godstoget bare 34 minutter og vi får god buffertid og kan til og med presse inn flere godstog mellom hvert persontog. For å øke dagens trafikk i godstogvinduet med 90% vil vi trenge kapasitet for litt over et godstog i halvtimen. Vi trenger dermed ikke å bygge forbikjøringsspor for å imøtekomme trafikkbehovet, samtidig vil et forbikjøringsspor gi en mye større fleksibilitet og slik sett være å anbefale.

I følge langsiktig jernbanestrategi (Jernbaneverket 2016h) vil man også kunne bruke deler, eller hele av den nåværende banen som en dedikert godstrafikkbane ved utbygging av dobbeltspor mellom Moelv og Lillehammer. Moelv ligger omtrent midt mellom Hamar og Lillehammer og vi kan da benytte denne til å kjøre godstrafikk på istedenfor å bygge forbikjøringsspor. Siden vi i godstogvinduet bare har trafikk i en retning vil banen ha mer enn nok kapasitet til å møte godsveksten. Vi konkluderer med at strekningen Hamar-Lillehammer maksimum trenger å bygge ut et forbikjøringsspor i tillegg til den nye IC-strekningen.

7.3.2 Fortsatt bruk av 480 meter lange tog

Godstransporten og persontrafikken vil på strekningen øke omtrent like mye og vi antar dermed at vi vil ha samme togmix som i dag, men med en frekvensøkning på 90% . Vi vil nå anslå hvilke tiltak vi må gjøre for å få til 100% kapasitetsutnyttelse.

For Lillehammer-Dombås har vi i dag en total togfølgetid på 219 min i godstogvinduet. Vi forutsetter at vi med økt trafikk må lage et kryssingsspor på det lengste strekket og legger til 28 min for omtrent like lange 10 strekningsavsnitt. En økning på 90% vil gi en total togfølgetid på $61 \cdot 1,9 + 7 \cdot 1,67 = 481$ min. Den totale togekjøretiden må dermed reduseres med 31%, og togfølgetiden for hver blokkstrekning for møtende godstrafikk kan da maksimum være 9,7 minutter. Vi har her antatt at forholdet mellom de ulike tallene er representativt og velger å se på togfølgetiden som forekommer med hyppigst frekvens. I dag holder et godstog som får kjøre uhindret en snittfart på 79 km/t over strekningen og vi kan nå beregne blokkstrekningen til 9.5 km ved å bruke følgende formel, hvor blokkstrekningen er tilnærmet som avstanden mellom to kryssingsspor.

$$t_{mot} = t_{xlås} + t_{tekn} + t_{sikt} + \frac{b}{v} + \frac{v - v_o}{2a} + \frac{v - v_o}{2r}$$

Vi har under listet opp blokkstrekningene som trenger tiltak, her kan vi se at det er mange kryssinger som er akkurat for lange. Ved små unøyaktigheter i beregningene kan vi da se store utslag, innføring av ERTMS kan også påvirke dette resultat.

Tabell 11: Blokkstrekninger som trenger tiltak.

Blokkstrekning	Avstand mellom kryssinger [km]
Fåberg-Øyer	11,53
Øyer-Tretten	11,14
Tretten-Losna	9,8
Fåvang-Ringebu	10,36
Ringebu-Hundorp	9,9
Vinstra-Kvam	9,97
Kvam-Sjoa	9,78
Sjoa-Otta	10,89
Otta-Sel	10,49
Sel-Brennhaug	14,1
Dovre-Dombås	12,22

For Dombås-Støren ser vi raskt at vi må forlenge de to kryssingene som er for korte på Kongsberg og Ulsberg. Avstanden mellom kryssingene vil nå bli omtrent like lange og vi legger til for 10 like lange strekninger. Vi antar en buffertid på 0,67 og får ved samme metode som over en total togfølgetid på 486 min og vi trenger da en reduksjon i kjøretid på 32% og beregner minste togfølgetid for motgående godstog til 12,2 minutt og blokkstrekning følgelig 12,8 km.

Tabell 12: Blokkstrekninger som trenger tiltak

Blokkstrekning	Avstand mellom kryssinger [km]
Dombås-Fokstua	18,61
Kongsvoll-Drivstua	13,89
Drivstua-Oppdal	22,16
Fagerhaug-Ulsberg	13,82
Soknedal-Støren	14,6

7.4 Tiltak

For å kunne framføre ønsket togmengde forutsetter vi at bygging av kryssingsspor vil være det billigste alternativet og totalt for strekningen Hamar-Støren trenger vi da 16 nye kryssingsspor og 2 forlengelser. I utredning for Godskapasitet på Dovrebanen (Jernbaneverket 2010b) blir nye kryssingsspor anslått til 117 MNOK, mens forlengelse av Ulsberg og Kongsvoll er anslått til 75 og 78 MNOK, alle tall er beregnet for 2009 . Jernbaneverket bruker en kalkulasjonsrente på 4% (Jernbaneverket 2015b) og vi beregner da totale kostnader for 2016 til 2,7 Mrd. NOK.

Vi har her tatt med mange kryssinger som det er akkurat for stor avstand mellom og slik sett kan tallet være noe høyt. På den andre siden har vi ikke tatt høyde for at noe av tiltakene ikke kan la seg gjøre på grunn av stigninger, eller andre forhold. Dette kan resultere i at vi må bygge ekstra kryssinger, eller dobbeltsporsparseller. Et eksempel på et problemområde er kryssingsspor på Gardsenden mellom Dombås og Fokstua som ligger i bratt terreng (Jernbaneverket 2010b).

7.4.1 Økt toglengde

Ved å øke toglengden kan man kjøre togene med større mellomrom for å oppnå samme trafikkapasitet. Problemet med å øke toglengden er at svært mange kryssingsspor er for korte og da trenger forlenging. Ved å øke toglengden fra 480 meter til 600 meter trenger vi kun å kjøre 79% av godstogene som ved 480 meter; her har vi antatt 20 meter lange lokomotiv.

Dombås-Støren: Dagens trafikk benytter 70% av kapasiteten. Vi forenkler problemet og beregner $(0,7 \cdot 0,79 \cdot 1,9 = 105\%)$ at vi må ha en blokk lengde som er noe kortere enn dagens ellers vil vi havne over 100%. Vi får en blokkstrekning på 24 km og trenger da å forlenge 4 kryssingsspor.

Lillehammer-Dombås: Sammenlignet med Dombås Støren vil vi ha 2 mer langsgående godstog, dette øker togfølgetiden med 8% og vi får en kapasitet på 114%. Dette gir en maksimal blokkstrekning på 22 km og vi trenger å forlenge 3 kryssingsspor.

Totalt trenger vi altså å forlenge 7 kryssingsspor ved drift av 600 meter lange tog.

Gjennomsnitt kostnad for forlengelse av kryssingsspor er 75 MNOK (Jernbaneverket 2010b) I 2015 kroner blir dette 0,7 MRD. NOK. Vi konkluderer med at å kjøre med 600 meter lange tog gir en vesentlig kostnadsbesparelse sammenlignet med å kjøre med dagens 480 meter lange tog.

7.4.2 Retningsdrift

Ved bruk av retningsdrift for godstrafikk ser vi at man kan vil kunne framføre togene som skal gå over Dovrebanen mellom Lillehammer og Støren. Dette ser vi ved å studere godstogvinduet for nordgående tog som vi har sett på tidligere i oppgaven, hvor vi ikke vil nå makskapasitet ved den forventede godsøkningen når vi tar vekk togene i sørgående retning, da ensartede likegående tog vil ha mye mindre togfølgetid enn togfølgetiden ved motgående trafikk. Ved innføring av ERTMS vil denne forskjellen bare øke. For strekningen Hamar-Lillehammer vil vi få kapasitetsmangel uansett hvordan vi kjører dersom vi ikke utretter tiltak. Vi forutsetter at planene for IC-strekningen blir gjennomført og ved dobbeltspor vil vi kunne dekke transportbehovet som diskutert i kapittel 7.3.1.

Når vi isolert ser på strekningen Hamar Støren vil det være teknisk mulig å fritt øke tog lengden da man ikke vil møte noen andre lange tog. Ulempen er da at persontogene blir nedprioritert ved alle kryssinger, som er motsatt av hva som er normal praksis. I godstogvinduet er det derimot veldig liten trafikk med 2 persontog nordover og 1 sørover. Vi antar at det er snakk om så få tog at disse kan bli nedprioritert, eventuelt kan de også følge retningsdriften selv om dette heller ikke er en ideell løsning for passasjerer som ikke skal reise hele veien Hamar-Støren. enten kan følge retningsdriften godstogvinduet bare et fjerntog på vei sørover og et fjerntog og ett regiontog om godstogene skal kjøre sørover over Dovrebanen.

Den samme situasjonen som beskrevet ovenfor vil gjelde for Rørosbanen, hvor det er teknisk mulig å framføre togene, men persontoget må bli nedprioritert. Persontrafikken på

Rørosbanen er også relativt liten med 6 daglige avganger mellom Hamar og Røros, og 3 avganger mellom Røros og Støren. Til tross for liten trafikk vil man med dagens ruteplaner likevel støte på 2 av disse togene uansett hvilken retning man kjører retningsdrift i. Da persontogene vil møte mange stopp og hvor den blir nedprioritert i alle, er ikke dette en ideell løsning for persontransporten.

Vi ser at retningsdrift har et veldig stort potensial for framføringen av gods og det vil kunne takle framtidens behov, men det vil komme i konflikt med noen avganger for persontrafikk. Dette er riktignok snakk om ganske få avganger og det kan være mulig å endre disse på grunn av nytten det har for gods.

Om vi skal benytte oss av retningsdrift for alle godstog synes det klart at vi må elektrifisere strekningen så vi forutsetter så. Investeringskostnad for Røros- og Solørbanen sett under ett gir pris per km på 14,5 millioner (Jernbaneverket 2015b) per km. Vi er interessert i kostnaden for å elektrifisere kun Rørosbanen og totalkostnaden blir 5,8 mrd, regnet om til 2016 kroner, hvor vi bruker kalkulasjonsrente på 4% (Jernbaneverket 2015b).

7.5 Sammenligning av tiltak

Vi ser at Retningsdrift har den klart største investeringskostnaden av de tre, men å sammenligne bare investeringskostnader vil ikke gi et rett bilde. Som eksempel vil Rørosbanen ha en nytte som redudansbane, kalkulert til dagens nivå vil en øvre grenseverdi for dette være 897 millioner. (Jernbaneverket 2015b). Andre besparelser som vil komme som følge av elektrifisering og retningsdrift er at togene slipper å stoppe opp for like mange kryssinger og vi vil slik oppleve en miljøgevinst ved å være mer energieffektive. Rørosbanen (650 moh.) har også et mye lavere høyeste punkt enn Dovrebanen (1030 moh.) og dette resulterer i enda en energibesparelse. Vi vil også få en miljøgevinst for de togene som allerede benytter banen persontog og tømmer tog. På grunn av alle besparelsene har Jernbaneverket (Jernbaneverket 2015 b) kommet fram til at en elektrifisering, eller en delelektrifisering vil være nyttig også uten å benytte seg av retningsdrift. Det bør altså gjøres en samfunnsøkonomisk analyse av nytteverdien for å kunne komme fram til de reelle kostnadene ved investering. Om vi sammenligner investeringen i økt antall kryssingsspor mot forlengelse av kryssingsspor antar vi at vi kan sammenligne kostnadene slik de er regnet ut over, og vi kan konkludere med at forlengelse av kryssingsspor er det beste tiltaket, gitt kostnadene det er basert på.

8 Konklusjon

Vår analyse av dagens trafikk på Dovrebanen viser at det foreløpig bare er press på kapasiteten på strekningen Hamar-Lillehammer. Dagens plan for utbygging av IC-strekning med dobbeltspor vil kunne løse kapasitetsproblemet og det anbefales å gjøre dette tidligere enn slutføringsåret 2030, og slik slippe å gjøre investeringer som bare har midlertidig nytte. Vi begrunner dette med at det trolig vil bli for stort press på denne strekningen om vi antar en jevn stigning i godsetterspørsel fram mot 2050. Her har vi riktignok forutsatt at kostnadene for IC-strekningen kan bæres av nytten for persontrafikken. Videre anbefaler vi å ikke bygge ut kryssingsspor, men forlenge eksisterende kryssingsspor for slik å kunne takle godstog på 600 meter, eller mer. Denne utbyggingen må skje slik at vi vil få lange kryssingsspor jevnt fordelt over strekningen Lillehammer-Støren. Disse investeringene vil ikke haste like mye og en kan vente med investeringene og slik få mer informasjon om utviklingen i etterspørsel. For at retningsdrift virkelig skal få en nytte, må det større vekst i togtransporten enn det som det er estimert med fram mot 2050. Vi anbefaler dermed å bygge ut IC-strekningen Hamar-Lillehammer snarest mulig, mens man venter med andre tiltak og anser hvordan veksten i trafikk vil være.

Kilder

- Cargonet. 2016. "Laste og lossetider 2016". Hentet 13.06.16.
<http://www.cargonet.no/globalassets/160512-laste-og-lossetider-2016.pdf>
- Goverde, Rob M.P. m.fl.: 2013. "Railway line capacity consumption of different railway signalling systems under scheduled and disturbed conditions". Dep. of Transport & Planning, Delft University of Technology, The Netherlands. Hentet 15.05.16.
<http://bit.ly/1Ys2Qwl>
- Hansen, Hermann. 2015. "Vil ha godsterminal på Torgård". Trondheim: Adresseavisa. Hentet 15.01.16. <http://www.adressa.no/nyheter/trondheim/article10541601.ece>
- Jernbaneverket. 1998 25 Tonn Aksellast på Rørosbanen. JBV Region Nord
- Jernbaneverket. 2010a. "Teknisk regelverk: Signal, prosjektering, lyssignal". Hentet 09.05.16.
<https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Lyssignal#Hovedsignal>
- Jernbaneverket. 2010b. «Utredning. Godskapasitet Dovrebanen». Jernbaneverket, Utbygging.
- Jernbaneverket. 2011. "Ordforklaringer". Jernbaneverket. Hentet 06.05.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Jernbanedrift---eit-komplisert-samspel/Ordforklaringer/>
- Jernbaneverket. 2013a. "Hovedbanen". Jernbaneverket. Hentet 16.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Banene/Hovedbanen/>
- Jernbaneverket. 2013b. "Rørosbanen". Jernbaneverket. Hentet 16.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Banene/Rorosbanen/>
- Jernbaneverket. 2013c. "ATC Automatisk togkontroll". Jernbaneverket. Hentet 13.05.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Jernbanedrift---eit-komplisert-samspel/ATC-Automatisk-togkontroll/>
- Jernbaneverket. 2014a. "Jernbanestatistikk 2014". Oslo: Jernbaneverket. Hentet 10.12.15.
http://www.jernbaneverket.no/contentassets/8846eedda25f46afac36410aaa7053bf/jernbaneverket_statistikk_2014_web_enkelt sider.pdf
- Jernbaneverket. 2014b. "Prosjektplan for utredning av lokaliseringsvalg for nytt logistikknutpunkt i Trondheimsregionen". Jernbaneverket, Strategi og samfunn. Hentet 15.01.16.
<http://www.jernbaneverket.no/contentassets/7f8c0745d6204e21bba84799cdd07149/prosjektplan-til-sd-for-utredning-nytt-logistikknutpunkt-trondheimsregionen.pdf>
- Jernbaneverket. 2014c. Linjehastighet. Hentet 20.02.16
<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/365602/3.3.2.4%20Linjehastighet%20-%20Line%20speed.pdf>
- Jernbaneverket. 2015a. "Jernbanen mot 2050: Perspektiver for transport i byområder og mer gods på skinner." Oslo: Jernbaneverket. Hentet 05.03.15.

<http://www.jernbaneverket.no/contentassets/3b8f6db0edf44b35b659d05fbe1a10ff/perspektivanalyse--jernbanen-mot-2050.pdf>

Jernbaneverket. 2015b. ”Strategi for driftsform på ikke-elektrifiserte baner”. Oslo: Jernbaneverket. Hentet 05.04.15.
http://www.jernbaneverket.no/contentassets/24510efa7bb04f799e9b57961b3e4b9d/jernbaneverkets-utredning-strategi-for-driftsform-pa-ikke-elektrifiserte-baner_11-desember-2015.pdf

Jernbaneverket 2015c. ”InterCity: Utbygging av Dovrebanen”. Jernbaneverket. Hentet 17.01.16.
http://www.jernbaneverket.no/contentassets/c56a4a1232c14fc881a29ed03ef5f152/intercity-dovrebanen-20082015_spreads.pdf

Jernbaneverket. 2015d. ”Anbefaler elektrifisering av Røros- og Solørbanen”. Hentet 17.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Prosjekter/Utredninger/Jernbaneverkets-Utredninger/anbefaler-elektrifisering-av-roros--og-solorbanen/>

Jernbaneverket. 2015e. ”Konseptdokument for IC-strekningene”. Jernbaneverket. Hentet 18.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/contentassets/44255421d31241ecb3fe860115bb0e31/konseptdokument-for-ic-strekningene.pdf>

Jernbaneverket. 2015f. ”På høygir for mer gods”. Jernbaneverket. Hentet 19.05.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Nyheter/Jernbanemagasinet/Nyheter/mars-2015/Tettere-samarbeid-om-gods/>

Jernbaneverket. 2015g. Grafiske togruter f.o.m 13. Desember 2013. Hentet 04.02.16
<http://www.jernbaneverket.no/Marked/Informasjon-for-togselskapa/grafiske-togruter-f.o.m-13.desember-2015/>

Jernbaneverket. 2015h. Network statement 2017. Aksellast. Hentet 23.4.16
<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/390076/3.3.2.2.1%20Aksellast%20-%20Axle%20load.pdf>

Jernbaneverket. 2015i. Multipurposeprofil. Hentet 24.04.16
<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/227070/3.3.2.1.3%20Multipurpose%20profil%20%20Multipurpose%20wagon%20gauge.pdf?sequence=136&isAllowed=y>

Jernbaneverket. 2016a. ”Dovrebanen”. Jernbaneverket. Hentet 16.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Banene/Dovrebanen/>

Jernbaneverket 2016b. ”Gardermobanen”. Jernbaneverket. Hentet 16.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Banene/Gardermobanen/>

Jernbaneverket 2016c. ”Solørbanen”. Jernbaneverket. Hentet 16.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Banene/Solorbanen/>

- Jernbaneverket. 2016d. "Kongsvingerbanen". Jernbaneverket. Hentet 17.02.16.
<http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen/Banene/Kongsvingerbanen-status-planer-og-muligheter/>
- Jernbaneverket. 2016e. «Overbygning/ Prosjektering/ Generelle tekniske krav». Hentet 10.05.16. https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Prosjektering/Generelle_tekniske_krav
- Jernbaneverket. 2016f. «Infrastruktur ». Jernbaneverket. Hentet 23.05.16.
<http://orv.jbv.no/ns/doku.php?id=ns2017no:infrastruktur>
- Jernbaneverket. 2016g. «Strekningsbeskrivelse: Oversikt over stasjoner som har mulighet for innkjøring av mer enn ett tog på hele eller deler av stasjonens sporarrangement» Hentet 15.06.16. <http://orv.jbv.no/sjn/doku.php?id=strekningsbeskrivelse:stasjoner>
- Jernbaneverket. 2016h. «Nasjonal transportplan 2018-2019: Langsiktig jernbanestrategi» Hentet 10.06.16.
<http://www.jernbaneverket.no/contentassets/74df275f970e40f9a509d98fb91be786/vedlegg-5---jernbanestrategi.pdf>
- Jernbaneverket. 2016i. 2.2.3 Motrettede bevegelser . Hentet 23.3.16
<https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Lyssignal#Hovedsignal>
- NOU 2001:09. 2001. "Lillestrøm-ulykken 5. april 2000". Hentet 06.06.16.
<https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2001-09/id377038/?ch=17>
- NSB.1992. Samtidig innkjør ved bygging og ombygging av kryssingsspor. Hentet 04.05.16
<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/124576/09tu09866.pdf>
- NSB. 2016a. «Rutetabeller i PDF», NSB rutetabell. Hentet 14.05.16.
<https://www.nsb.no/rutetider/rutetabell>
- NSB. 2016b. «Rutetabell». NSB. Hentet 15.06.16.
https://www.nsb.no/rutetider/rutetabell/_attachment/12408?_ts=154e2524c88
- Olsson, Nils og Tor Nicolaysen. 2016. Privat møte med Jernbaneverket og SINTEF 17.03.16, Marienborg Trondheim.
- Skartsæterhagen, Svein. 1993. *Kapasitet på jernbanestrekninger*. Norge: Institutt for energiteknikk, utarbeidet for NSB Banedivisjonen. Hentet 17.11.15.
https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/124538/09TU06497_ocr_red.pdf
- Skartsæterhagen, Svein. 2015. "Kapasitet: Enkle overslagsberegninger" Oslo: forelesning for erfaringsbasert mastergrad jernbane: Punktlighet og kapasitet.
- Tovås, Ove. 2015. «Hvor skal godstrafikken gå i framtiden», masteroppgave ved NTNU. Hentet 11.06.16
https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2367243/12466_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y.