

Analyser av følgeforsinkelser i jernbanenettverk

Vegard Berglund Åsland

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Elias Kassa, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

Oppgavens tittel: Analyser av følgeforsinkelser i jernbanenettverk	Dato: 10.06.15 Antall sider (inkl. vedlegg): 147		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Vegard Berglund Åsland			
Faglærer/veileder: Elias Kassa (NTNU)			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Nils Olsson (NTNU), Andreas Dypvik Landmark (SINTEF), Roar Karlsen (NSB)			

Det er identifisert fem eksisterende metoder for å analysere følgeforsinkelser i jernbanenettverk. Metodene kan belyse ulike problemstillinger knyttet til feil/mangler ved norsk jernbane. Jernbaneverket, NSB og andre aktører som er ansvarlig for utbygging, drift og vedlikehold har et ansvar for å ta i bruk disse metodene. Dersom vi løser den identifiserte problematikken kan den norske jernbanen driftes bedre som følge av forbedrede ruteplaner og infrastruktur. Dette gir økt kapasitet, bedre punktlighet, oppetid og regularitet. Jernbanen vil dermed fremstå som et mer pålitelig, robust og stabilt transportmiddel for passasjerer og gods. Med et større fagmiljø vil også de identifiserte analysemetodene i større grad bli evaluert, videreutviklet og tilpasset for norsk jernbane.

Vi burde bruke en felles definisjon av følgeforsinkelser i Norge. Denne definisjonen bør brukes for å sikre at dynamikken i forsinkelser blir tatt hensyn til, for å sikre en bedre kvantifisering av følgeforsinkelser og for å sikre sammenliknbare resultater. På bakgrunn av dette anbefaler jeg følgende definisjon:

En følgeforsinkelse er en forsinkelse som oppstår på grunn av avhengigheter mellom tog i jernbanenettverk. Ruteplanlegging og/eller infrastrukturen som togene trafikkerer er årsaken til disse avhengighetene. Forsinkelsesårsaken(e) har ingen tilknytning til det toget som forsinkes, utover disse avhengighetene.

I Norge satses det stort på jernbanen, og det er ventet stor fremtidig transportvekst. Dette gir økt etterspørsel etter forskning på forsinkelser. Fagmiljøet i Norge er derimot lite. Instituttet for bygg, anlegg og transport (BAT) bør vurdere å opprette kontakt med TU Delft som har gjort mye forskning på følgeforsinkelser. SINTEFs prototypeverktøy for slike analyser bør videreutvikles for å forbedre fremtidige norske analyser.

Stikkord:

1. Følgeforsinkelser
2. Analyser
3. Kapasitet
4. Jernbane

Vegard Åsland

FORORD

Denne masteroppgaven utgjør den avsluttende delen av utdannelsen som sivilingeniør ved Bygg- og miljøteknikk ved NTNU, der jeg har valgt Jernbane som hovedprofil. Oppgaven har sitt utspring i min interesse for de trafikale aspektene ved jernbanesystemer. Jeg har også hatt et ønske om å bidra til en bedre forståelse av forsinkelser i det norske jernbanenettverket. Oppgaven er gjennomført våren 2015.

Jeg ønsker å takke mine veiledere for hjelp med oppgaven. Først vil jeg takke Roar Karlsen i NSB for å ha introdusert meg for muligheten til å gjennomføre en masteroppgave innen dette temaet. Takk til Prof. Elias Kassa for generell veiledning. Takk til Prof. Nils Olsson for jevnlig oppfølging av oppgaven som ekstern veileder. Jeg vil også takke Andreas Dypvik Landmark ved SINTEF, for den hjelp han har gitt med analyser av følgeforsinkelser.

Til slutt vil jeg takke min familie og mine venner for støtten de har gitt meg gjennom mine 5 år på NTNU.

Trondheim, 10.juni 2015



Vegard Berglund Åsland

SAMMENDRAG

Tog som trafikkerer jernbanenettverket samhandler gjennom ruteplanen og/eller infrastrukturen i seg selv. Hvis et tog blir forsinket, kan forsinkelsen spre seg til andre tog på grunn av dette. Slike følgeforsinkelser kan føre til store samfunnsøkonomiske kostnader. Denne masteroppgaven belyser følgende problemstillinger knyttet til følgeforsinkelser:

1. Hvordan kan vi benytte eksisterende analysemetoder for å øke forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket?
2. Hvordan kan vi forbedre disse analysemetodene/-verktøyene?
3. Hva slags nytte kan oppnås ved å analysere følgeforsinkelser i Norge?

I første del av oppgaven belyses problemstillingene ut fra et teoretisk grunnlag for analyser av følgeforsinkelser. Her blir det redegjort for begrepene kapasitet, ytelsesparametere og forsinkelser. Dette bidrar til en økt forståelse av jernbanenettverket. I del to belyses problemstillingene ut fra en kategorisering og vurdering av gjennomførte empiriske analyser av følgeforsinkelser. Her blir det redegjort for 5 ulike analysemetoder og deres styrker og svakheter. Tredje og siste del er en case-studie av følgeforsinkelser på Kongsvingerbanen i perioden 01.03.13-31.05.13. Ved hjelp av empiriske data, og et prototypeverktøy utviklet av SINTEF, er følgeforsinkelsene identifisert ut fra forsinkede kryssinger på stasjon. Dette illustrerer mulighetene og nytten, men også manglene og forbedringspotensialet til slike analyser. Tabellen på neste side oppsummerer konklusjonene i oppgaven. Den første kolonnen viser de fem analysemetodene. Den andre kolonnen nevner hvordan vi kan benytte metoden(1), hvordan vi kan forbedre den (2) hvilken nytte vi kan oppnå, og hvem som har ansvar for/nytte av å gjennomføre slike analyser (3). Ansvaret/nyttene ligger hos enten Jernbaneverket (JBV), Norges Statsbaner (NSB) eller andre jernbaneaktører (Andre).

I det teoretiske grunnlaget, og tidligere gjennomførte analyser, er det ingen entydig definisjon av begrepet følgeforsinkelser. Det er derfor et behov for en ny definisjon

som kan brukes som et fundament for fremtidige analyser av følgeforsinkelser i Norge. Jeg anbefaler følgende definisjon:

En følgeforsinkelse er en forsinkelse som oppstår på grunn av avhengigheter mellom tog i jernbanenettverk. Ruteplanlegging og/eller infrastrukturen som togene trafikkerer er årsaken til disse avhengighetene. Forsinkelsesårsaken(e) har ingen tilknytning til det toget som forsinkes, utover disse avhengighetene.

I Norge satses det på jernbanen og det er ventet stor fremtidig transportvekst. Dette tilsier et behov for mer kunnskap om forsinkelser. Fagmiljøet i Norge er derimot lite. Vi bør derfor søke samarbeid med gode internasjonale fagmiljøer. Jeg anbefaler at Instituttet for bygg, anlegg og transport, i samarbeid med SINTEF, vurderer å opprette kontakt med forskningsmiljøet ved TU Delft i Nederland. Her er det gjennomført mye forskning på følgeforsinkelser. Videreutvikling av SINTEFs prototypeverktøy for analyser av følgeforsinkelser bør også prioriteres. Disse verktøyene er med på å forbedre analyser av følgeforsinkelser. Alle jernbaneaktører burde se mulighetene for reduserte samfunnsøkonomiske kostnader ved å analysere følgeforsinkelser.

1. Regresjonsanalyse m/flere variable	<ul style="list-style-type: none"> 1) Benyttes for beregning av beskrivende ytelsesparametere 2) Forbedres ved ta mer hensyn til faktorer som påvirker forsinkelser 3) Gir nytte vha. en bedre forståelse av nettverkets ytelse (JBV/NSB/Andre)
2. Sanns.fordeling for forsinkelser	<ul style="list-style-type: none"> 1) Benyttes for identifisering av sårbare punkter 2) Forbedres vha. evalueringer av statistiske fordelinger som er brukt tidligere 3) Gir nytte for tilgjengelig kapasitet, robusthet, stabilitet og pålitelighet (JBV)
3. Sanns.modeller for spredning av forsinkelser	<ul style="list-style-type: none"> 1) Benyttes for estimering av forsinkelser og svakheter i ruteplan/infrastruktur 2) Forbedres ved å ta hensyn til togledelse, akselerasjon/retardasjon og variasjoner 3) Gir nytte for bedre punktlighet, regularitet og oppetid (JBV/NSB/Andre)
4. Identifisering av mønstre vha. algoritmer	<ul style="list-style-type: none"> 1) Benyttes for identifisering av rutekonflikter og sårbarhet i ruteplan 2) Forbedres ved å ta hensyn til videre bruk og tilpasning, og bedre datainnsamling 3) Gir nytte for bedre ruteplanlegging og økt punktlighet (JBV/NSB)
5. Identifisering av sammenhenger vha. grafer	<ul style="list-style-type: none"> 1) Benyttes for å skille mellom primær- og sekundærforsinkelser 2) Forbedres ved å bruke metoden i kombinasjon med andre metoder/verktøy 3) Gir nytte for bedre årsaksregistrering, ansvar og forståelse (JBV/NSB/Andre)

SUMMARY

Trains interact in the railway network through timetables and/or the infrastructure itself. When a train is delayed, this delay may spread to other trains through these interactions. These knock-on delays might lead to big socio-economic costs. This master thesis has focused on the following problem statements related to analyses of knock-on delays:

1. How can we use existing analysis methods to improve our understanding of knock-on delays in the Norwegian railway network?
2. How can we improve these methods/tools?
3. What benefits can we achieve by analysing knock-on delays in Norway?

The first part of the thesis consists of the theoretical foundation for analysing knock-on delays. Here the terms capacity, performance indicators and delays are described. This contributes to the understanding of the Norwegian railway network. The second part is a literature review of previously conducted empirical analyses. These are categorized into five different analysis methods. Their usage and potential for improvement are explained. The third and final part is a case study of knock-on delays on the Kongsvinger section in the period of 01.03.13-31.05.13. By using empirical data and a prototype tool developed by SINTEF, the knock-on delays are identified from delayed crossings on each station. This illustrates the possibilities but also faults and ways to improve such analysis methods. The table on the next page summarizes the conclusions of my thesis. The first column shows the five analysis methods. The second column tells how we can use the existing analysis methods (1), possible ways to improve these methods/tools (2), the possible benefits, and who has the responsibility/benefit of conducting analyses of knock-on delays (3). The responsibility/benefit might be for the Norwegian Rail Administration (JBV), Norwegian State Railways (NSB) or other railway stakeholders (Others)

In the theoretical foundation, and previously conducted analyses, there is no single, unambiguous definition of the term knock-on delays. I therefore recommend a new

definition to be used as a foundation for future analyses of knock-on delays in Norway:

A knock-on delay is a delay that occurs due to dependencies between trains in a railway network. Timetabling and/or the infrastructure itself are the cause of these dependencies. The delay cause(s) have no connection with the train that is delayed beyond these dependencies.

There is a big on-going investment in Norwegian railways. The future transport demand is also high. This suggests a need for more research on delays. However, the academic environment in Norway is small. We should therefore seek cooperation with good international academic environments. I recommend that the Institute of Civil and Transport Engineering, in cooperation with SINTEF, consider establishing contact with the research environment at TU Delft in the Netherlands. SINTEF's prototype tools for analysing knock-on delays should also be developed further, to ensure better analysis results in the future. All railway stakeholders should note the possibilities of reduced socio-economic costs by analysing knock-on delays.

1. Multiple regression analysis	<ul style="list-style-type: none"> 1) Use for calculation of descriptive performance indicators 2) Improve by considering more factors influencing delays 3) Beneficial for a better understanding of the railway network (JBV/NSB/Others)
2. Prob.dist for delays	<ul style="list-style-type: none"> 1) Use for identification of vulnerable nodes/areas 2) Improve by evaluating previously used statistical conclusions/distributions 3) Beneficial for available capacity, robustness, stability and reliability (JBV)
3. Prob.models for delay propagation	<ul style="list-style-type: none"> 1) Use for estimation of delays and weakness in timetable/infrastructure 2) Improve by considering train dispatching, acceleration/retardation and dynamics 3) Beneficial for punctuality, regularity and uptime (JBV/NSB/Others)
4. Identifying patterns with algorithms	<ul style="list-style-type: none"> 1) Use for identification of route conflicts and vulnerability in the time table 2) Improve by considering future usage and adaption, and secure good input data 3) Beneficial for better timetabling and increased punctuality (JBV/NSB)
5. Identifying dependencies through graphs	<ul style="list-style-type: none"> 1) Use for separation between primary and secondary delays 2) Improve by using method/tool in combination with other methods/tools 3) Beneficial for registration of delay causes/responsibilities (JBV/NSB/Others)

INNHALDSFORTEGNELSE

INNLEDNING	1
OPPGAVENS STRUKTUR	3
DEL 1: TEORETISK GRUNNLAG FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	3
DEL 2: TIDLIGERE EMPIRISKE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	4
DEL 3: CASE – STUDIE: FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN	5
DEL 1 TEORETISK GRUNNLAG FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	7
KAPASITET	9
<i>TEORETISK OG PRAKTISK KAPASITET</i>	12
<i>KAPASITET PÅ DOBBELT- OG ENKELTSPOR</i>	14
YTELSESPARAMETERE	19
<i>PÅLITELIGHET, ROBUSTHET OG STABILITET</i>	19
<i>PUNKTLIGHET</i>	21
<i>REGULARITET</i>	23
<i>OPPETID</i>	24
FORSINKELSER	25
<i>PRIMÆRFORSINKELSER</i>	27
<i>SEKUNDÆRFORSINKELSER</i>	28
<i>SAMSPILL MELLOM FORSINKELSER</i>	30
<i>SPREDNING AV FORSINKELSER</i>	33
<i>IDENTIFISERING AV FORSINKELSEÅRSAKER</i>	36
DEL 2 TIDLIGERE EMPIRISKE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	41
KATEGORISERING AV TEMATIKK OG METODIKK FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	43
ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER GJENNOMFØRT I UTLANDET	47
ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER GJENNOMFØRT I NORGE	53
FORDELER/ULEMPER MED ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	57
DEL 3 CASE-STUDIE: FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN	61
NORSKE VERKTØY FOR EMPIRISKE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	63
<i>KRYSSINGSINTERAKSJON</i>	65
<i>TOGGRAF</i>	66
<i>RUTEFINNER</i>	67

<i>KRYSSFORSINK</i>	68
ANALYSE AV FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13)	71
<i>DEFINISJON OG IDENTIFISERING AV FØLGEFORSINKELSER PÅ ENKELTSPOR</i>	73
<i>VALG AV STREKNING OG PERIODE</i>	76
<i>INNSAMLING AV DATA</i>	77
<i>GJENNOMFØRING AV ANALYSE</i>	79
<i>RESULTATER</i>	81
DISKUSJON	91
TEMATIKK OG METODIKK FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER	91
CASE-STUDIE: FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN	93
<i>VURDERING AV TILGJENGELIGE DATA</i>	93
<i>VURDERING AV ANALYSEMETODE OG -VERKTØY</i>	94
<i>VURDERING AV RESULTATER</i>	95
<i>MULIGE SVAKHETER MED ANALYSEN</i>	98
KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER	101
KONKLUSJONER	103
ANBEFALINGER	109
VIDERE FORSKNING PÅ FØLGEFORSINKELSER	111
REFERANSELISTE	113
VEDLEGG	119
VEDLEGG A: OPPGAVETEKST	121
VEDLEGG B: EKSEMPEL – NOTERING AV FØLGEFORSINKELSER I EXCEL	125
VEDLEGG C: SAKTEKJØRING PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13)	127
VEDLEGG D: EKSEMPEL – SPREDNINGSTRÆR	129
VEDLEGG E: FORSLAG TIL VIDEREUTVIKLING AV KRYSSFORSINK	131
<i>VIDEREUTVIKLING OG TILPASSING</i>	131
<i>KVALITETSSIKRING OG BRUKERGRENSESNI TT</i>	132

FIGURLISTE

FIGUR 1: FORSKNINGSPROSESS – ANALYSE AV FØLGEFORSINKELSER	5
FIGUR 2: ULIKE FAKTORER OG DERES PÅVIRKNING PÅ KAPASITET (LANDEX ET AL., 2006).....	10
FIGUR 3: SPORFELT, LINJEBLOKK OG BLOKKPOST (JERNBANEVERKET, 2013).....	15
FIGUR 4: ENKEL TOGGRAF MED RASKT OG LANGSOMT TOG (SKARTSÆTERHAGEN, 1993)	16
FIGUR 5: ENKELTSPOR – HOVEDSIGNAL FOR INN- OG UTKJØRING (SKARTSÆTERHAGEN, 1993)	17
FIGUR 6: SAMMENHENG MELLOM KAPASITET OG PÅLITELIGHET (ABRIL ET AL., 2008).....	20
FIGUR 7: PUNKTLIGHET VS. KAPASITETSUTNYTTELSE (LANDEX ET AL., 2006).....	22
FIGUR 8: TOGGRAF – PRINSIPP.....	31
FIGUR 9: KRYSSINGSPUNKTER OG MULIGE RUTEKONFLIKTER (PACHL, 2002).....	31
FIGUR 10: TEMATIKK – GJENNOMFØRTE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER (ÅSLAND, 2014)	44
FIGUR 11: IDENTIFISERING AV FORSINKELSER (RICHTER, 2013)	47
FIGUR 12: SANNSYNLIGHETSFORDELING FOR ANKOMSTFORSINKELSER (KRÜGER ET AL., 2013).....	49
FIGUR 13: IDENTIFISERING AV FORSINKELSER PÅ STASJON (LABERMEIER, 2013)	51
FIGUR 14: IDENTIFISERING AV FORSINKELSER PÅ STREKNING (LABERMEIER, 2013).....	52
FIGUR 15: SEKUNDÆRFORSINKELSER SOM FUNKSJON AV PRIMÆRFORSINKELSER (NSB, 2013B)	53
FIGUR 16: SPREDNINGSTRE (SØRENSEN, 2013).....	54
FIGUR 17: TILNÆRMING TIL UTVIKLING AV VERKTØY.....	63
FIGUR 18: KRYSSINGINTERAKSJON - KLØFTA STASJON (LANDMARK, 2014)	65
FIGUR 19: PRECIS-TOGGRAF	66
FIGUR 20: RUTEFINNER	67
FIGUR 21: KRYSSFORSINK.....	68
FIGUR 22: KRYSSFORSINK - INPUT	69
FIGUR 23: ETTERPRØVING, TESTING OG KVALITETSSIKRING AV KRYSSFORSINK	71
FIGUR 24: FORSINKELSES BETINGELSE 2A (SØRENSEN ET AL., 2013)	74
FIGUR 25: FORSINKELSES BETINGELSE 2B (SØRENSEN ET AL., 2013).....	74
FIGUR 26: MÅLEPUNKTER INN OG UT AV STASJON (LANDMARK, 2014).....	77
FIGUR 27: EKSEMPEL – NOTERING AV FØLGEFORSINKELSER I EXCEL	125
FIGUR 28: SAKTEKJØRINGER PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13).....	127
FIGUR 29: EKSEMPEL - SPREDNINGSTRE FOR FORSINKELSESTYPE 1	129
FIGUR 30: EKSEMPEL - SPREDNINGSTRE FOR FORSINKELSESTYPE 2	130
FIGUR 31: EKSEMPEL - DÅRLIG LESBARHET I KRYSSFORSINK	132
FIGUR 32: EKSEMPEL - FEILMELDING I KRYSSFORSINK	133

TABELLISTE

<i>TABELL 1: ÅRSAKER TIL FORSINKELSESSPREDNING (GOVERDE, 2005)</i>	35
<i>TABELL 2: JERNBANEVERKETS ÅRSKSKODER (JERNBANEVERKET, 2014A)</i>	38
<i>TABELL 3: FORDELER/ULEMPER MED REGRESJONSANALYSE M/FLERE VARIABLER</i>	57
<i>TABELL 4: FORDELER/ULEMPER MED SANNS.FORDELING FOR FORSINKELSER</i>	58
<i>TABELL 5: FORDELER/ULEMPER MED SANNS.MODELLER FOR SPREDNING AV FORSINKELSER</i>	58
<i>TABELL 6: FORDELER/ULEMPER MED IDENTIFISERING AV MØNSTRE VHA. ALGORITMER</i>	59
<i>TABELL 7: FORDELER/ULEMPER MED IDENTIFISERING AV SAMMENHENGER VHA. GRAFER</i>	60
<i>TABELL 8: SAKTEKJØRING PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13)</i>	81
<i>TABELL 9: FORSINKELSESKJEDER PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13)</i>	81
<i>TABELL 10: ANTALL FORSINKELSESKJEDER - STASJON BERØRT AV SAKTEKJØRING</i>	82
<i>TABELL 11: STØRSTE FORSINKELSESSPREDNING - STASJON BERØRT AV SAKTEKJØRING</i>	82
<i>TABELL 12: ANTALL FORSINKELSESKJEDER - STASJON IKKE BERØRT AV SAKTEKJØRING</i>	83
<i>TABELL 13: STØRSTE FORSINKELSESSPREDNING - STASJON IKKE BERØRT AV SAKTEKJØRING</i>	84
<i>TABELL 14: FORSINKEDE KRYSSINGER PER TOGNR. FOR DE STØRSTE FORSINKELSESKJEDENE</i>	85
<i>TABELL 15: ANDEL FORSINKELSER FORDELT PÅ ÅRSKSKODER</i>	88
<i>TABELL 16: KONKLUSJON - HVORDAN BENYTTE EKSISTERENDE ANALYSEMETODER?</i>	104
<i>TABELL 17: KONKLUSJON - HVORDAN KAN VI FORBEDRE ANALYSEMETODENE/VERKTØYENE?</i>	106
<i>TABELL 18: KONKLUSJON - HVA SLAGS NYTTE KAN OPPNÅS VHA. METODENE/VERKTØYENE?</i>	108

INNLEDNING

Forsinkelser i togtrafikken er en problematikk de fleste kjenner til. Enten du er togpassasjer, ansvarlig for at togene kommer sikkert og raskt fram i henhold til ruteplan, eller har overordnet ansvar for jernbanesystemets drift og vedlikehold. De samfunnsøkonomiske kostnadene ved at jernbanen forsinkes sier noe om hvor stor problematikk dette faktisk er. Et grovt regnestykke sier at omtrent 40 000 passasjerer rammes av forsinkelser eller innstilte tog i Norge hver dag (NTB, 2015). At disse passasjerene blir forsinket påvirker samfunnet gjennom tapte årsverk. Det skader også tiltroen til jernbanen som et pålitelig transportmiddel, og rammer derav Jernbaneverket, NSB og godsselskapene. Målene som blir satt i Nasjonal Transportplan (NTP) kan i tillegg bli påvirket av dette, fordi den fremtidige transportveksten i de største byområdene skal tas av kollektivtransport, sykkel og gange. Problematikken rundt forsinkelser i togtrafikken berører altså de fleste av oss, fra togpassasjer til regjering og samfunn generelt.

Denne masteroppgaven er en videreføring av arbeidet som ble gjennomført i prosjektoppgaven ”Analyser av følgeforsinkelser – en litteraturstudie”, ved NTNU høsten 2014. Her ble det funnet et behov for å forske mer på følgeforsinkelser. Hovedgrunnen til dette er at analyser av følgeforsinkelser kan forbedre forståelsen av jernbanenettverket. Det er blant annet mulig å finne sammenhenger mellom primær- og sekundærforsinkelser, finne sårbare punkter i nettverket og identifisere rutekonflikter mellom tog. For at jernbanen skal driftes best mulig er det viktig å øke forståelsen av hvordan forsinkelser oppfører seg i nettverket. Da kan det være mulig å forbedre ytelsen i henhold til ytelsesparametere som punktlighet, oppetid og regularitet. Dette er igjen viktig for å opprettholde eller utvide den nåværende kapasitetsutnyttelsen på det norske jernbanenettverket. Ved økt kapasitetsutnyttelse vil mengden følgeforsinkelser kunne øke. Avhengig av om vi ser på enkelt- eller

dobbeltspor vil forsinkelsene også ha ulik karakteristikk. I tillegg er det premisser for sikker jernbanedrift som gjør at dette ikke er trivielt å studere i empiriske data.

Ved å gjennomføre denne masteroppgaven skal følgende forskningsspørsmål belyses:

1. Hvordan kan vi benytte eksisterende analysemetoder for å øke forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket?
2. Hvordan kan vi forbedre disse analysemetodene/verktøyene?
3. Hva slags nytte kan oppnås ved å analysere følgeforsinkelser i Norge?

Denne masteroppgaven vil derfor gi ny kunnskap ved å bruke analysemetoder for norske forhold, og illustrere mulighetene med analyser av følgeforsinkelser i Norge.

Hensikten med masteroppgaven er å forbedre forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket. Dette skal gjøres gjennom å etterprøve, tilpasse og videreutvikle analyseteknikker for spredning av følgeforsinkelser med norske data. Målsetningen er derfor knyttet til følgende punkter:

- Etterprøve, forbedre og tilpasse eksisterende analyseverktøy for følgeforsinkelser med norske data
- Gjennomføre en case-studie av følgeforsinkelser.

Det er lite forskning som er gjennomført på følgeforsinkelser i Norge. Derfor er oppgaven begrenset til å bruke de analysemetoder og analyseverktøy som er utviklet til nå. Analysemetodene er basert på resultater fra litteraturstudien høsten 2014, og tilgjengelige verktøy og kunnskap hos NTNU, SINTEF og NSB. Oppgaven er også begrenset til én strekningsvis analyse av følgeforsinkelser. Denne analysen alene vil ikke kunne forbedre forståelsen av følgeforsinkelser i hele det norske jernbanenettverket. Tanken er likevel at en case-studie vil illustrere mulighetene med slike analyser. Oppgaveteksten er vedlagt som vedlegg A (s. 121).

OPPGAVENS STRUKTUR

DEL 1: TEORETISK GRUNNLAG FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

Før det er mulig å analysere følgeforsinkelser er det viktig å ha en forståelse av teorien som ligger bak analysene. Derfor har det vært et naturlig valg å gå gjennom det teoretiske grunnlaget for analyser av følgeforsinkelser i jernbanenettverk. Del 1 forklarer 3 vesentlige begreper:

1. Kapasitet
2. Ytelsesparametere
3. Forsinkelser

Kapasitet er viktig å kjenne til før vi kan gå i dybden på hva som ligger i forsinkelser og deres oppførsel. Deretter blir det redegjort for ytelsesparametere som brukes for jernbanedrift generelt, og i Norge. Til slutt beskrives kategorisering og identifisering av forsinkelser, deres gjensidige avhengigheter og dynamikk. Summen av dette gjør at det er mulig å forstå empiriske analyser som er gjennomført tidligere, og ulike metoder og verktøy som blir brukt for å analysere følgeforsinkelser.

DEL 2: TIDLIGERE EMPIRISKE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

I prosjektoppgaven høsten 2014 var det en problemstilling knyttet til innsamling av kunnskap om analyser av følgeforsinkelser. Derfor ble det gjort en vurdering på hva slags metode som var mest hensiktsmessig for å innhente denne kunnskapen. I samtaler med veiledere fra NTNU, SINTEF, og NSB kom det fram at det var gjort lite forskning på dette temaet. På grunn av dette ble det valgt å bruke en kvalitativ metode i form av en litteraturstudie. Dette er et eksempel på kvalitativ metode som innebærer vurdering av tekstlig informasjon (Samset, 2014).

Del 2 er delt inn i 4 avsnitt:

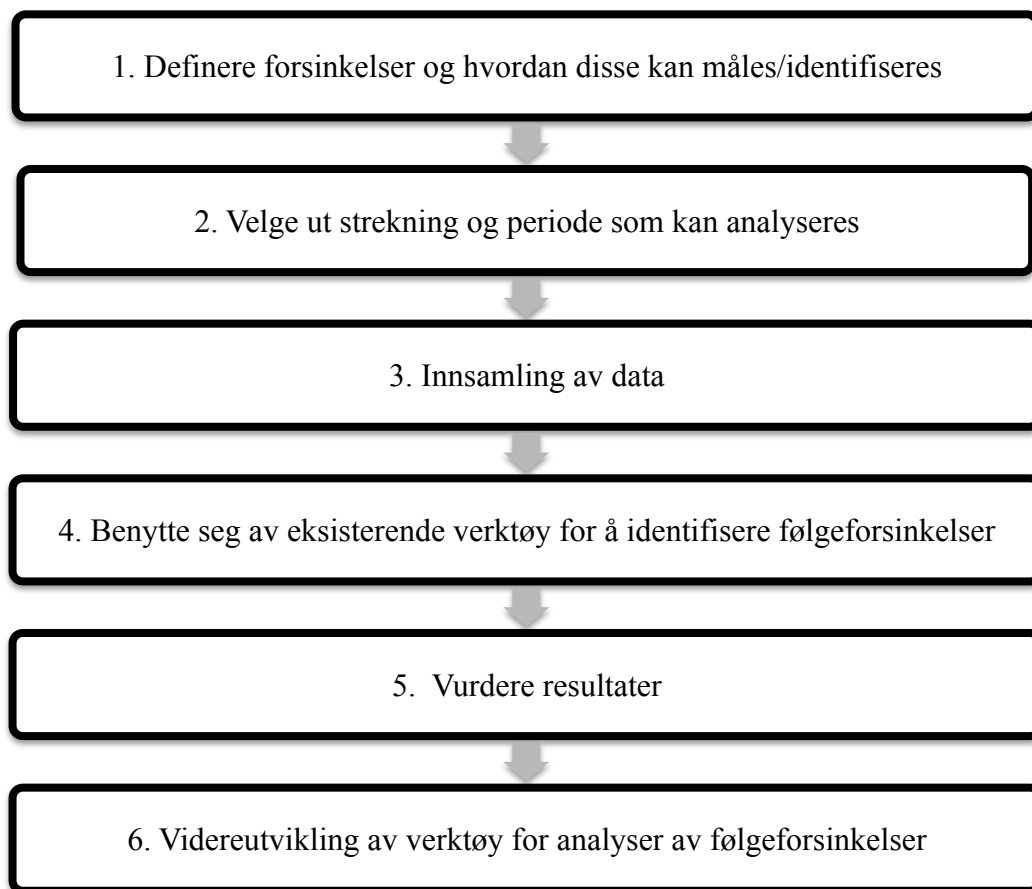
1. Kategorisering av tematikk og metodikk for analyser av følgeforsinkelser
2. Analyser av følgeforsinkelser gjennomført i utlandet
3. Analyser av følgeforsinkelser gjennomført i Norge
4. Fordeler/ulempes med analyser av følgeforsinkelser

Kategorisering av tematikk og metodikk er viktig for å få en oversikt over hva slags forskning som tidligere er gjort, og hvordan analyser av følgeforsinkelser har blitt gjennomført. Ved å skille mellom forskning gjennomført i utlandet og forskning gjennomført i Norge er det også mulig å få en oversikt på eventuelle forskjeller i metodikk og mengden forskning som er gjort. Dette gjør at fordeler og ulemper med analyser av følgeforsinkelser kan oppsummeres. Summen av dette gjør det mulig å gå videre med en egen analyse av følgeforsinkelser.

DEL 3: CASE – STUDIE: FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN

Med bakgrunn i del 1 og del 2 er det mulig å strukturere et videre arbeid med en egen analyse av følgeforsinkelser.

Ved å velge ut en case-strekning/periode er fokuset på å benytte seg av SINTEFs prototypeverktøy for å identifisere følgeforsinkelser ut fra kryssingspunkt på enkeltspor. Når forsinkelsene er identifisert og resultatene vurdert, vil det være mulig å evaluere analysemetodikken og videreutviklingen av et nytt verktøy for analyser av følgeforsinkelser, kalt KryssForsink. Resultatene kan også kobles opp mot registreringen av forsinkelser i Jernbaneverket. Prosessen med denne analysen kan beskrives som en stegvis prosess, og er illustrert i figur 1.



Figur 1: Forskningsprosess – Analyse av følgeforsinkelser

Del 3 er delt inn i 2 avsnitt:

1. Norske verktøy for empiriske analyser av følgeforsinkelser
2. Analyse av følgeforsinkelser på Kongsvingerbanen (01.03.13-31.05.13)

Det er først nødvendig å beskrive de verktøyene som skal brukes for analysen av følgeforsinkelser. Deretter beskrives strekningen som analyseres, hvordan analysen gjennomføres, og hva slags resultater som er oppnådd.

Summen av del 1, 2 og 3 fører til et eget diskusjonskapittel. Her blir det diskutert rundt tematikken og metodikken i analyser av følgeforsinkelser, og resultatene fra analysen av følgeforsinkelser på Kongsvingerbanen. Til slutt er det et konklusjonskapittel med eventuelle konklusjoner i henhold til problemstillingene, egne anbefalinger, og behovet for videre forskning på følgeforsinkelser.

DEL 1

TEORETISK GRUNNLAG FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

KAPASITET

Kapasitetsbegrepet brukes i mange ulike tilfeller. I store norske leksikon er ordet kapasitet definert som evnen til å romme eller yte (SNL, 2005-2007)

Landex et al. (2006) nevner noen av de ulike måtene kapasitet har blitt definert over tid:

- Kapasiteten til jernbaneinfrastrukturen er gitt av evnen til å kjøre togene med en akseptabel punktlighet
- Kapasitet kan defineres som evnen infrastrukturen har til å håndtere en eller flere ruteplaner
- Kapasitet i seg selv eksisterer ikke. Jernbaneinfrastrukturens kapasitet avhenger av måten infrastrukturen blir benyttet.

Nettverkskapasitet, strekningskapasitet eller stasjonskapasitet er også begreper som blir brukt i jernbanefaget (Skartsætherhagen, 1993)

Nettverkskapasiteten uttrykker hele nettverkets evne til å transportere personer og/eller gods. En måte å uttrykke dette på er antall tog per tidsenhet. Andre måter å uttrykke nettverkskapasiteten på kan være gjennom antall passasjerer per tidsenhet, vogner per tidsenhet eller tonn per tidsenhet. Følgeforsinkelser og nettverkskapasiteten er koblet sammen. Ved et stort antall følgeforsinkelser i nettverket, vil evnen til å transportere personer og/eller gods reduseres. Det blir en redusert nettverkskapasitet med et økende antall følgeforsinkelser.

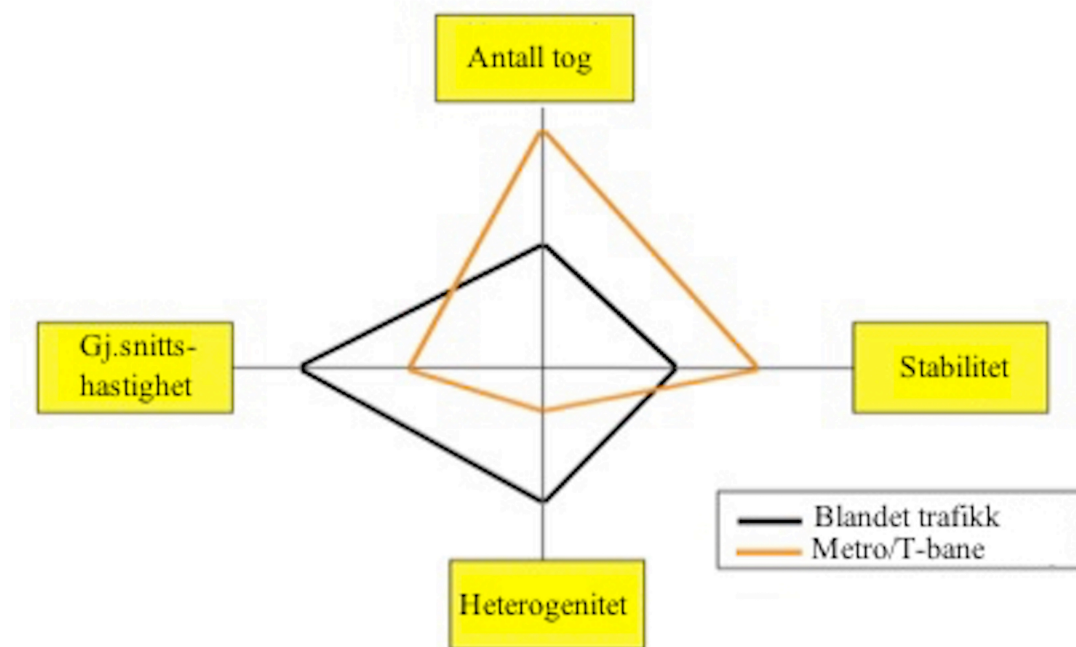
Strekningskapasiteten kan defineres på samme måte som nettverkskapasiteten. Forskjellen er at nettverket er delt inn i delstrekninger som undersøkes individuelt. Begge kapasitetsbegrepene vil ikke bare avhenge av utformingen på jernbanenettverket, men også av togene som trafikkerer jernbanen. Følgeforsinkelser vil også påvirke strekningskapasiteten, men det er ikke gitt at forsinkelsene oppstår på den strekningen som undersøkes. Strekningskapasiteten kan altså reduseres av

forsinkelser andre steder i nettverket. Et problem med dette er det kan være vanskelig å finne den opprinnelige årsaken til forsinkelsen.

Til slutt er det stasjonskapasiteten, som vanligvis uttrykkes som antall vogner som kan betjenes per tidsenhet. De togene som påvirkes av følgeforsinkelser vil påvirke stasjonskapasiteten på de strekninger togene trafikkerer.

Landex et al. (2006) nevner balansegangen mellom ulike faktorer som påvirker kapasiteten på jernbanen. Figur 2 illustrerer sammenhengen mellom faktorene:

- Antall tog
- Gjennomsnittlig hastighet på togene som trafikkerer strekningen
- Stabilitet i ruteplanen
- Heterogenitet i ruteplanen: Hvor ulike er togene som kjører på jernbanestrekningen



Figur 2: Ulike faktorer og deres påvirkning på kapasitet (Landex et al., 2006)

Figur 2 viser for eksempel at det er mulig å ha høy gjennomsnittlig hastighet på togene på en strekning med blandet trafikk, hvis ruteplanen har høy heterogenitet (blanding av regiontog og lokaltog). Dette vil derimot påvirke antallet tog som kan trafikkere strekningen, dersom ruteplanen skal være stabil. For Metro/T-bane er det mulig å kjøre et høyt antall tog med høy stabilitet i ruteplanen. Dette påvirker heterogeniteten og den gjennomsnittlige hastigheten det er mulig å kjøre med.

Det er også vanlig å skille mellom teoretisk(maksimal) og praktisk(nyttbar) kapasitet (Skartsæterhagen, 1993). Det er mulig å belaste en strekning utover den praktiske kapasitet, men ikke utover den teoretiske kapasitet (uten å øke kjøretider eller andre forutsetninger som kapasiteten er beregnet på grunnlag av). I tillegg vil kapasiteten variere fra enkelt- til dobbeltspor.

Teoretisk og praktisk kapasitet

Den teoretiske kapasiteten har ingen marginer for å fange opp forsinkelser. Den er gitt av parametere som avhenger av signalanleggets utforming.

Abril et al. (2008) sier at den teoretiske kapasiteten er:

Antallet tog som kan kjøre en rute, i et gitt tidsintervall, i et perfekt matematisk generert miljø og med ideell minste tidsavstand mellom togene.

Dette er derfor en øvre grense for strekningskapasiteten. Den teoretiske kapasiteten antar at alle togene er homogene, og er jevnt fordelt utover dagen uten noen forstyrrelser. Den tar ikke hensyn til variasjoner i trafikk og drift som i realiteten oppstår. Teoretisk kapasitet er derfor den maksimale kapasiteten som signalsystemet tillater når togene kjører med full hastighet. Dette medfører at dersom nettverket er nær den teoretiske kapasiteten, vil nesten hver forsinkelse som oppstår forplante seg til flere tog.

Den praktiske kapasiteten er en ikke-operasjonell definisjon. Det vil si at den praktiske kapasiteten er knyttet til hva som regnes som akseptabel punktlighet. Dette sier Skartsæterhagen (1993) sin definisjon av praktisk kapasitet:

Kapasiteten av en strekning er evnen til å fremføre tog med en akseptabel punktlighet

Dette er også en som en av kapasitetsdefinisjonene brukt av Landex et al. (2006).

Hva som er akseptabel punktlighet for å estimere praktisk kapasitet, vil variere fra land til land. I Norge bruker Jernbaneverket en egen definisjon for når et tog er punktlig eller ikke. For en passasjer kan Jernbaneverket sin definisjon være en uakseptabel punktlighet, og det er derfor vanskelig å kvantifisere den praktiske kapasiteten nøyaktig. Dette blir forklart ytterligere i avsnittet *Ytelsesparametere*.

Abril et al. (2008) definerer den praktiske kapasiteten på en lignende måte:

Den praktiske grense for et representativt trafikkvolum som kan transporteres over en strekning med en fornuftig pålitelighet

Det representative trafikkvolumet reflekterer den faktiske blandingen av trafikk, prioritering av togruter og lignende. Den praktiske kapasiteten er et mer realistisk mål på kapasiteten.

Det må være mindre enn et visst maksimum av forsinkelser for å si at vi opererer innenfor en gitt praktisk kapasitet. Derfor er den praktiske kapasiteten viktig å kjenne til ved analyser av følgeforsinkelser.

I tillegg til den teoretiske og praktiske kapasiteten skiller Abril et al. (2008) mellom kapasitet som brukes, og kapasitet som er tilgjengelig:

Kapasitet som brukes: Det faktiske trafikkvolumet som kjører i nettverket. Dette reflekterer den faktisk trafikken og driften som skjer, og er vanligvis lavere enn den praktiske kapasiteten.

Tilgjengelig kapasitet: Differansen mellom kapasitet som brukes og den praktiske kapasiteten. Dette er en indikasjon på den tilgjengelige trafikken som kan legges til og håndteres på strekningen. Hvis dette muliggjør flere tog på strekningen er det nyttig kapasitet. Hvis ikke er det tapt kapasitet.

Kapasitet på dobbelt- og enkeltspor

Ved beregning av kapasitet for dobbeltspor er det mest realistisk å se på lengre strekninger med blandet trafikk. Det første som er viktig å kjenne til er togfølgetiden. Dette kan også betegnes som tidsavstanden mellom to tog. Det er 3 faktorer som påvirker togfølgetiden, og sammenhengen mellom disse er illustrert i figur 3:

1. Siktavstand

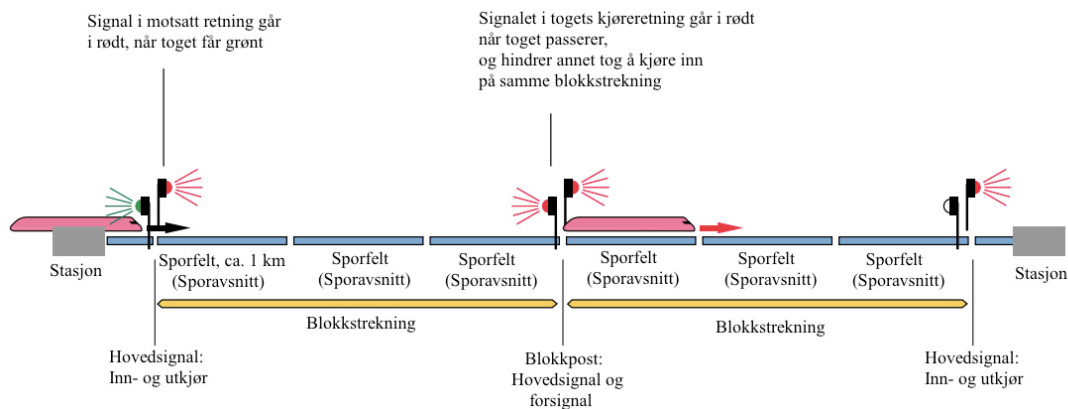
Dette er avstanden fra punktet hvor bremsing innledes, til der signalet faktisk står. Dette kalles ofte for siktpunktet, og vil variere fra lokfører til lokfører. Selv om det alltid er nok bremselengde vil ofte lokfører starte nedbremsingen tidligere enn nøyaktig ved signalet. En av årsakene er muligheten for at signalet endrer seg, og da kan hastigheten økes igjen før toget har stoppet fullstendig.

2. Blokkstrekninger og bremselengde

En blokkstrekning eller blokk lengde er avstanden fra det første restriktive signalet til stopp-punktet (rødt signal). En blokk lengde kan inneholde flere sporfelt. Blokk lengden kan ses på som hoveddelen av togfølgetiden. Blokk lengden er aldri kortere enn bremselengden til det toget som trafikkerer strekningen og har lengst bremselengde. Dette er av sikkerhetsmessige årsaker. Sammenhengen mellom de to størrelsene varierer med signalsystemets utforming.

3. Toglengde

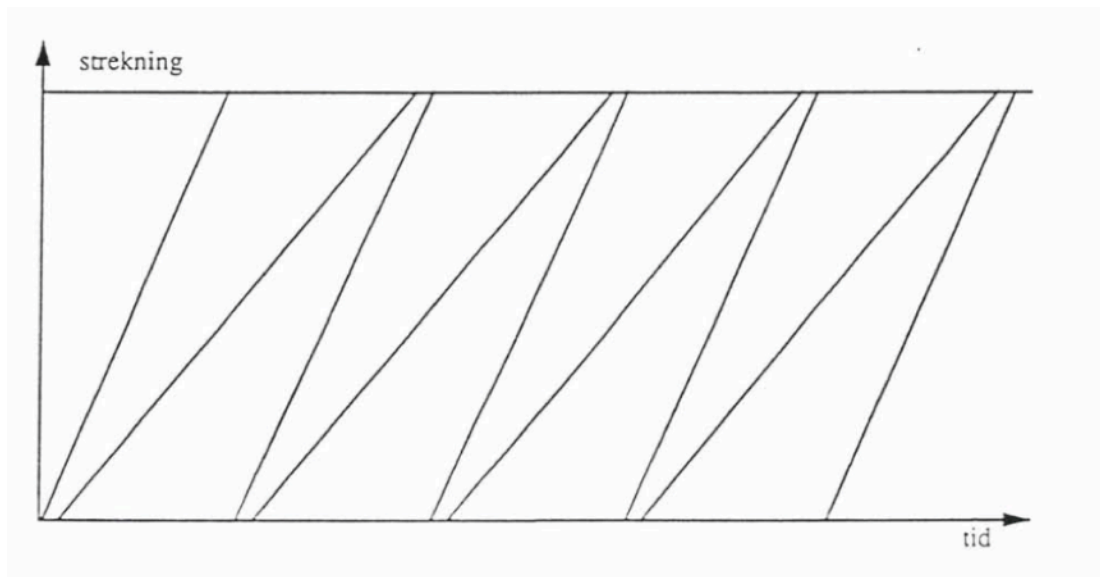
Toglengden er lengden av toget som trafikkerer strekningen. Avhengig av toglengden vil dette ha større eller mindre påvirkning på togfølgetiden, ettersom kortere tog har liten innflytelse.



Figur 3: Sporfelt, linjeblokk og blokkpost (Jernbaneverket, 2013)

Skartsæterhagen (1993) uttrykker den minste togfølgetiden som den minste tidsavstanden som kan opprettholdes mellom to tog slik at det bakerste toget kan kjøre med maksimal hastighet. Det er denne minste tidsavstanden som brukes ved beregning av teoretisk kapasitet på dobbeltspor (Abril et al., 2008). Denne beregnes ved hjelp av en empirisk formel, og er relativt enkel å finne. Det er likevel ikke et realistisk tall på antallet tog det *faktisk* er mulig å kjøre på en dobbeltsporet strekning.

Med blandet trafikk vil kapasiteten begrenses betraktelig. Dette ses ved hjelp av en toggraf (tid-veg diagram) i figur 4, med annethvert raskt og langsomt tog. Ved ankomst på endestasjonen viser toggrafen at det har oppstått en stor tidsluke. Dette kan også tolkes som at den minste togfølgetiden kun utnyttes over en liten del av strekningen. En konsekvens av dette er at et mindre antall tog kan trafikere strekningen. Her er det også verdt å nevne ruteplanens påvirkning på kapasiteten, ettersom det er i ruteplanleggingen det blir bestemt togenes rekkefølge. Det er mulig å kjøre tog med like egenskaper i grupper for å øke kapasiteten. Dette kalles også puljekjøring, ”batching” eller ”flighting”, men markedsmessig er dette ofte ugunstig og vanskelig å gjennomføre (Skartsæterhagen, 1993)



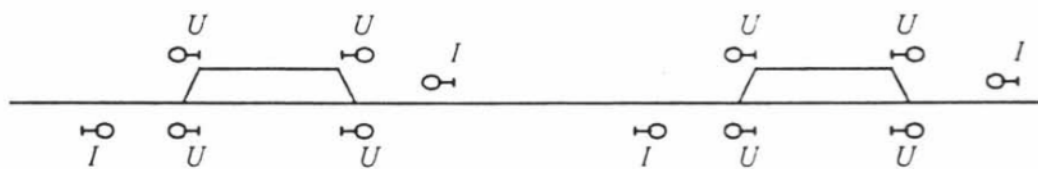
Figur 4: Enkel toggraf med raskt og langsomt tog (Skartsæterhagen, 1993)

Enslartet trafikk hvor alle togene har like egenskaper, da spesielt hastighet, er kun realistisk på enkelte T-banestrekninger, eller for 4-sporsstrekninger rundt store byer. Med enslartet trafikk vil togenes kjøretid være lik, og den minste togfølgetiden være lik mellom alle togene. I slike tilfeller er det mulig å finne en hastighet som gir maksimal kapasitet, altså en optimal hastighet for alle togene som trafikkerer strekningen. (Skartsæterhagen, 1993)

Det er viktig å påpeke at beregninger av kapasitet her vil si beregning av den teoretiske kapasitet. Dette er beregninger som er tilstrekkelige for vurdering av utbyggingsalternativer, men ikke for å vite hvor mange tog det er forsvarlig å belaste en strekning med. I slike tilfeller er det vanlig å bruke en faktor for hvor stor andel av den teoretiske kapasiteten som kan brukes. Dette er kjent som en utnyttelsesgrad. For T-banen i Oslo settes denne vanligvis til maks 80 %, mens på NSBs forstadsstrekninger settes den til 75% i rushtiden. Dette medfører at kjøretidene til direktetog må økes. En slik utnyttelsesgrad er derfor ugunstig for NSB, og i følge Skartsæterhagen (1993) bør det bli brukt en lavere utnyttelsesgrad dersom målet er bedre punktlighet. Ved å bruke en utnyttelsesgrad reduseres den teoretiske kapasiteten til en form for praktisk kapasitet. Dette er igjen relatert til det Abril et al. (2008) beskriver som forventet driftskvalitet og systempålitelighet. Beregninger av praktisk kapasitet er derfor rundt 60-75 % av den teoretiske kapasiteten (Abril et al., 2008).

For lengre strekninger vil det ofte være avgreininger til andre strekninger, kryssingspunkter, forbikjøringsmuligheter og stasjoner der tog starter eller ender. For beregninger av kapasitet på lengre strekninger er det derfor vanlig å dele inn i strekningsavsnitt. Da brukes den dimensjonerende strekningskapasiteten. Det vil si at den teoretiske kapasiteten vil være kapasiteten til det strekningsavsnittet med lavest kapasitet. For beregning av den praktiske kapasiteten kan det være hensiktsmessig å ta med strekningens totale lengde. Hvis strekningsavsnittet med lavest kapasitet har markert lavere kapasitet enn de andre strekningsavsnittene ("flaskehals"), er det derimot hensiktsmessig å la den praktiske kapasiteten for strekningsavsnittet også være den praktiske kapasiteten på totalstrekningen (Skartsæterhagen, 1993)

Kapasitetsberegninger på enkeltspor er ofte mer kompliserte enn beregninger på dobbeltspor (Skartsæterhagen, 1993). For enkeltsporede strekninger er det ikke alltid like nyttig å finne uttrykk for kapasiteten, men heller finne tiltak for å øke kapasiteten. En typisk enkeltsporet strekning i Norge er illustrert i figur 5, der det er illustrert stasjoner hvor togene kan krysse og selve linjen mellom stasjonene. I tillegg vises hovedsignalenes plassering for innkjøring ("I") og utkjøring ("U"). Disse signalene gir tillatelse for henholdsvis inn- og utkjøring fra stasjonene.



Figur 5: Enkeltspor – Hovedsignal for inn- og utkjøring (Skartsæterhagen, 1993)

Signalsystemet avgjør hvordan strekningen inndeles, og hvordan togene kjører etter hverandre. Hvis den deles i to ved hjelp av et såkalt blokksignal kan to tog kjøre etter hverandre mellom de to stasjonene. Dette gir en økt kapasitet for å kjøre flere tog i samme retning før det kommer et motgående tog. Alle hovedsignalene har også forsignaler som gir et varsel om hva neste hovedsignal vil vise. For å få grønt lys fra et hovedsignal kreves det at strekningen frem til neste hovedsignal er fri for tog. Strekningen er reservert det første toget som passerer det grønne signalet, og blir kalt

en togveg. En blokkstrekning kan aldri inneholde mer enn ett tog eller en togveg om gangen (Skartsæterhagen, 1993). Det finnes også bestemmelser på stasjonene om at det skal gå en viss tid fra det første toget er kommet helt inn på kryssingssporet til det andre toget kan få tillatelse til innkjøring på stasjon. Dette kalles kryssingslåsetid, og størrelsen avhenger av sporets lengde på stasjonen. I Norge er denne tiden alt fra 50 til 70 sekunder, og medfører at kryssing tar ganske lang tid. Dette påvirker kapasiteten på strekningen. En mulighet å forhindre dette er med en stasjonsutforming som tillater samtidig innkjøring. Da må vi ha en sikkerhetssone mellom utkjørhovedsignalet og middepunktet, der middepunktet er det punktet der to tog på hvert sitt spor vil berøre hverandre.

Dimensjonerende strekningsavsnitt blir også brukt for kapasitetsberegning på enkeltspor. Begrepet er faktisk enda mer sentralt her, fordi det nesten aldri er aktuelt å beregne kapasiteten for en enkeltsporstrekning uten mellomliggende stasjoner. Derfor er det også viktig å få med antall strekningsavsnitt, eller totalstrekningens lengde for beregning av praktisk kapasitet. I UIC (International Union of Railways) sin standard UIC 405E blir dette gjort ved hjelp av erfaringstall som gir et tillegg til togfølgetiden og buffertiden (kapasitetsutnyttelsen).

Noen banetekniske tiltak for å øke kapasiteten på enkeltspor er nevnt i punktene nedenfor (Skartsæterhagen, 1993):

- Nye kryssingsspor
- Forbedre utforming av eksisterende kryssingsspor
- Økt hastighet

YTELSESPARAMETERE

Pålitelighet, robusthet og stabilitet

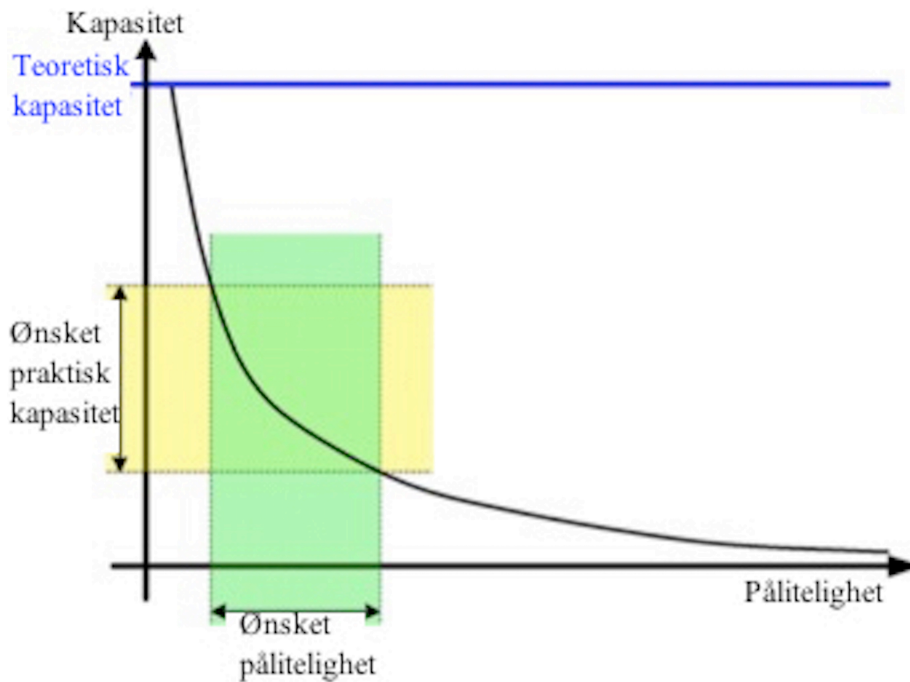
Det er nødvendig med parametere som måler ytelsen til jernbanesystemet for å vurdere hvordan systemet fungerer, og gjennomfører de oppgaver det er satt til å gjøre. Her er det ulik praksis og ulike definisjoner som varierer fra land til land. Pålitelighet, robusthet og stabilitet er likevel fellesnevnerne for hvordan et jernbanesystem yter.

Et pålitelig jernbanesystem blir definert av Vromans (2005) som at togene kjører i rute mesteparten av tiden, og kun en liten andel tog er forsinket eller ute av drift. Både den gjennomsnittlige forsinkelsen og variasjonen i forsinkelser er lav. Hvordan dette måles vil variere, og Bruinsma et al. (2001) foreslår 7 mulige mål på påliteligheten:

1. Punktlighet – sannsynligheten for at et tog ankommer mindre enn x minutter for sent
2. Sannsynligheten for en tidlig avgang
3. Gjennomsnittlig differanse mellom forventet ankomsttid og planlagt ankomsttid
4. Gjennomsnittlig forsinkelse gitt at toget kommer for sent
5. Gjennomsnittlig forsinkelse gitt at toget kommer mer enn x minutter for sent
6. Standardavviket av ankomsttidene
7. Justert standardavvik av ankomsttidene (ignorerer tidlig ankomst), og andre komplekse mål på alvorligheten av upålitelighet

Sammenhengen mellom påliteligheten og teoretisk/praktisk kapasitet kan også ses av figur 6. Her blir det illustrert hvordan det må tilstrebes en balansegang mellom hva som er praktisk mulig å få til av kapasitet, og den påliteligheten som er ønsket av jernbanen. Ved for høy kapasitetsutnyttelse og lav pålitelighet, vil sannsynligheten for forsinkelser og spredning av forsinkelser øke. Ved for lav kapasitetsutnyttelse vil det

kunne være høy pålitelighet, men det vil ofte ikke være mulig å fremføre nok tog for å ta unna den ønskede passasjer- eller godsmengden.



Figur 6: Sammenheng mellom kapasitet og pålitelighet (Abril et al., 2008)

Robustheten og stabiliteten til jernbanesystemet er knyttet til påliteligheten. Robustheten indikerer hvor lett systemet påvirkes av forstyrrelser. Et robust system vil fungere bra under vanskelige forhold, men et ikke-robust system gir store forsinkelser som sprer seg raskt (Vromans, 2005).

Jernbanesystemet er stabilt dersom planlagte hendelser skjer innen planlagt tid under uforstyrrede forhold. Stabiliteten er derfor et mål på den tid/innsats som kreves for å returnere til ordinær drift etter en forstyrrelse.

I Norge er det i all hovedsak 3 ytelsesparametere som blir brukt av Jernbaneverket. Dette er henholdsvis punktligheten, regulariteten og oppetiden. Hvordan disse er definert er beskrevet i de neste avsnittene.

Punktlighet

Punktligheten er en viktig og mye brukt ytelsesparameter for jernbanedrift. Rudnicki (1997) gir en generell definisjon av punktlighet:

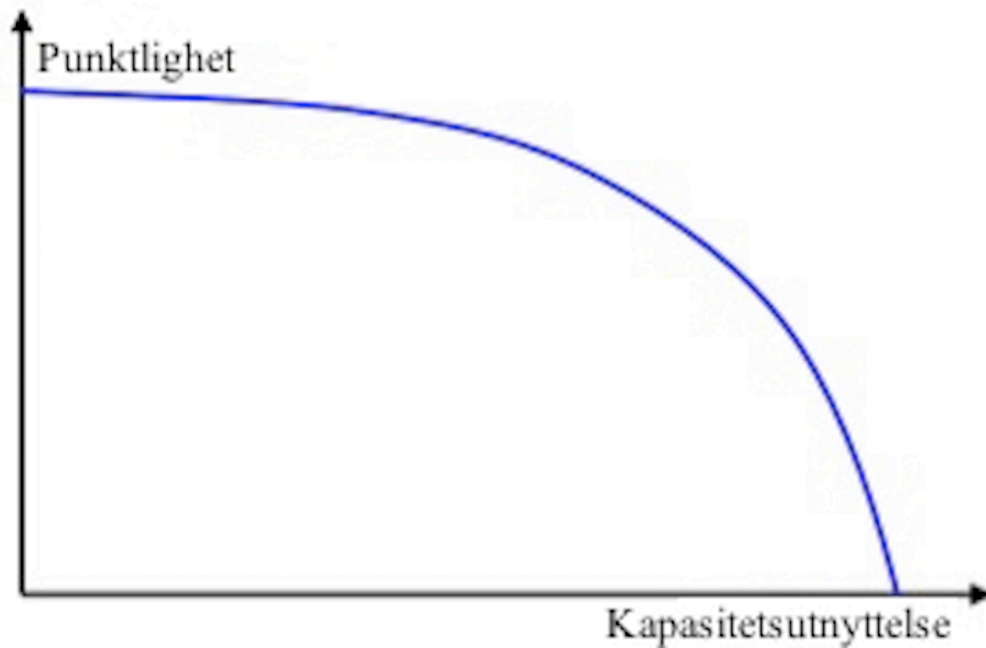
”Punktlighet er når et på forhånd definert kjøretøy ankommer, forlater eller passerer et på forhånd definert punkt til en på forhånd definert tid”

Veiseth (2002) bruker en liknende definisjon for punktlighet for tog:

”Punktlighet er når et på forhånd definert tog ankommer, forlater eller passerer et på forhånddefinert punkt innen en på forhånd definert tidsperiode”

Det er altså en klar kobling mellom forsinkelser og punktlighet. Definisjonene til Veiseth (2002) og Rudnicki (1997) er konkrete definisjoner. Hvis vi har en forsinkelse, vil ikke toget ankomme innenfor den tidsperioden som på forhånd er definert, og dermed er ikke toget punktlig.

Landex et al. (2006) illustrerer også balansegangen mellom kapasitet og punktlighet vha. figur 7. Med økt kapasitetsutnyttelse er det minkende punktlighet. Dette fungerer som en tommelfingerregel på utviklingen av punktligheten i forhold til utnyttelsen av kapasitet.



Figur 7: Punktlighet vs. Kapasitetsutnyttelse (Landex et al., 2006)

Jernbaneverket bruker en definisjon som gir mulighet for små forsinkelser, og likevel opprettholdt punktlighet. Denne definisjonen blir vanligvis oppgitt som en andel tog (i %) som er innenfor en gitt punktlighetsmargin. Denne marginen varierer fra land til land. I Norge er toget punktlig hvis toget ankommer endestasjonen innenfor 3:59 minutt av ruteplanen for lokaltog, og innenfor 5:59 minutt av ruteplan for langdistansetog og godstog (Jernbaneverket, 2014c). I Nederland brukes blant annet 3 minutter som en grense, mens i Japan er det enkelte strekninger med 10-15 sekunders grense for punktlighet (Yuan og Hansen, 2007). Punktligheten er likevel en begrensende beskrivelse for forsinkelser, ettersom alle forsinkelser som er mindre enn den fastsatte punktligheitsgrensen ikke inkluderes. En mer nøyaktig definisjon av punktligheten burde inkludere standardavviket og middelveidien (Yuan og Hansen, 2007).

Regularitet

Punktlighet og regularitet blir ofte brukt om hverandre. Dette er ikke riktig. Begge parameterne sier noe om togenes avvik fra ruteplanen, men det er en vesentlig forskjell mellom uttrykkene. Punktligheten er et mål på andelen tog som avviker fra ruteplanen. Regulariteten er et mål på hvor stor andel av togene som faktisk går. Det vil si at et tog har mulighet til å opprettholde jernbanenettverkets regularitet, selv om toget ikke er punktlig. En høy regularitet kan derfor indikere at nettverket er robust.

Jernbaneverket (2014c) definerer regulariteten som den faktiske andelen tog som blir kjørt som planlagt i henhold til rutetabellene. Her inkluderes ikke tog som er planlagt innstilt som følge av sporarbeider.

Weiseth (2002) bruker følgende definisjon på regularitet for tog:

”Regulariteten til en togavgang ved et punkt, på en på forhånd planlagt rute/strekning/linje, brytes dersom toget ikke ankommer, forlater eller passerer dette punktet”

Regulariteten har sammenheng med forsinkelsesårsaker som hindrer toget i å kunne trafikkere en strekning i det hele tatt. Et eksempel er at togets motor slutter å fungere, og toget blir kansellert. En høy regularitet er spesielt viktig for passasjertog, for å hindre overbelastning av stasjoner og andre tog. Regulariteten kan også vektes etter togenes viktighet (Bayissa, 2013).

Oppetid

Jernbaneverket (2014c) definerer oppetid i forhold til punktlighet. Dette kan skrives som:

$$\text{Oppetid} = \frac{\text{Togtimer} * -\text{Forsinkelsestimer} **}{\text{Togtimer} *}$$

**Planlagte togtimer (person- og godstog)*

***Forsinkelstimer pga. infrastrukturen (ekskl. trafikkavvikling og ytre forhold)*

Det er viktig å legge merke til hvordan forsinkelsestimer er definert. Det er antall timer der togene er forsinket pga. infrastrukturen. Så lenge infrastrukturen er tilgjengelig, og togene går, vil ikke dette medregnes som forsinkelser. Togene kan være forsinket som følge av ytre forhold som vær, eller som følge av endringer i ruteplanen, men dette blir ikke medregnet så lenge togene går. Definisjonen på oppetid gir altså et tall på hvor stor andel av togtimene som er fastsatt i ruteplanen blir overholdt.

FORSINKELSER

Forsinkelser er også en indikator for jernbanenettverkets ytelse. Mengden og størrelsen på forsinkelser kan indikere hvor bra ruteplanen gjennomføres, og til en viss grad hvor bra ruteplanen er bygd opp. Mange og store forsinkelser betyr nødvendigvis ikke at ytelsen til nettverket er dårlig. Et nettverk kan ha mange forsinkelser, men likevel levere på alle andre områder dersom forutsetningene er der. Det er mulig å ha mange forsinkelser som gjør at en passasjer vil oppfatte ytelsen som dårlig, men det kan samtidig være stor kapasitet og mange tog som trafikkerer nettverket. Dette viser hvordan forsinkelser ligger i spennet mellom kapasitet og punktlighet. På grunn av dette vil analyser av forsinkelser kunne hjelpe til med å optimere kapasitetsbruken, minimere driftskostnader, og oppnå et pålitelig og punktlig jernbanenettverk (Yuan og Hansen, 2007).

Det finnes ulike definisjoner på forsinkelser i litteraturen. Gylee (1994) velger å definere forsinkelser på denne måten:

”Dersom en tjeneste ikke ankommer eller forlater et sted i samsvar med den gjeldende tidstabellen”

Dette er en generell definisjon, og kan gjelde andre transportmidler enn tog. Veiseth (2002) har følgende definisjon på forsinkelser i togtrafikken:

”Antall minutter et tog, på et punkt på ruten, er i utakt med den gjeldende tidstabellen”

Det er mange faktorer som bidrar til forsinkelser. Det kan være infrastrukturen i seg selv, hvor mye av infrastrukturen som blir utnyttet, variasjon i kjøretid, ankomst og avganger, samt trafikkstyringen (Nie og Hansen, 2005). Et togs forsinkelse kan også spre seg til andre tog. Det er derfor vanlig å skille mellom primær- og sekundærforsinkelser. Det er også gunstig å skille mellom forsinkelser som oppstår pga. toget i seg selv, eller forsinkelser som skyldes andre tog.

Mellom primær- og sekundærforsinkelser eksisterer det også et komplisert og dynamisk samspill, som er mye av nøkkelen i analyser av følgeforsinkelser. Det er dette vi ønsker en bedre forståelse av, for å øke ytelsen til jernbanen. Registrering av forsinkelser og deres virkelige årsaker er også viktig for å gjøre dette.

Primærforsinkelser

Vromans (2005) definerer primærforsinkelser som de direkte utfallene av årsakene til forsinkelser, som ikke skyldes andre forsinkede tog. Det vil si at togenes ytelse er direkte påvirket av primærforsinkelser som oppstår. Slike primærforsinkelser kan derfor skyldes årsaker som:

1. **Feil på infrastrukturen**, eksempelvis at en sporveksel ikke fungerer
2. **Ulykker med annen trafikk**, eksempelvis kollisjon mellom tog og bil på planovergang
3. **Menneskelige faktorer**, eksempelvis at personell ankommer for sent til toget
4. **Værforhold**, eksempelvis utglidning i rasutsatt område.

I togtrafikken kan det skilles mellom primære- og sekundære årsaker til forsinkelser. Gylee (1994) legger følgende i begrepet primærårsak:

”Primære årsaker er årsaker som direkte forårsaker en forsinkelse. Et eksempel kan være at motoren til et tog svikter, og toget blir forsinket på grunn av dette.”

I Gylee (1994) sin definisjon ses et eksempel på en forstyrrelse av typen ”1. Feil på infrastrukturen”. En primærårsak vil altså forårsake en primærforsinkelse. Derfor kan dette bli omformulert til:

”En primærforsinkelse er en forsinkelse som skyldes en primærårsak, eller en direkte årsak.”

Primærforsinkelser er ikke direkte koblet til følgeforsinkelser, fordi de kun påvirker det toget som forstyrres av primærårsaken. Denne årsaken kan likevel være en kilde til at en primærforsinkelse sprer seg til andre tog gjennom avgrensninger som finnes i jernbanenettverkets kapasitet. Dersom det ikke er nok kapasitet til å ”hente inn” primærforsinkelsen, kan sekundærforsinkelser oppstå.

Sekundærforsinkelser

I det et tog avviker fra ruteplanen kan det medføre hindringer for etterfølgende tog som trafikkerer den samme infrastrukturen (Bayissa, 2013). Vromans (2005) velger å definere sekundærforsinkelser som forsinkelser som skyldes tidligere forsinkelser på grunn av koblinger i jernbanenettverket. Andre synonymer er reaksjonære forsinkelser, eller følgeforsinkelser (Carey og Kwiecieński, 1994)

Sekundærforsinkelser er altså reaksjonære forsinkelser på forsinkelser som oppstår. En forsinkelse kan føre til spredning av forsinkelser gjennom avhengigheter i jernbanesystemet. Slike avhengigheter er ikke alltid lett å finne, og derfor er analyser av følgeforsinkelser et viktig verktøy. Spredningen av forsinkelser kan skyldes følgende faktorer:

1. **Infrastrukturelle koblinger**, eksempelvis kryssingspunkter og stasjoner
2. **Signalering**, altså signalanleggets utforming og begrensninger på kapasiteten
3. **Tidskonflikter** gjennom ruteplanen

Weiseth (2002) finner mangler i Gylee (1994) sin definisjon av sekundærårsaker, og benytter derfor følgende definisjon:

”Sekundære årsaker er at et togs forsinkelse skyldes et annet tog som er forsinket. Det er med andre ord snakk om følgeforsinkelser.”

En sekundærårsak er altså årsaken til en sekundærforsinkelse, eller følgeforsinkelser. Dette kan vi omformulere til:

”En sekundærforsinkelse er en forsinkelse som skyldes at et annet tog er forsinket.”

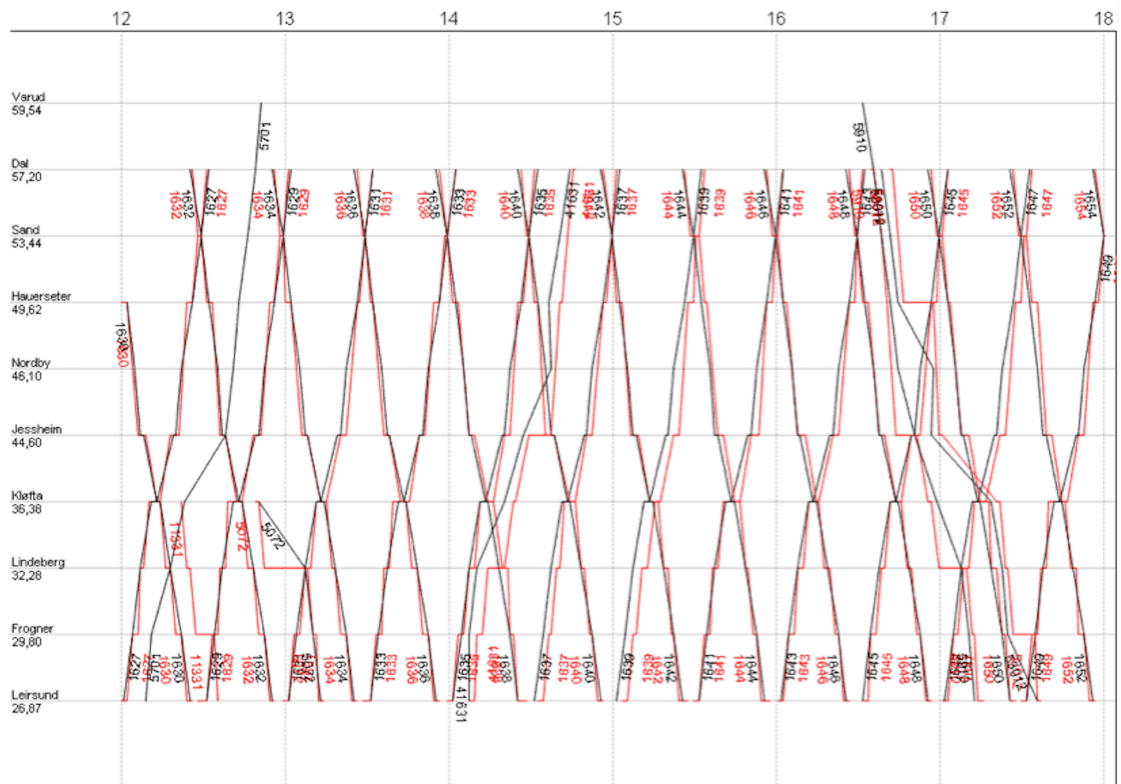
Landex et al. (2006) definerer sekundærforsinkelser som en forsinkelse som skyldes forsinkelse eller kansellering av et eller flere andre tog.

Hvordan forsinkelser sprer seg er en komplisert prosess, og avhenger blant annet av bruken av nettverkets kapasitet og ruteplanene (Yuan og Hansen, 2007). Prosessen er komplisert fordi det oppstår avhengigheter gjennom eksempelvis kryssingspunkter og ruter som slås sammen til enkeltspor/det samme sporet. Infrastrukturelle koblinger i forstyrrelsesårsakene ovenfor er et eksempel på dette. Hvor mye en forsinkelse sprer seg er derfor en gjenspeiling av stabiliteten og påliteligheten til jernbanenettverket. Dersom en forsinkelse vanskelig sprer seg til andre tog kan det tyde på at nettverket er stabilt blant annet med hensyn på kapasitetsutnyttelse. Det kan også skyldes at toget som opplever forsinkelsen ikke er koblet til andre tog gjennom avhengigheter i nettverket eller ruteplanene.

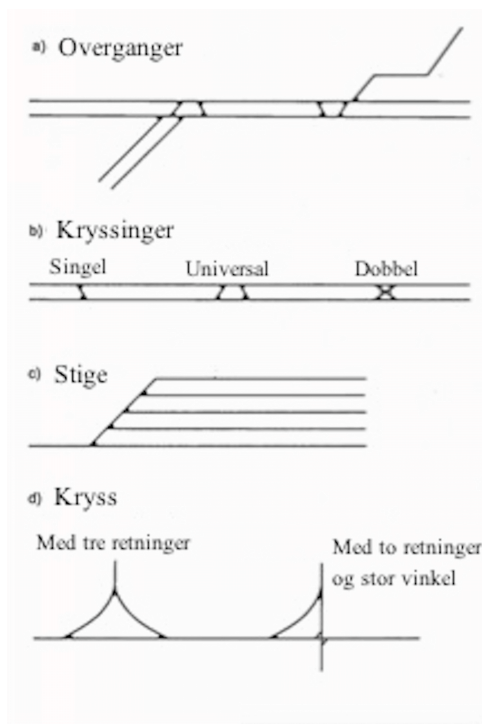
Samspill mellom forsinkelser

Selv om det er vanlig å kategorisere forsinkelsene etter deres årsaker, er det ikke realistisk å si at primær- og sekundærforsinkelser er uavhengige av hverandre. Det er allerede nevnt at en primærårsak kan være årsaken til at sekundærforsinkelser oppstår. Primær- og sekundærforsinkelser er altså preget av et samspill som følge av driften og utformingen på jernbanen. Når det er snakk om spredning av forsinkelser, er det vanlig å anta at stasjoner og kryssingspunkter er flaskehalsene i nettverket (Bayissa, 2013). Det er her det er forventet at en forsinkelse kan spre seg til andre tog. Kryssingspunktene kan være fysiske kryssinger i infrastrukturen gjennom sporvekslere, og kryssinger som blir synlige gjennom toggrafer. I toggrafer tegnes togets bevegelser som linjer med et tilhørende tognummer. Linjen viser togets bevegelser i tid og på strekningen. En slik graf er illustrert i figur 8, med henholdsvis stasjoner på y-aksen og tid på x-aksen. Den svarte linjen indikerer planlagt rute, mens den røde linjen indikerer gjennomført rute.

Stasjoner og strekninger med begrenset kapasitet og/eller høy kapasitetsutnyttelse er ofte en årsak til rutekonflikter mellom togene. Dette påvirker punktligheten til tog som ankommer og forlater stasjonene, samt den totale streknings- og nettverkskapasiteten. Eksempel på kryssingspunkter og mulige rutekonflikter er illustrert i figur 9.



Figur 8: Toggraf – prinsipp



Figur 9: Kryssingspunkter og mulige rutekonflikter (Pachl, 2002)

Konsekvensene av en forsinkelse i nettverket vil i stor grad avhenge av kapasiteten, men det er også en gjenspeiling på de tider som blir lagt inn i ruteplanen. Derfor vil en eventuell følgeforsinkelse avhenge av buffertiden i ruteplanen. Buffertiden er den minste tidsavstanden i ruteplanen for å unngå overføring av mindre forsinkelser til andre tog (Yuan og Hansen, 2007). Slike buffertider blir brukt i ruteplanen for å forhindre at en liten forsinkelse sprer seg. Hvis buffertiden overskrides kan det oppstå spredning av forsinkelser.

Det finnes andre måter å kategorisere forsinkelser på. En metode er gitt av Goverde og Hansen (2001), som kategoriserer i avgangs- og ankomstforsinkelser. Her vil en forsinkelse være den positive differansen mellom den planlagte tiden for en hendelse, og den faktiske realisasjonstiden. Vanligvis er ankomstforsinkelser et resultat av for lang kjøretid, rutekonflikter mellom tog eller en forsinket avgang på foregående stasjon. For ankomstforsinkelser er dette den dynamiske prosessen som følgeforsinkelser er preget av. Mellom to stasjoner på en gitt strekning kan det med samme tog oppleves varierende kjøretid. Bayissa (2013) skiller mellom indre og ytre årsaker til dette. Indre årsaker er koblet til tekniske feil (signal, sporveksler, strømforsyning og fordeling, overbygning og rullende materiell), driftspersonell (lokfører, konduktør, togleder) og passasjerflyt (varierende påstigningstid). Ytre årsaker er for eksempel værforhold. Disse indre og ytre årsakene er nært tilknyttet primær- og sekundærårsakene, men resultatet er avgangs- og ankomstforsinkelser i følge Goverde og Hansen (2001).

Samspillet mellom forsinkelser er kilde til tilfeldig variasjon, og er derfor vanskelig å oppdage. I tillegg er årsakene koblet til fundamentale deler av jernbanedriften. Derfor er det essensielt å oppnå en bedre forståelse av samspillet mellom forsinkelser og deres årsaker.

Spredning av forsinkelser

Forsinkelser er altså preget av et samspill som følge av hvordan jernbanen er utformet og blir driftet. Dette gjør at små forsinkelser kan akkumuleres gjennom en reise, og spre seg til andre tog gjennom kryssingspunkter og stasjoner. Analyser av følgeforsinkelser er derfor en svært kompleks prosess ettersom spredningen er dynamisk (varierende). Spredningen avhenger blant annet av kapasitetsutnyttelsen og ruteplanleggingen (Yuan og Hansen, 2007). Fordi det eksisterer rutekonflikter der ruter slås sammen til et enkeltspor, og kryssingspunkter der ruter krysser hverandre, vil det oppstå kompliserte avhengigheter. Stabiliteten til ruteplanene og påliteligheten til jernbanenettverket kan derfor vurderes ut fra hvor store spredninger av forsinkelser vi får (Yuan og Hansen, 2007).

Den kausale forklaringen til spredningen av forsinkelser, kan i følge Conte (2007) deles inn i 3 typer:

1. Følgeforsinkelser som følge av at togene deler den samme infrastrukturen (blokkerer)
2. Forsinkelser som følge av for sen forbindelse mellom to tog
3. Spredning fra samme tog over en strekning, som følge av tidlig forsinkelse

Vromans (2005) nevner følgende hovedårsaker til spredning av forsinkelser:

- **Tidlig forsinkelse:** Dersom en forsinkelse oppstår tidlig på en strekning, og aldri blir innhentet, kan det resultere i en spredning av forsinkelsen helt fram til endestasjonen. Dette er ikke en ”virkelig” sekundærforsinkelse, men primærforsinkelsen blir målt mer enn en gang. En primærforsinkelse kan altså spre seg til et helt annet punkt i nettverket. Dette illustrerer hvor vanskelig det er å identifisere og kvantifisere forsinkelser.
- **Kapasitetsbegrensninger:** Som nevnt tidligere medfører sikkerhet i signalsystemet at det er en minste tidsavstand mellom tog. Avhengig av strekning og situasjon er det også en minste planlagt tidsavstand. Differansen

mellom disse to tidene kjenner vi igjen som buffertiden. Buffertiden vil være liten dersom strekningen/stasjonen har høy kapasitetsutnyttelse. Begrenset kapasitet i nettverket vil derfor medføre at om et tog blir forsinket vil det neste toget lettere bli forsinket. Mange andre tog blir ofte forsinket på grunn av dette.

- **Det rullende materiellet:** Det finnes ulike tog som trafikkerer ulike strekninger og ruter. Når et tog ankommer sin endestasjon vil dette brukes videre, og kanskje på en annen rute. Dersom denne prosessen tar kortere tid enn en eventuell forsinkelse til et ankommende tog, vil det neste toget også bli forsinket. Årsaken er da det ankommende togets forsinkelse, og ikke prosessen med å klargjøre det foregående toget. Når det rullende materiellet blir brukt til mer enn ett ankommende tog kan spredningen av forsinkelser gå enda raskere. Hvis det er annet rullende materiell tilgjengelig kan denne gjensidige avhengigheten fjernes.
- **Personell:** Personellet vil ikke kjøre det samme toget hele tiden. De må derfor bytte tog flere ganger. Hvis personellet ankommer sent til toget, spesielt tidlig på dagen, kan forsinkelsen spre seg til senere tog. Både konduktør og lokfører må være på tiden for at toget skal ha punktlig avgangstid. Her kan også tilgjengelig ekstrapersonell redusere denne avhengigheten.
- **Togledelse:** Ved små forsinkelser vil ikke toglederne og togekspeditørene ha mye å gjøre. Dersom det derimot er store forsinkelser er det mulig at tog må omberammes, eller i verste fall delvis kanselleres. Vanligvis finnes det strategier for hvordan dette skal håndteres, men av og til må togledelsen improvisere.
- **Passasjerforbindelser:** Enkelte togruter har forbindelser som krever at dersom det ankommende tog er forsinket må det neste toget vente. Et eksempel på dette kan være togforbindelsen fra Sørlandsbanen til Arendal, der det går en egen togforbindelse som forbinder byen med Sørlandsbanen.

Goverde (2005) har en liknende årsaksinndeling for spredning av forsinkelser. Her blir det brukt en overordnet inndeling i årsaker som skyldes hindringer, og årsaker som skyldes synkronisering. Dette er vist i tabell 1.

Tabell 1: Årsaker til forsinkelsesspredning (Goverde, 2005)

Type	Eksempel
Hindring	Saktegående tog foran
	Rutekonflikt
	Opptatt plattform
Synkronisering	Passasjerforbindelse (venting på tog)
	Rullende materiell (vending, skifting o.l.)
	Flytting av personell

I tillegg til dette kan de ulike spredningsårsakene fungere i kombinasjon. Eksempelvis kan en tidlig forsinkelse og rutekonflikt i en stram ruteplan lett gi spredning av forsinkelser. Dette skyldes at vi ikke får tatt igjen togets egen rute, men også at det forårsaker stadig økende mengde forsinkelse for motgående trafikk. Dette gjelder spesielt på enkeltspor. Med mindre det er konstant avstand mellom alle kryssingsspor (noe det sjeldent er) er det altså en viss fare for økende mengde forsinkelse i systemet hvis du først introduserer et tog ute av rute i en stram ruteplan. Det er dette fenomenet som forårsaker dårligere robusthet for jernbanesystemet, og er et argument for å ta ned kapasitetsbruken på enkeltspor. Videre er kryssinger i seg selv en direkte “følgeforsinkelsesgenerator”. Noe av årsaken er det som er beskrevet over, men krysslåsing og omlegging av kryssinger (gjort av togledelsen) er årsaker som gir tilsvarende effekt.

En annen faktor å ta hensyn til er overgangen mellom dobbelt- og enkeltspor. Dette er spesielt aktuelt med det jernbanenettverket som kommer til å være gjeldene i Norge etter InterCity-utbyggingen. Da vil de store innfartsårene til Oslo være dobbeltsporet jernbane, men de lengre strekningene fortsatt vil være enkeltspor.

Identifisering av forsinkelsesårsaker

Det kompliserte samspillet mellom forsinkelser gjør det vanskelig å identifisere den opprinnelige årsaken til forsinkelsene. De fleste jernbaneeksperter mener at det er flere sekundærforsinkelser enn primærforsinkelser i et jernbanesystem (Bayissa, 2013). Det er likevel ikke gitt hva slags årsak som opprinnelig forårsaket forsinkelsen. Eksempelvis kan det være to primærårsaker som samtidig forårsaker en forsinkelse, dersom det er signalfeil og manglende personell samtidig. Det er også mulig at forsinkelsen kan skyldes både en primær- og sekundærårsak, eksempelvis med signalfeil og for langt stasjonsopphold som følge av venting på togforbindelse. Det er altså ikke gitt at den resulterende forsinkelsen skyldes det ene eller det andre. I tillegg til disse fenomenene har det rullende materiellet, sammen med ruteplanlegging og korresponderende tog, variert gjennom historien (Bayissa, 2013). Konsekvensene av dette er at det finnes ulike data om togforsinkelser. Dette fører til ulike statistikker på like strekninger og nettverk.

Når forsinkelser oppstår på stasjoner, blir disse registrert og overvåket gjennom togledelsessystemer og ruteplandatabaser. Selv om forsinkelsene blir fanget opp i systemet, er det vanskelig å si om en forsinkelse eksempelvis skyldtes et saktegående tog eller en rutekonflikt hvor lokføreren måtte kjøre saktere pga. signalering. Sagt på en annen måte er det forskjell på en forsinkelse som skyldes manglende kapasitetsutnyttelse, og en forsinkelse fordi vi ikke har den kapasiteten som trengs for å være punktlig. Kobler vi dette opp mot kategorisering av primær- og sekundærårsaker kan det bli tolket slik at primærforsinkelser skyldes at tog ikke klarer å utnytte tilgjengelig kapasitet, mens sekundærforsinkelser skyldes at det er begrenset kapasitet tilgjengelig for å være punktlig. Det betyr ikke at sekundærforsinkelser skyldes manglende kapasitet i nettverket generelt, men at under gitte forhold er det begrenset mulighet for et tog til å ta ut den kapasiteten som trengs for å oppnå punktlig drift. Slike gitte forhold blir da sekundærårsaker. På samme måte betyr det ikke at primærforsinkelser skyldes manglende kapasitet, men at primærårsaker fører til at toget ikke klarer å ta ut den tilgjengelige kapasiteten.

Det er store forskjeller i tilgjengeligheten og kvaliteten i informasjonen om forsinkelsesårsaker, ettersom det ikke blir brukt noen standardisert metode for dette. Et annet problem som ikke er løst gjelder fordelingen av forsinkelser til primær- og sekundærårsaker. Desto større frekvens av tog, eller kapasitetsutnyttelse, desto større andel får vi av sekundærforsinkelser totalt. Dette gjør det vanskelig å fordele årsakene nøyaktig, fordi spredningen av forsinkelser går langt ut i nettverket og er vanskelig å identifisere. Det er dette som er mye av utfordringen med analyser av følgeforsinkelser, og deres årsaker.

Når forsinkelser først oppstår og oppdages blir disse registrert av togledelsen på stasjon. Da tilegnes forsinkelsen en forsinkelsesårsak og blir registrert i databasene til Jernbaneverket. Jernbaneverket bruker forsinkelsesårsakene vist i tabell 2 på de neste sidene. Det er likevel ikke gitt at årsaken som registreres er den utløsende årsaken til forsinkelsen, og dermed er det ikke gitt at å løse problematikken relatert til denne årsaken vil fikse forsinkelsesproblemene.

Tabell 2: Jernbaneverkets årsakskoder (Jernbaneverket, 2014a)

Årsakskode	Forklaring
1. Bane	Linjen, skinnebrudd, solslyng, telehiv. Saktekjøring i.h.t. T-sirkulære. Glatte skinner, snø/is/løvfall, tre på linjen, vegetasjon hindrer sikt. Overvann pga. tett stikkrenne (ikke flom). Planlagt arbeid ikke avsluttet i tide.
2. Sikringsanlegg	Ved feil på: Linjeblokk, pærekontroll, stillverk/fjernstyringsanlegg, ATC-balise, vegsikringsanlegg, rasvarslingsanlegg. Sporveksel ikke i kontroll, Utilsiktet passering av signal i stopp grunnet teknisk feil ("signalfall"). Sporfeltbelegg, inkl. saltbelegg. Feil ved nødstrømsanlegg.
3. Kraft/Kontaktledningsanlegg	Nedrevet/skadet kontaktledning. Tre over KL-anlegg. Feil på KL-komponenter. Feil i omformerstasjon til KL. (strømløst/reduert kapasitet). Forårsakende tognr angis i tilfeller av skade på KL.
4. Tele- og transmisjonsfeil	Tele- og transmisjonsfeil som fører til driftsforstyrrelser. Feil ved GSM-R-systemet. Feil ved høyttaler/anviser.
5. Planlagt vedlikeholdsarbeid infrastruktur	Tog planlagt innstilt på aktuell strekning. Vente på alternativ transport. Enkeltsporet drift grunnet planlagt arbeid.
6. Materiell med feil sperrer sporet/blokkstrekning	Kode 6 nyttes for andre tog som blir forsinket/innstilt grunnet et annet tog (forårsakende) sperrer

spor/blokkstrekning. Nyttes også dersom enkeltsporet drift må iverksettes grunnet dette.

7. Trafikkavvikling

Årsaker i forhold til trafikkstyring: Signal stilles for sent, får ikke meldt tog til betjent stasjon, køkjøring, overbelastet banestrekning (Se Network Statement), Helhetsvurdering vedrørende rekkefølge/valg av kryssingssted, konstruksjons/systemfeil i ruteplan. Feil i hjelpesystem FJS (Automat/ATL/TLS). Følgforsinkelser

81. Feil ved materiell

Alle feil ved rullende materiell som medfører stans eller redusert kjørehastighet. Lastforskyving på godstog.

82. Materiell sent fra hensettingsspor

Benyttes når avgang blir forsinket fordi toget ikke er satt opp i tide fra driftsbanegård/lokstall/hensettingsspor e.l.

83. Manglende personell

Forsinkelse som er forårsaket av enhver form for personalmangel hos jernbaneforetaket, inklusive personalbytte underveis.

84. Stasjonsopphold

Rutemessig oppholdstid på stasjon/holdeplass overskrides grunnet reisende/gods/skifting underveis. Jernbaneforetaket ber toget holdes tilbake grunnet overgangsreisende fra andre forsinkede tog.

85. Planforutsetninger endret

Toget kjøres med redusert materiell (kapasitet/hastighet) enn forutsatt. Toget

	holder ikke fastsatt hastighet. Ekstra togstopp beordret av jernbaneforetaket. Tog innstilt grunnet markedsmessige årsaker eller manglende materiell, Øvelseskjøring.
91. Forsinkelse fra utlandet	Tog forsinket/innstilt fra Sverige. Tog må holdes tilbake på norsk side grunnet kapasitetsmangel i Sverige
92. Ytre forhold	Storm, flom, ras som gjør linjen ufarbar samt ved risiko for uhell grunnet dette. Store snøfall i tiden hvor snøberedskap ikke er opprettet.
93. Uhell, påkjørsel	Ved påkjørsel av person, kjøretøy, dyr eller annen gjenstand på linjen eller stasjon. Driftsuhell, avsporing og skifteuhell.
94. Uønsket hendelse	Tilløp til uhell, f. eks ulovlig ferdsel i spor. Tog venter på politi/ambulanse. Brann i tilknytning til linjen/stasjon. Utsiktet passering av signal i stopp (Reell passering).

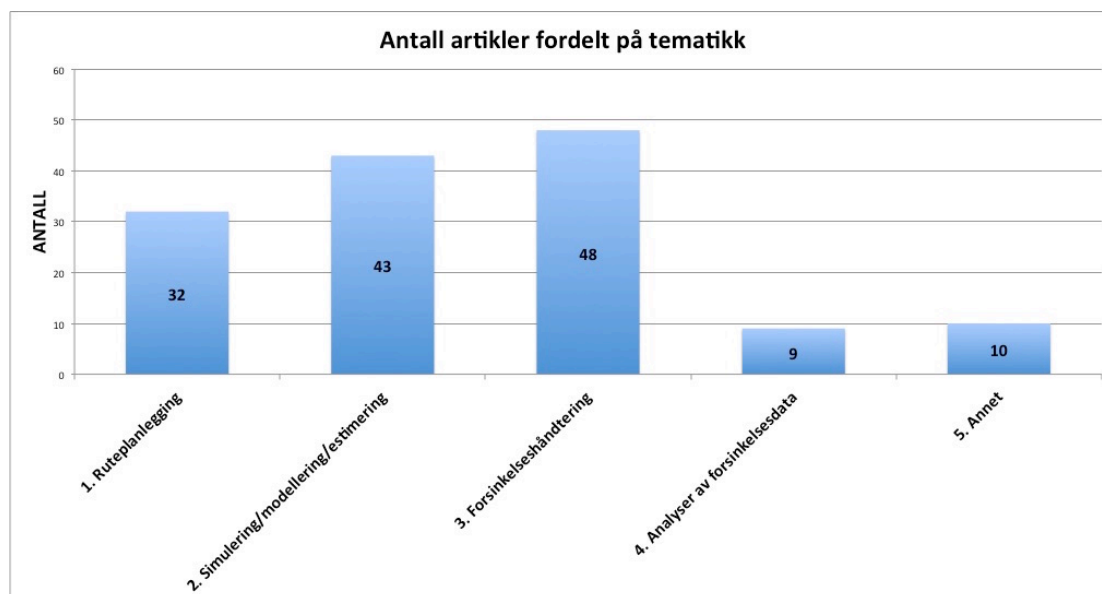
DEL 2

TIDLIGERE EMPIRISKE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

KATEGORISERING AV TEMATIKK OG METODIKK FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

142 artikler ble sett nærmere på i litteraturstudien høsten 2014 (Åsland, 2014). Disse ble delt inn etter årstall, nasjonalitet, stikkord og tematikk. Her er det mest vesentlig å nevne de 5 kategoriene for tematikk som ble brukt. Kategoriene beskrives nedenfor, og fordelingen vises i figur 10.

1. **Ruteplanlegging** – Optimering av ruteplaner, analyser av ruteplaner og deres robusthet når det kommer til forstyrrelser/forsinkelser
2. **Simulering/modellering/estimering** – Analyser der det brukes sannsynlighetsfordelinger, algoritmer og andre matematiske metoder for å simulere, modellere og estimere hvordan forsinkelser oppfører seg i et nettverk og påvirker ytelsen.
3. **Forsinkelsehåndtering** – Analyser med fokus på togledelse, trafikkstyring og generell håndtering av forsinkelser i det de oppstår. Strategier for å håndtere slike situasjoner og lignende.
4. **Analyser av forsinkelsesdata** – Innsamling av sanntidsdata, og analyser på hvordan forsinkelser oppfører seg i virkeligheten
5. **Annet** - Temaer som ikke kan kategoriseres under kategori 1-4, men fremstår som relevante for analyser av følgeforsinkelser.



Figur 10: Tematikk – Gjennomførte analyser av følgeforsinkelser (Åsland, 2014)

Selv om artiklene er kategorisert har det vært overlappende tematikk i enkelte av dem. Spesielt gjelder dette artikler i kategori 1, 2 og 3. Dette illustrerer også det samspillet som eksisterer i jernbanenettverket. Nyttan ved å kategorisere er å få et bilde av den dominerende tematikken i forskningen på følgeforsinkelser. Som vist i figur 10 er det mye fokus på simulering/modellering/estimering, og hvordan forsinkelser skal håndteres når de først oppstår. Fokuset i litteraturstudien var på hvordan forsinkelser blir definert, identifisert og analysert i sanntid. Analyser i kategori 4 og 5 var derfor mest interessante å se på videre.

Yuan (2006) oppsummerer 3 metoder for å analysere og modellere forsinkelser:

Metode 1. Regresjonsanalyse med flere variabler

Metode 2. Sannsynlighetsfordeling for forsinkelser

Metode 3. Sannsynlighetsmodeller for spredning av forsinkelser

Det er først og fremst regresjonsanalyse med flere variabler som brukes for å analysere forsinkelser i sanntid. De to andre metodene blir brukt for modellering og estimering. Resultatene fra litteraturstudien er derfor mest knyttet opp mot metode 1.

I tillegg foreslås det å legge til følgende metoder:

Metode 4. Identifisering av forsinkelsesmønstre vha. algoritmer

Metode 5. Identifisering av forsinkelsessammenhenger vha. grafer

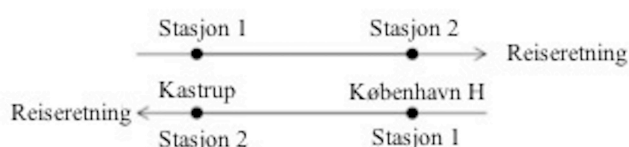
Akkurat som i kategoriseringen av tematikk, er det viktig å påpeke den overlappende metodikken i enkelte av analysene. Metode 4 og 5 kan ofte sammenfalle med metode 1. Det er hensiktsmessig å skille mellom metodene der det er mulig for å få et bredere perspektiv på analyseteknikker.

I de to neste avsnittene er det en gjennomgang av de viktigste funnene av analyser gjennomført i utlandet, og tidligere analyser som er gjennomført av SINTEF/NSB i Norge. Til slutt er det et avsnitt der fordelene og ulempene med de ulike metodene er oppsummert.

ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER GJENNOMFØRT I UTLANDET

Eksempel på ”Metode 1: Regresjonsanalyser med flere variabler” er funnet i analysen til Richter (2013). Her ble det brukt ankomsttider for å identifisere forsinkelsene. Dette kan knyttes opp mot Goverde og Hansen (2001) sin inndeling i avgangs- og ankomstforsinkelser. Målsetningen med analysen var å forbedre punktligheten på en strekning mellom Kastrup og København H. Stasjonene på denne strekningen ble derfor brukt som målepunkter. Figur 11 viser hvordan ankomstforsinkelsen ble funnet ved hjelp av disse målepunktene.

$$\text{Forsinkelse}_{\text{Ank, stasjon 2}} = \text{Forsinkelse}_{\text{Ank, stasjon 1}} + \text{Tidstap}_{\text{Stasjon 1}} + \text{Tidstap}_{\text{Strekning}}$$



Figur 11: Identifisering av forsinkelser (Richter, 2013)

Gjennom en fokusert statistisk tilnærming ble forbindelsene mellom forsinkelser identifisert ved ulike målepunkter for ulike togsystemer. Fokus var på å sammenlikne medianer for ulike grupper av tog. Derfor var grupperingen av tog vesentlig for å unngå forsinkelsesspredninger som maskerer virkelige forskjeller i median og variasjon. I analysen brukes en “Lean Six Sigma” -inspirert tilnærming for å analysere dataene. Dette er en prosess med definering, måling, analysering, forbedring og kontroll (Porter, 2006).

I denne analysen var de ulike nivåene definert som:

- Nivå 0: Målsetning
- Nivå 1: Aggregering av toggrupper/togtyper
- Nivå 2: Årsaker til gjentakende forsinkelser
- Nivå 3: Korrelasjon mellom togsystemer

- Nivå 4a: Aggregering av tognummer
- Nivå 4b: Forsinket ankomst fra Sverige

Cule et al. (2011) benyttet seg av avgangs- og ankomsttider. Disse ble målt ved signalene. Deretter ble avgang- og ankomsttidene ved det virkelige karakteristiske punktet (stasjonen) regnet ut vha. hastighet og distanse. Cule et al. (2011) forsøkte å finne forsinkelser som oppstår ofte innen et gitt tidsvindu, det være seg over flere dager eller måneder med data. Analysen er derfor et eksempel på metode 1 og 5. I analysen finnes ikke et fast mønster av hvordan forsinkelsene sprer seg, men et mønster av hva slags tog som er forsinket samtidig. Dataene ble delt inn i mindre datasett og avgangs- og ankomsttider. Dette kan sammenliknes med den ”Lean Six Sigma”-inspirerte tilnærmingen til Richter (2013).

Lindfeldt (2010b) sin analyse hadde fokus på endringen i forsinkelser i det togene ankom eller forlot en rute. Fordi de fleste tog kjører langs mer enn én av de rutene som ble analysert var ikke den absolutte forsinkelsen til togene av interesse. Økningen eller minkingen i forsinkelsene ga 3 ulike parametere for vurdering av nettverket:

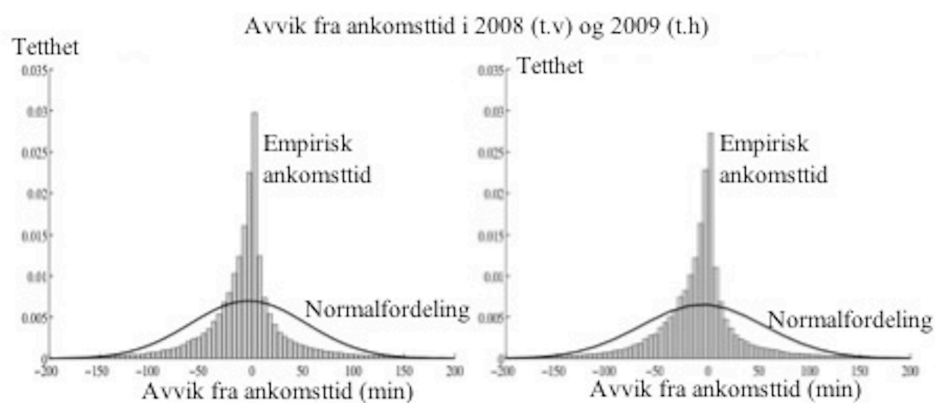
- Andelen av det totale antall tog som har opplevd en økende forsinkelse
- Medianforsinkelsen per kilometer for togene med en økende forsinkelse
- Standardavviket til forsinkelsen per kilometer for togene med en økende forsinkelse.

Forsinkelsene i de to siste parameterne ble normalisert vha. lengden til ruten som ble evaluert. Økningen i forsinkelser ble antatt proporsjonal med lengden på ruten. Disse beregningene ble gjort for persontog og godstog. Analysen er først og fremst et eksempel på metode 2/3.

Lindfeldt (2010a) sin kapasitetsanalyse tok utgangspunkt i å identifisere problemutsatte strekninger. For å gjøre dette ble nettverket delt inn i 123 seksjoner i henhold til trafikkmønster og type kjøreveg (enkelt- eller dobbeltspor). Data ble brukt for å beregne beskrivende parametere slik som forsinkelsesutviklingen og gjennomsnittlig hastighet. Disse dataene kommer fra ruteplanene, data om togene som

kjører i nettverket (BANSTAT), data om forsinkelsene ved start- og endestasjon for hver seksjon (TFÖR) og data om infrastrukturen (BIS). Etter beregning av de beskrivende parameterne ble det brukt lineær regresjon i Matlab for å undersøke om disse korrelerer med forsinkelsene til togene. Denne analysen er derfor også et eksempel på metode 1.

Krüger et al. (2013) identifiserte fordelingen av forsinkelsene i sin analyse. Dette er basert på teori om at forsinkelsene følger en sannsynlighetsfordeling i henhold til avvik fra ruteplan. Dette er altså analyser som går inn under metode 2 og/eller 3. Fokus i analysen var på ankomstforsinkelsene ved endestasjonen til godstog. Et eksempel på dette er vist i figur 12.



Figur 12: Sannsynlighetsfordeling for ankomstforsinkelser (Krüger et al., 2013)

Krüger et al. (2013) så på fordelingen av godstog som ankommer for sent til endestasjonen. Det vil si at tog som ankommer for tidlig, blir kansellert, eller forlater stasjonen for tidlig ikke ble analysert her. Det var et hovedfokus på påliteligheten, eller mangelen på denne, ved hjelp av en beskrivende tilnærming. Først ble det identifisert hva slags sannsynlighetsfordeling som best passet forsinkelsene. Deretter ble det undersøkt hvor stor andel av forsinkelser de ulike stasjonene står for. For å se på spredningen av forsinkelser ble det analysert hvordan en forsinkelse på et punkt påvirket ankomsttiden ved endestasjonen. Ved hjelp av lineær regresjon ble det deretter undersøkt hvordan det totale antallet godstog som ankom en stasjon og den totale ankomstforsinkelsen på stasjonen korrelerte. Her ble også avstand inkludert. Hvordan forsinkelsene fordelte seg i henhold til tid på dagen, eller året ble også undersøkt. Dataene var basert på en database med 6 millioner godstogobservasjoner

per år. Avgang- og ankomsttider for start- og endepunkt, og strekninger mellom dem ble registrert. Dette ble gjort for årene 2008 og 2009. Denne analysen er et fint eksempel på overlappende metodikk, der det først ble brukt metode 2/3, deretter metode 1.

Analysen til Flier et al. (2009) foreslår 3 ulike avhengigheter mellom forsinkelsene:

1. Systematiske avhengigheter: Hvis forsinkelsen til et tog forårsaker sekundærforsinkelser for et annet tog på en regelmessig basis (minst 25 % av dagene)
2. Venteavhengigheter: Et tog venter på et annet for å opprettholde forbindelser
3. Blokkavhengigheter: Der to tog må bruke den samme blokk lengden, eller infrastrukturen

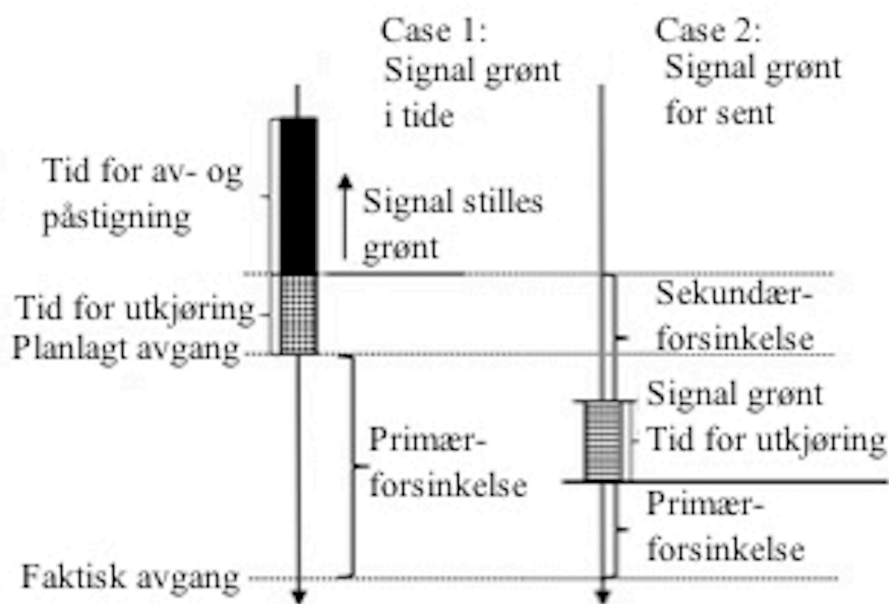
For å finne disse avhengighetene brukte Flier et al. (2009) metode 4, og utviklet en algoritme. Algoritmen fant korrelasjoner og avhengigheter mellom togene, og analyserte resultatene i programmet RStudio, vha. sanntidsdata fra SBB. Analysen konkluderer med en tilnærming i 3 steg for evaluering av ruteplanen ved å analysere forsinkelser. Dette inkluderer den presenterte algoritmen, en statistisk analyse av avhengighetene, og å utvide til globale avhengigheter for å finne et mulig nettverk av følgeforsinkelser.

Babu et al. (2011) brukte en database med tidene der tog passerer karakteristiske punkter, slik som stasjoner. For å finne skjulte mønstre der tog sprer forsinkelser til andre tog, var det en målsetning å finne de forsinkelsene som oppstod oftest. Mer spesifikt vil dette si forsinkelser som skjer innen et gitt tidsvindu, over flere dager eller måneder med data. Fokuset i denne analysen var altså på å bruke teknikker for å finne slike mønstre. Dette har blant annet blitt gjort ved hjelp av en algoritme kalt CloseEpi, og faller derfor også inn under metode 4.

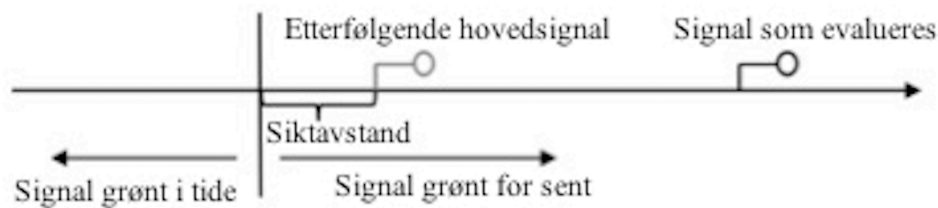
Goverde et al. (2008) fokuserte på identifisering av rutekonflikter ved hjelp av algoritmer og programmering. Dette ble gjort ved å bruke data fra ulike kilder til å programmere TNV-Conflict. TNV-Conflict identifiserer signalerte rutekonflikter, tog

i konflikt med hverandre, og kritiske strekninger. Dataene som har vært nødvendig for å gjøre dette kommer fra henholdsvis data om infrastruktur (inkludert blokk lengder), ruteplaner, liste over tognummer, lengder på strekninger og signal-kilometrer (for visualisering). Resultatet fra programmet ble brukt til å analysere antallet rutekonflikter, og deres effekt på kapasitetsutnyttelsen og punktligheten. Dette har gjort det mulig å estimere følgeforsinkelsene til tog som kommer i konflikt. Metoden er objekt-basert, og kan brukes videre til sanntidstogledning.

I figur 13 og 14 er det illustrert hvordan forsinkelser ble registrert og identifisert i Labermeier (2013) sin analyse. I denne analysen var målet å se på effekten av punktlighet i forhold til fordeling og størrelse på primær- og sekundærforsinkelser. Dette er et eksempel på en analyse som benytter seg av metode 5. Signalpunktene ble brukt som målepunkter, og bidro til å skille mellom primær- og sekundærforsinkelsene. Dette ble gjort for henholdsvis stasjoner og strekninger.



Figur 13: Identifisering av forsinkelser på stasjon (Labermeier, 2013)



Figur 14: Identifisering av forsinkelser på strekning (Labermeier, 2013)

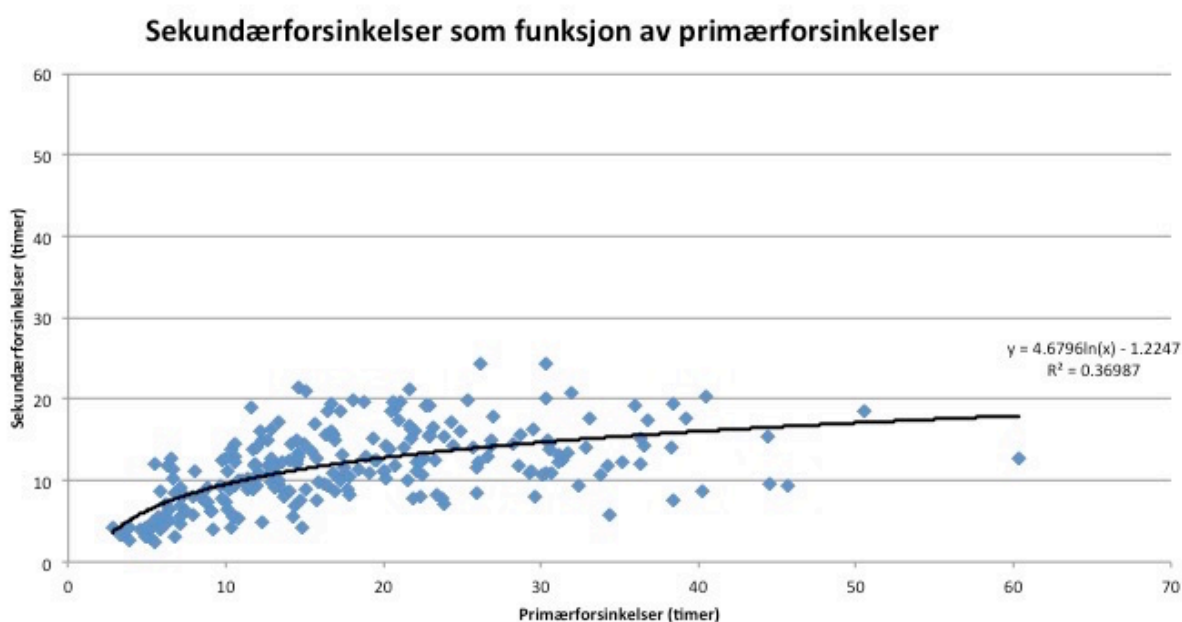
Etter at forsinkelsene ble definert og kunne identifiseres ble det brukt forsinkelsesdata fra 192 ukedager mellom 16. desember 2010 og 26. februar 2012. Det ble inkludert så mange dager med dårlig punktlighet som mulig. Totalt ble 32 millioner strekninger og 13,6 millioner stasjoner analysert. Forsinkelser over 10 minutter ble definert som statistiske avvik og fjernet, fordi det er diskutabelt om slike forsinkelser kan kategoriseres riktig til primær- eller sekundærårsaker. I henhold til definisjonene ble forsinkelsene plottet mot nettverkspunktlighet, tid på dagen og forsinkelsesstatus på henholdsvis stasjon og strekning.

Et annet eksempel på metode 5 er analysen til Milinkovic et al. (2013). Her ble det analysert data for alle passasjertog og alle retninger i perioden fra januar 2010 til august 2012. Det vil si at 60 000 tog ble analysert. Forsinkelsene ble plottet opp mot tid på dagen, der det ble funnet store variasjoner. I forhold til daglig eller månedlig basis var det små variasjoner. For å se på mulige kilder til sekundærforsinkelser ble ulike togruter sammenliknet i forhold til distanse, forsinkelse og startpunkt. Dette viste varierende ankomstforsinkelser i nettverket, og kan skyldes rutekonflikter eller sekundærårsaker. Til slutt ble det også laget skatterplott for forsinkelsene i forhold til retning.

ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER GJENNOMFØRT I NORGE

Det er gjort få analyser på følgeforsinkelser i Norge som er basert på sanntidsdata, og havner i kategori 4 eller 5 for tematikk. Det er 4 analyser som er aktuelle å nevne i denne oppgaven.

Den første analysen undersøkte sammenhengen mellom primær- og sekundærforsinkelser i perioden 1. januar til 31. august 2013 (NSB, 2013b). Ved å bruke metode 5, ble det plottet antallet timer kategorisert som sekundærforsinkelser langs y-aksen, og langs x-aksen ble det samme gjort for primærforsinkelser. Dette ga det bildet som er vist i figur 15 nedenfor.



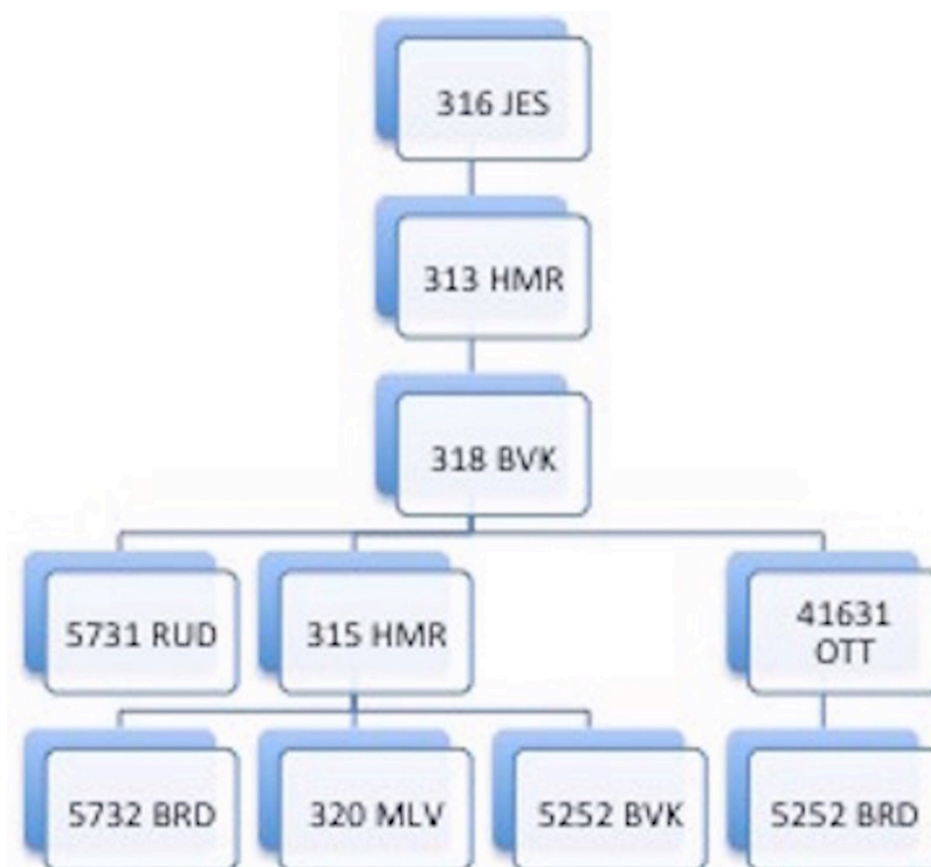
Figur 15: Sekundærforsinkelser som funksjon av primærforsinkelser (NSB, 2013b)

Dette dannet et bilde på at ved store primærforsinkelser ligger sekundærforsinkelsene på et noe stabilt nivå. Dette kan skyldes at store primærforsinkelser fører til omberamning eller kansellering av tog, og derav påvirker andre tog mindre. Med

mindre primærforsinkelser er situasjonen annerledes, da det fører til større sekundærforsinkelser.

Fokus i den andre analysen til NSB var å finne den primære årsaken til forsinkelsen (NSB, 2013a). Excel ble brukt for å spore forsinkelser registrert som årsakskode 7. Dette fører til et ”mange-til-mange” -forhold der analysen må gjennomføres i mange ledd. I dette tilfellet ble forsinkelsene analysert 6 ledd bakover ved å se på togene som hadde registrert et forårsakende tog. Der det var mulig ble den primære forsinkelsen til hvert ledd knyttet til årsakskodene. Dette ga et bilde på hvor stor andel av følgeforsinkelsene de ulike årsakskodene står for. Av totalt 20853 årsaker med kode 7 ble det funnet primærårsak for 43 %.

Sørensen (2013) analyserte Dovrebanen (Eidsvoll – Trondheim), for å se på følgeforsinkelser som oppstod i utvalgte uker med saktekjøring. Målet her var å se på effekten av saktekjøringer på følgeforsinkelser. Ved hjelp av en metodikk som ligger nær metode 5 ble spredningstrær konstruert. Dette er vist i figur 16 nedenfor.



Figur 16: Spredningstre (Sørensen, 2013)

Den siste analysen er gjennomført av Sørensen et al. (2013). Denne analysen inneholder elementer av metode 1 og 5, men er i størst grad et eksempel på metode 4. Artikkelen er upublisert, men beskriver en algoritme for å analysere sanntidsdata for forsinkelsesspredning på enkeltspor. Fokus i denne analysen var å bruke kvantitative metoder for å finne og forklare forsinkelsesspredning. Dette har tidligere vært vanlig å vurdere kvalitativt. Algoritmen ble beskrevet, og implementert gjennom case-studier med data fra Jernbaneverket. Algoritmen detekterer og kvantifiserer hvordan forsinkelser sprer seg fra et tog til et annet i kryssingspunkt på enkeltspor. Dette gjøres med data på sekundbasis fra sporfelt. Data ble analysert på strekningen Kongsvinger – Lillestrøm i perioden 04.02.13-10.02.13. Prototypen demonstrerte at det er mulig med kvantitative sanntidsanalyser av ytelsesparametere som for eksempel punktlighet. Analysen ga resultater i form av å identifisere de mest sårbare stasjonene og togene på strekningen. I tillegg så analysen på forholdet mellom kilden til forsinkelsen og forsinkelsen, ved å regne ut en kilde-forsinkelsesratio. Det samme ble gjort for forholdet mellom følgeforsinkelse og forsinkelse for hvert tog. Dette ga utgangspunkt for å regne ut en følgeforsinkelse-forsinkelsesratio. Parameterne gir henholdsvis andel av forsinkelser på en stasjon som starter en følgeforsinkelse, og andel forsinkelser på en stasjon som kan forklares med følgeforsinkelser.

FORDELER/ULEMPER MED ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

I dette avsnittet er det oppsummert fordeler og ulemper ved empiriske analyser av følgeforsinkelser. Dette er delt inn etter de 5 metodene som ble beskrevet tidligere. Enkelte av fordelene og ulempene refererer også til resultater som ble funnet i litteraturstudien til Yuan (2006). Resultatene er oppsummert i tabell 3-7.

Tabell 3: Fordeler/ulempes med regresjonsanalyse m/flere variabler

METODE 1: REGRESJONSANALYSE M/ FLERE VARIABLER	
FORDELER	ULEMPER
<ul style="list-style-type: none"> + Muliggjør beregning av parametere som beskriver jernbanenettverket gjennom data fra ruteplaner, togegenskaper, forsinkelser og infrastruktur + Identifisering av svakheter i nettverket + Kan finne årsak-virkningsforhold for forsinkelser + Eksplisitt tilnærming som reflekterer påvirkningen av flere faktorer på forsinkelser og punktlighet 	<ul style="list-style-type: none"> – Regresjonsanalyse kan ignorere viktige faktorer som påvirker forsinkelser – Kan indikere sterk korrelasjon der det i virkeligheten ikke er det – Empirisk regresjonsanalyse alene kan ikke gi kvantitative prediksjoner

Tabell 3 viser at det er mange fordeler med å analysere følgeforsinkelser ved hjelp av regresjonsanalyse med flere variabler. Rent vitenskapelig er det svært ønskelig å identifisere årsak-virkningsforhold, og for jernbanedriften kan dette være gunstig eksempelvis for å forbedre årsakskoderegistreringen. En av de største ulempene med denne metoden er dessverre akkurat disse årsaks-virkningsforholdene. Som ved andre regresjonsanalyser er det ikke gitt at korrelasjonen som blir identifisert virkelig er så

stor. Noe av årsaken er blant annet at regresjonsanalyser kan ignorere viktige faktorer som påvirker forsinkelser.

Tabell 4: Fordeler/ulempes med sanns.fordeling for forsinkelser

METODE 2: SANNS.FORDELING FOR FORSINKELSER	
FORDELER	ULEMPER
<ul style="list-style-type: none"> + En negativ eksponentialfunksjon er ofte regnet som validert for tidsavstander og forsinkelser + Muliggjør identifisering av sårbare punkter i nettverket, gjennom fordeling i tid og sted 	<ul style="list-style-type: none"> – Vanskelig å finne en fordeling som gjelder overalt – Manglende evaluering av tidligere fordelinger som er benyttet – Begrenset evaluering vha. empiriske data på de statistiske slutninger som er gjort

Bruk av sannsynlighetsfordelinger har en del ulemper, som vist i tabell 4. De fleste er knyttet til manglende evaluering og validering av de statistiske slutninger og fordelinger som har blitt brukt tidligere. En sannsynlighetsfordeling som derimot er regnet som godkjent er den negative eksponentialfunksjonen, som i mange tilfeller etterligner den virkelige oppførselen til tidsavstander og forsinkelser på en tilfredsstillende måte.

Tabell 5: Fordeler/ulempes med sanns.modeller for spredning av forsinkelser

METODE 3: SANNS.MODELLER FOR SPREDNING AV FORSINKELSER	
FORDELER	ULEMPER
<ul style="list-style-type: none"> + Indikerer påvirkningen av ulike faktorer på spredningen av forsinkelser + Gir en prediksjon på følgeforsinkelser og deres påvirkning på punktligheten 	<ul style="list-style-type: none"> – Tar lite hensyn til dynamikken i forsinkelsene, og eventuell omberamning av tog gjort av togledelsen. – Tar lite hensyn til tapt tid ved akselerasjon/retardasjon, og spredningen av forsinkelser fra kryssingspunkt/flaskehalsen.

Tabell 5 viser fordelene og ulempene med sannsynlighetsmodellering for spredningen til forsinkelser. Dette er gunstig for å se på hvordan ulike faktorer kan påvirke eventuell spredning, og kan gi estimater på den virkelige oppførselen. Om disse estimatene er gode er ikke alltid gitt, ettersom dynamikken i forsinkelser, og omberamning av tog ofte ikke inkluderes.

Tabell 6: Fordeler/ulempes med identifisering av mønstre vha. algoritmer

METODE 4: IDENTIFISERING AV MØNSTRE VHA. ALGORITMER	
FORDELER	ULEMPER
<ul style="list-style-type: none"> + Nyttig verktøy for å finne eventuelle mønstre i nettverket. + Muliggjør identifisering av rutekonflikter ved hjelp av data fra togledelsen + Identifisering av systematiske avhengigheter mellom forsinkelser som går igjen over tid + Kan bidra til å luke ut sårbarheter og problemer i eksempelvis ruteplanene. 	<ul style="list-style-type: none"> – Enkelte algoritmer har store rom for forbedringer, ofte med hensyn til innsamling av data – Algoritmene er begrenset av analysenes omfang/hensikt, og er ikke nødvendigvis brukbare i andre tilfeller.

Metode 4 identifiserer forsinkelsesmønstre vha. algoritmer. Dette kan være fordelaktig for å finne rutekonflikter ut fra de ruteplaner som er planlagt, og kan identifisere systematiske avhengigheter som går igjen over tid. Dette er derimot avhengig av den algoritmen som blir implementert, og de betingelser denne er basert på. Det er velkjent at dersom dataene som mates inn er dårlige vil også resultatene være dårlige. Resultatene kan også være begrenset til av omfanget og hensikten til analysen som gjennomføres, og garanterer ikke resultater som er brukbare i andre tilfeller. Tabell 6 oppsummerer dette.

Tabell 7: Fordeler/ulemper med identifisering av sammenhenger vha. grafer

METODE 5: IDENTIFISERING AV SAMMENHENGER VHA. GRAFER	
FORDELER	ULEMPER
<ul style="list-style-type: none"> + Mulig å skille mellom primær- og sekundærforsinkelser + ”Enkle” å gjennomføre vha raske verktøy for bearbeiding av data. Eksempelvis Excel eller R. + Muliggjør estimering av effekten av følgeforsinkelser vha andre metoder 	<ul style="list-style-type: none"> – Begrenset i form av kompleksitet på datasett, og størrelse på analysene som kan gjennomføres. – Begrensete tolkningsmuligheter i verktøyene som benyttes. Krever kunnskap og antagelser om forsinkelsers oppførsel.

Tabell 7 oppsummerer fordeler og ulemper med identifisering av forsinkelsessammenhenger vha. grafer. Metoden er enkel fordi det er mulig å bruke raske verktøy for å bearbeide data. Det er også enkelt å visualisere resultatene. Dette kan gjøre den kvalitative tolkningen lettere. Dette kan også være en ulempe fordi tolkningen er avhengig av kunnskap og fornuftige antagelser om forsinkelsers oppførsel. Metoden er også avhengig av mindre datasett, ettersom det kan være tungt å bearbeide store mengder data.

DEL 3

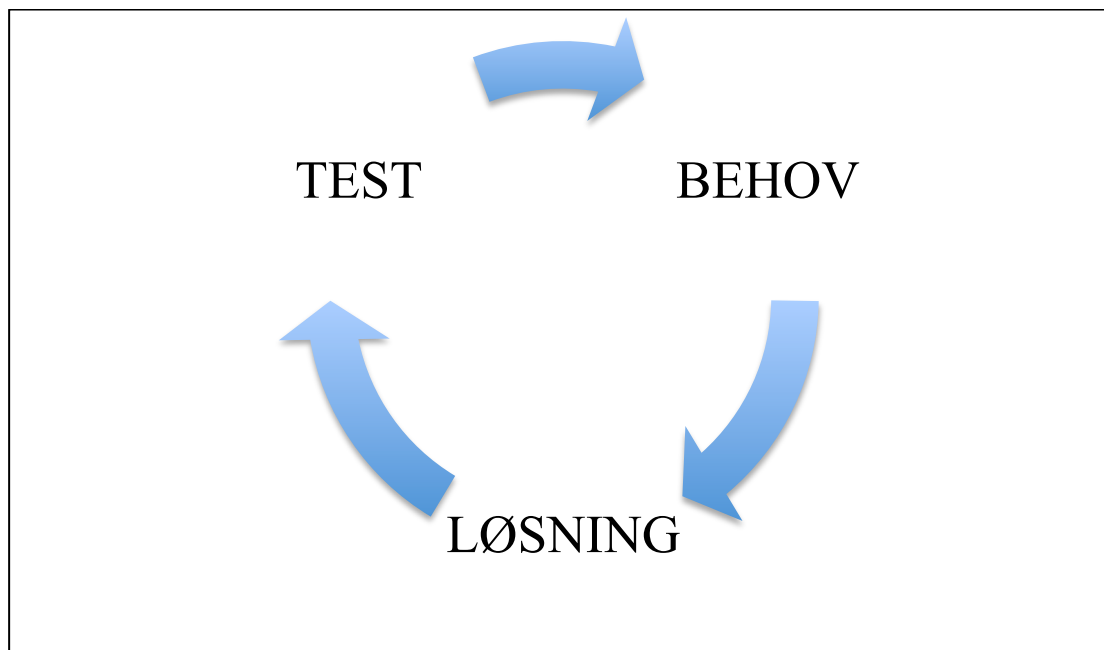
CASE-STUDIE: FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN

NORSKE VERKTØY FOR EMPIRISKE ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

Det er gjennom prosjektene PUSAM og PRESIS blitt utviklet flere prototyper av analyseverktøy som baserer seg på driftsdata fra togsektoren i Norge (Landmark, 2014). Verktøyene er utviklet ved SINTEF, og er utviklet til prototypstadiet for å utforske og illustrere muligheter.

I dette avsnittet beskrives noen av disse verktøyene, og deres bruksområder og datagrunnlag. Alle verktøyene kan bidra til å øke forståelsen av hvordan forsinkelser oppfører seg i det norske jernbanenettverket, men har ulike egenskaper og begrensninger. Det er viktig å påpeke at det gjenstår mye viktig arbeid med brukergrensesnitt, kvalitetssikring og implementering i et miljø som kan sørge for drift og vedlikehold.

Idéen om hvordan verktøyene skal utvikles er basert på en syklisk tilnærming gjennom 3 faser, nemlig behov, løsning og testing (illustrert i figur 17 nedenfor):



Figur 17: Tilnærming til utvikling av verktøy

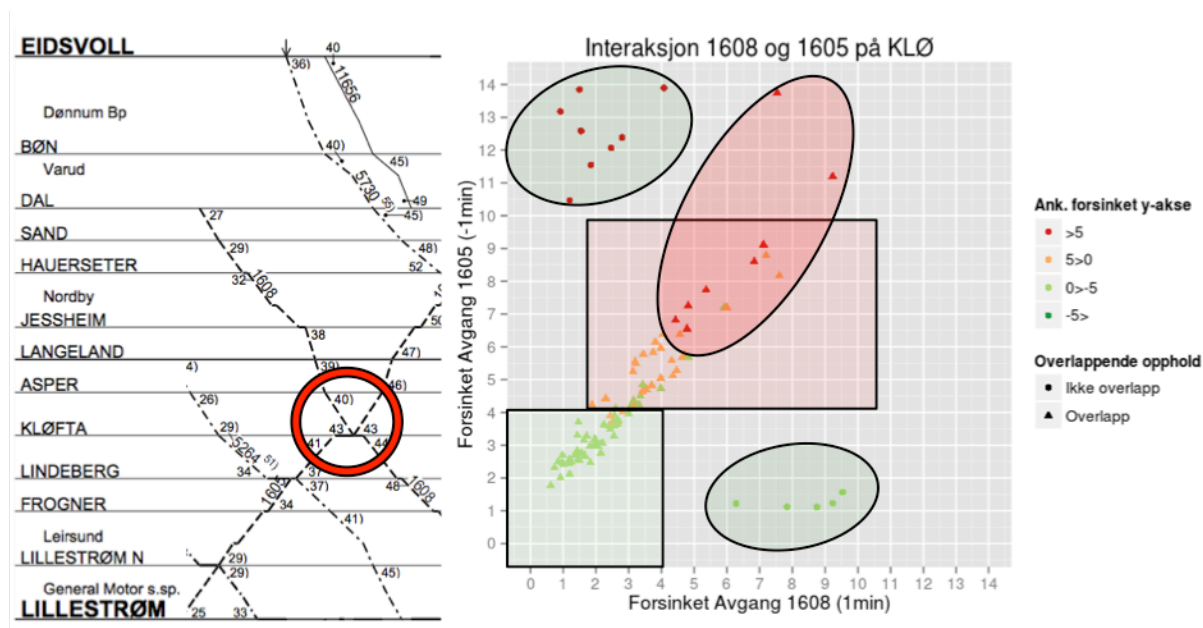
Som forskningsmetodikk er dette et virkemiddel for å fremskaffe løsninger på behov, men også et virkemiddel for å utfordre og bringe behovsbildet videre ved å vise frem muligheter utenfor dagens systemer (Landmark, 2014).

Ved å bruke verktøyene kan det bli gjennomført en analyse av følgeforsinkelser fra kryssinger på enkeltspor. Bruk av verktøyene kan også bidra til å forbedre brukergrensesnittet og kvalitetssikringen. I tillegg kan dette kobles opp mot årsakskoderegistreringen som gjøres av Jernbaneverket. Dette utgjør en stor del av målsetningen og hensikten med denne masteroppgaven, og utfyller også den sykliske tilnærmingen til utvikling av verktøyene.

Kryssingsinteraksjon

Kryssingsinteraksjon er et viktig verktøy for å se på korrelasjon mellom togpar. Det er derfor et verktøy knyttet opp mot metode 1 og 5. Verktøyet bruker regresjonsanalyse med flere variabler for å se på korrelasjon mellom to tog som krysser, samtidig som sammenhengen blir analysert vha. plotting i en graf. Togparene velges ut fra en automatisk generert liste over kryssinger. Det vil si to tog som har overlappende opphold (kryssing) på en valgt stasjon.

Grafen viser en fargekodet korrelasjon mellom togene innenfor en angitt tidsluke, der fargen illustrerer forsinkelse (i 5-minuttsklasser) og symbolet på punktet illustrerer om togene faktisk krysset på stasjonen eller ikke. Verktøyet kan i første omgang brukes for å tidlig diagnostisere presisjonen i kryssinger, og se på hvilket tog som forsinkes hvilket i et togpar. Kryssingsinteraksjon kan bli brukt for å gå nærmere i detalj dersom eksempelvis de samme togparene forsinkes hverandre gjentatte ganger over tid. Dette kan igjen kobles til årsakskoderegistreringen, og brukergrensesnitt/kvalitetssikring av KryssForsink. I figur 18 er det illustrert hvordan Kryssingsinteraksjon identifiserer kryssing på stasjon Kløfta, mellom tognummer 1608 og 1605, på strekningen Eidsvoll-Lillestrøm.

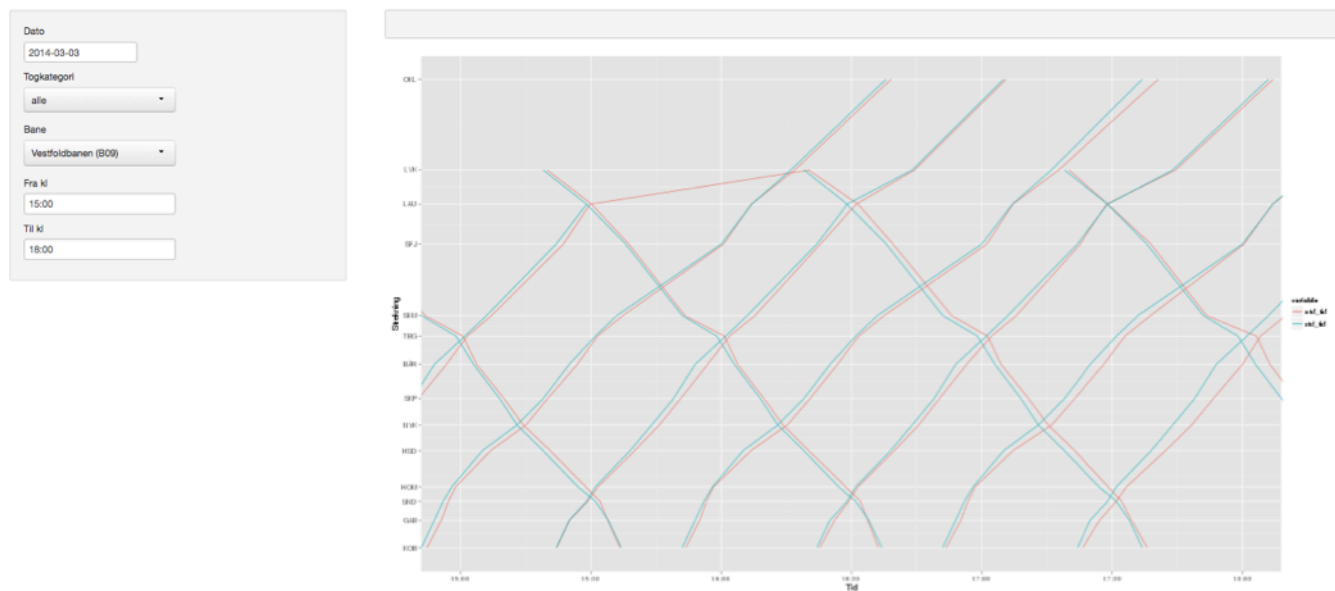


Figur 18: Kryssinginteraksjon - Kløfta stasjon (Landmark, 2014)

TogGraf

TogGraf er et støtteverktøy som viser toggrafen for en angitt banestrekning. I dette tilfellet vises togene som trafikkerte Vestfoldbanen den 3.mars 2014 mellom klokken 15:00 og 18:00 (figur 19). TogGraf-verktøyet gjør det mulig å se faktisk avgangstid (ATD – Actual Time of Departure), planlagt avgangstid (STD – Scheduled Time of Departure), og togenes bevegelse i tid og sted. I denne oppgaven kan verktøyet bli brukt til å identifisere kryssingspunkter og eventuelle flaskehals, der følgeforsinkelser kan oppstå. TogGraf viser også hvor store avvik det er mellom planlagt og faktisk tid for avgang, og kan derfor også indikere forsinkelser.

PRESIS-TogGraf



Figur 19: PREIS-TogGraf

Rutefinner

Rutefinner finner alle stasjonene som et, eller flere, tog trafikkerte en gitt dato. Det er derfor et nyttig verktøy for å undersøke eventuelle kryssingspunkter eller flaskehalsder tog vil kunne være i konflikt med andre tog. Dette kan være nyttig for å analysere data for følgeforsinkelser. Figur 20 viser hvordan Rutefinner kan benyttes.

Rutefinner

Tognummer:

Dato (År-m-d)

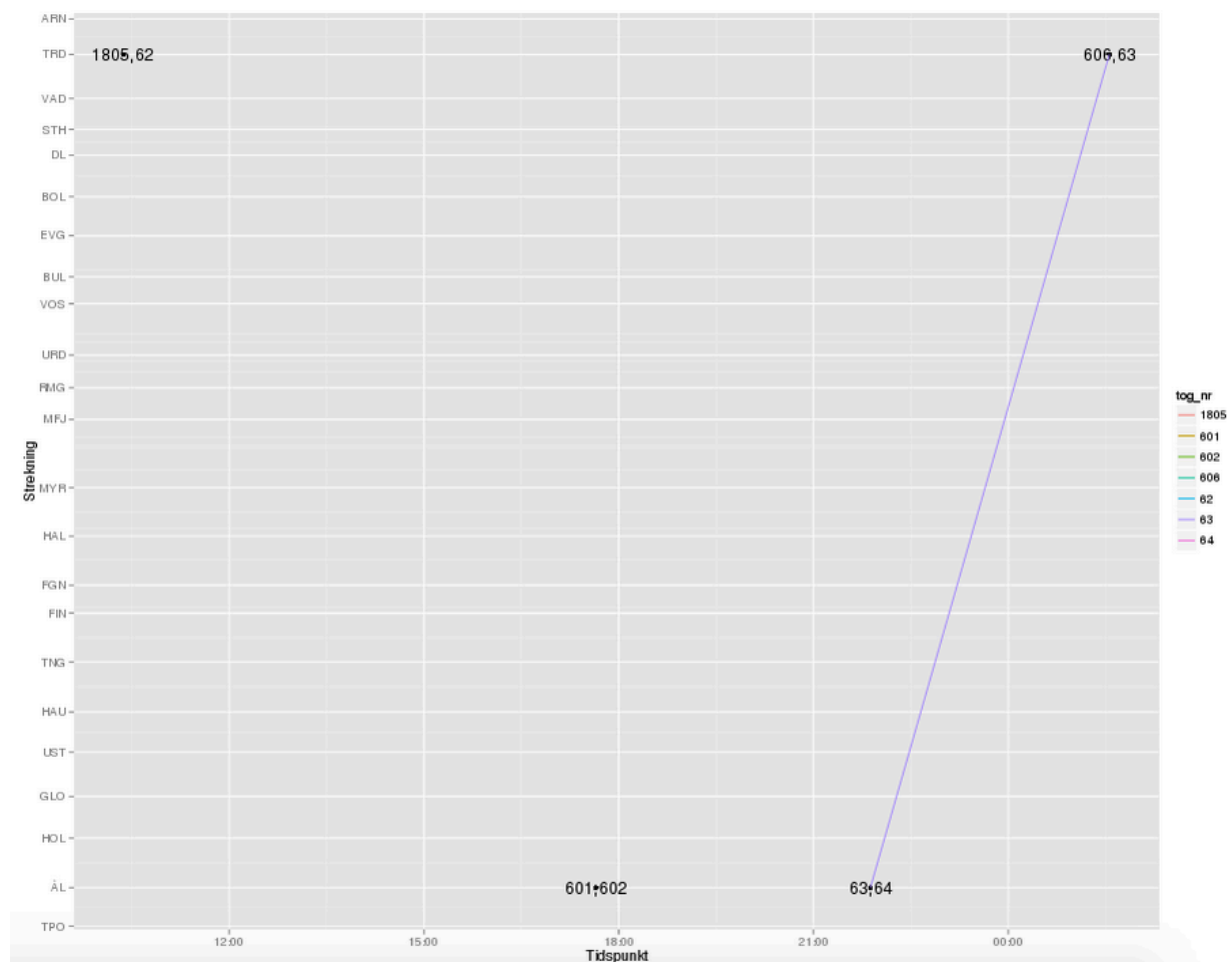
Filtrer ut manglende sideregistreringer

OSL,HLR,LLS,KLB,LAL,GAR,BKH,EVV,VEN,EVL,MSU,MOR,SLY,EPA,TAN,MOL,STE,SRI,STG,OTT,HMR,JES,BRD,RUD,MLV,BVK,BUM,BGG,LHM,HVE,FÅB,HSS,HAF,ØYE,TRE,LOS,FÅV,KVI,RBU,HUN,FRN,VZN,KVA,SJO,OTA,SEL,BRH,DOV,DOM,FOK,VÅL,HJN,KVL,DRS,OPD,FGH,UBG,BÅK,GAL,SOL,STB,HØI,LMO,LER,KVÅ,SØB,MSK,MEL,NYP,HØ,SLB,SVN,MBG,SKS,TND

Figur 20: Rutefinner

KryssForsink

KryssForsink gir mulighet for å identifisere togpar som har forsinket kryssing på stasjoner der de etter ruteplanen skal krysse ved en gitt tid. Dette blir illustrert i en toggraf, som viser togenes bevegelse i tid og sted (stasjon for stasjon). Dersom et togpar har forsinket kryssing vil det markeres et punkt i toggrafen på den stasjonen der togene krysset for sent. Dette er vist i figur 21, der togparet 601 og 602 har forsinket kryssing på ÅL stasjon på Bergensbanen. Her vises også det omtrentlige tidspunktet for når kryssingen skjedde, altså like før klokka 18:00. Et liknende punkt kan ses for togparet 1805 og 62 på TRD stasjon.

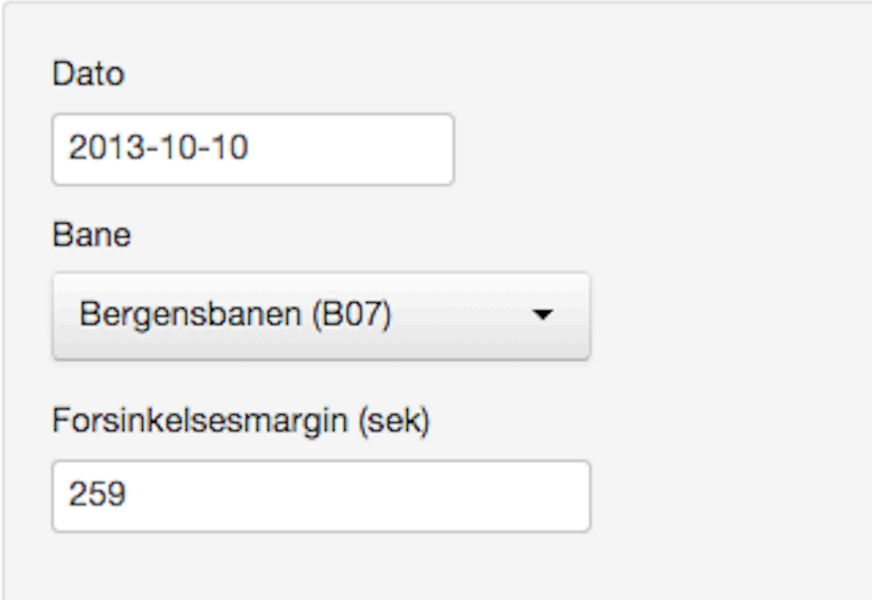


Figur 21: KryssForsink

Mye av poenget med KryssForsink er at dersom det samme toget har forsinket kryssing ved en annen stasjon vil det markeres en linje mellom disse to punktene (stasjonene). Dette indikerer at dette toget kan være en kilde til, eller mottaker av følgeforsinkelser. Det er disse togene/stasjonene som er av spesiell interesse for en analyse av følgeforsinkelser. En slik kobling mellom to togpar er også vist i figur 21. Først observerer vi en forsinket kryssing mellom togparene 63 og 64 på ÅL stasjon omtrent klokka 22:00. Deretter observerer vi at tog 63 også er involvert i en forsinket kryssing med tog 606 på TRD stasjon etter midnatt. Tog 63 har altså hatt forsinket kryssing på begge stasjonene.

Ved å velge en gitt margin for hvor stor forsinkelse vi ”aksepterer” vil det variere hvor mange slike togpar som vises i grafen. Hva slags input som er mulig å bruke er illustrert i figur 22:

KryssForsink

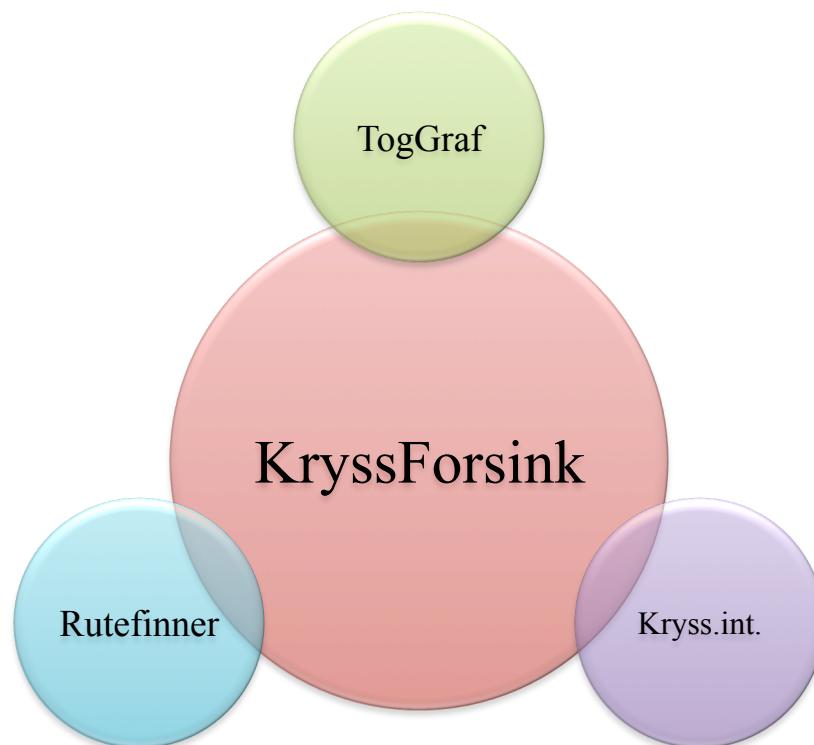


The image shows a web form titled "KryssForsink" with three input fields. The first field is labeled "Dato" and contains the text "2013-10-10". The second field is labeled "Bane" and is a dropdown menu showing "Bergensbanen (B07)". The third field is labeled "Forsinkelsesmargin (sek)" and contains the number "259".

Figur 22: KryssForsink - input

ANALYSE AV FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13)

I dette avsnittet blir det presentert en analyse som er gjennomført ved å bruke de verktøyene i forrige avsnitt. Omfanget til masteroppgaven gjorde at det ble valgt å bruke noen av verktøyene som støtteverktøy opp mot KryssForsink. Det er KryssForsink som blir etterprøvd, testet og kvalitetssikret. Hensikten er å illustrere muligheter med å analysere følgeforsinkelser, og danner et grunnlag for å foreslå forbedringer og eventuelle tilpasninger. Bruk av verktøyene i analysen er illustrert i figur 23.



Figur 23: Etterprøving, testing og kvalitetssikring av KryssForsink

Analysen kan beskrives som en egen prosess, og kan bli delt inn i følgende nivåer:

Nivå 0: Definisjon og identifisering av følgeforsinkelser på enkeltspor

Nivå 1: Valg av hensiktsmessig strekning og periode for analysering av data

Nivå 2: Innsamling av data

Nivå 3: Bruk av støtteverktøy og KryssForsink med den hensikt å identifisere følgeforsinkelser som oppstår fra kryssinger på stasjon.

Nivå 4: Sammenstille resultater, og knytte opp mot årsakskoderegistreringen

Analysen kan kategoriseres under de identifiserte metodene for å analysere følgeforsinkelser. Definerings og identifisering av følgeforsinkelsene på enkeltspor gjøres ved hjelp av KryssForsink. Dette programmet er basert på en algoritme, og blir derfor kategorisert som metode 4. Sammenstilling og evaluering av resultatene er eksempel på bruk av metode 5. Ved bruk av støtteverktøyet Kryssingsinteraksjon er det derimot metode 1 som blir brukt for å se på korrelasjon mellom togpar. Tematikken i analysen er av kategori 4, der det analyseres følgeforsinkelser basert på sanntidsdata.

Definisjon og identifisering av følgeforsinkelser på enkeltspor

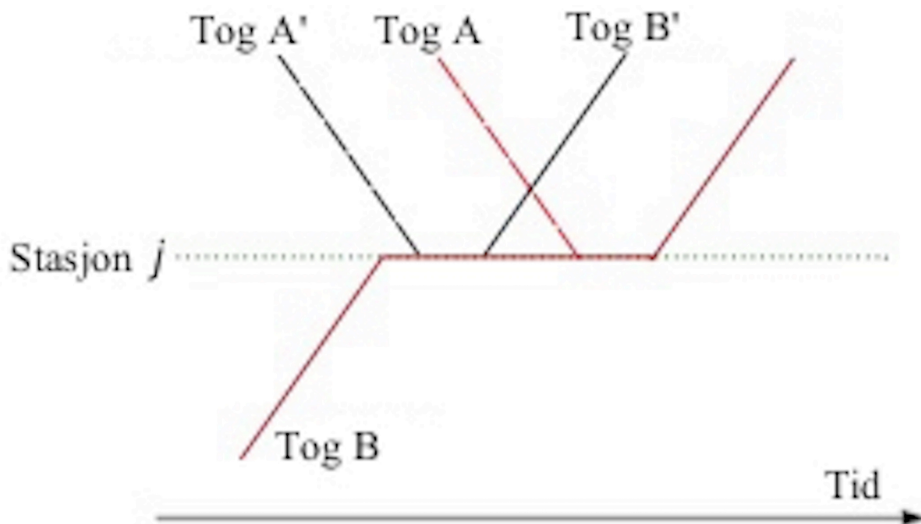
Ved å studere toggrafer er det mulig å finne sammenhenger og mønstre mellom tog som krysser hverandre (Sørensen et al., 2013). Det er dette som KryssForsink, sammen med støtteverktøyene, muliggjør. Observasjoner av når et tog forårsaker forsinkelser til et annet tog gir en basis for å definere noen betingelser som må oppfylles for at en slik forsinkelse skal oppstå. De følgende betingelsene beskriver situasjonen når et tog A forårsaker en følgeforsinkelse til et tog B ved en tilfeldig stasjon j på en enkeltsporet strekning. Kombinasjoner av disse betingelsene må oppfylles for at KryssForsink registrerer en forsinket kryssing på stasjon:

Betingelse 1. Tog A ankommer stasjon j med en forsinkelse større enn x sekunder, der x defineres av den som gjennomfører analysen. Det er naturlig at x er større enn 0, altså at det er en forsinkelse, selv om en tidlig ankomst også kan forårsake følgeforsinkelser f. eks ved at kryssing flyttes til en annen stasjon.

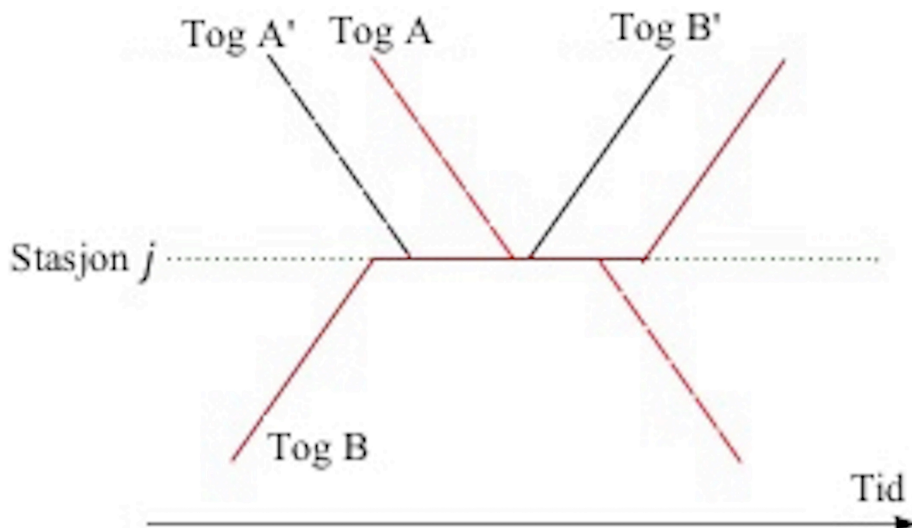
Betingelse 2. Tog A krysser med tog B på stasjon j . Det vil si at tog A og tog B har overlappende tid på stasjonen. Siden tog A er kilden til forsinkelsen, ankommer tog A mellom faktisk ankomsttid og faktisk avgangtid til tog B. Dette ”sikrer” at tog B må være på stasjonen når kryssingen skal skje, og må vente på tog A. Denne betingelsen er grunnlaget for de neste to betingelsene, som beskriver hvordan kryssingen skjer (også illustrert i figur 24 og 25, der A’ er planlagt ankomst for tog A, og B’ er planlagt avgang for tog B)

2a Forsinkelsesbetingelsen er at tog A ankommer i tidsrommet mellom planlagt og faktisk avgang til tog B, uavhengig av avgangen til tog A.

2b Tog A har avgang i tidsrommet mellom planlagt og faktisk avgang til tog B.



Figur 24: Forsinkelsesbetingelse 2a (Sørensen et al., 2013)



Figur 25: Forsinkelsesbetingelse 2b (Sørensen et al., 2013)

Betingelse 3. Den siste betingelsen er at tog B er forsinket med mer enn x sekunder ved avgang fra stasjon j

Disse 3 betingelsene beskriver altså kravene for at en følgeforsinkelse skal oppstå på en enkeltsporet strekning.

Betingelse 1 + 2a + 3 beskriver hvordan tog A forsinket tog B på grunn av for sen ankomst på stasjonen. Hvis tog A ankommer etter planlagt avgang for tog B, må tog B vente til tog A har ankommet, men er uavhengig av avgangen til tog A.

Betingelse 1 + 2b + 3 beskriver hvordan tog A ankommer før tog B er planlagt å kjøre, men fordi tog A har forsinket avgang blir også tog B forsinket. Passasjerforbindelser eller avgangsrekkefølge fra stasjonen kan være årsaker til et slikt tilfelle. I mange tilfeller kan avgangsrekkefølgen bare endres, siden togene generelt ikke er avhengig av hverandre når begge har ankommet stasjonen (på enkeltspor). Når det er mulig vil et slikt bytte kunne forhindre mindre følgeforsinkelser. Siden tog A ankommer før planlagt avgang til tog B vil disse betingelsene kun identifisere mindre følgeforsinkelser.

For betingelsene 1 + 2a + 3 er det verdt å merke seg at dersom tog B allerede er forsinket med mer enn den planlagte ventetiden på stasjonen, så vil ikke betingelse 2a garantere at tog B blir ytterligere forsinket. Derfor kan tilleggsforsinkelsen bli negativ. For å forhindre dette er det mulig å legge til i betingelse 3 at tilleggsforsinkelsen til tog B må være større enn 0 (eller en annen verdi). Det er likevel slik at tog B ankommer stasjonen før tog A, og må vente på tog A sin ankomst. Tog B blir uansett mer forsinket enn om tog A var på tiden, og tog A påvirker derfor tog B. Derfor inkluderes ingen tilleggsbetingelser for ytterlige forsinkelser på tog B.

Valg av strekning og periode

Bakgrunnen for denne analysen av følgeforsinkelser, er saktekjøringer som er registrert fra 2005-2014. Målet med å se på disse er å identifisere følgeforsinkelser som oppstår fra kryssinger på en utvalgt strekning. Grunnet store datamengder er det valgt ut å se nærmere på perioden våren 2013 (mars, april, mai). Denne perioden var det spesielt mye saktekjøringer registrert. Det var derfor hensiktsmessig å velge denne perioden for å ha et solid, men håndterbart datagrunnlag.

Strekningen er valgt ut med bakgrunn i anbefalinger fra SINTEF, og fordi den antas å være gunstig å få en bedre forståelse av. Strekningen har lokaltrafikk som skal inn på travlere dobbeltspor på en stor knutepunktstasjon (Lillestrøm). Dette er spesielt interessant å se nærmere på sett i lys av den nye InterCity-utbyggingen.

Strekningen som skal analyseres går fra Lillestrøm til Kongsvinger. Første del er Hovedbanen fra Oslo til Lillestrøm, delen fra Lillestrøm fram til Charlottenberg er kjent som Kongsvingerbanen, og den resterende strekningen fram til grensen er kjent som Grensebanen. Den valgte strekningen utgjør altså mesteparten av Kongsvingerbanen. Delstrekningen som skal bli analysert er på rundt 80 km med enkeltsporet jernbaneinfrastruktur, fra km 20,95 til km 100,28 (fra Oslo S). Dette inkluderer følgende stasjoner:

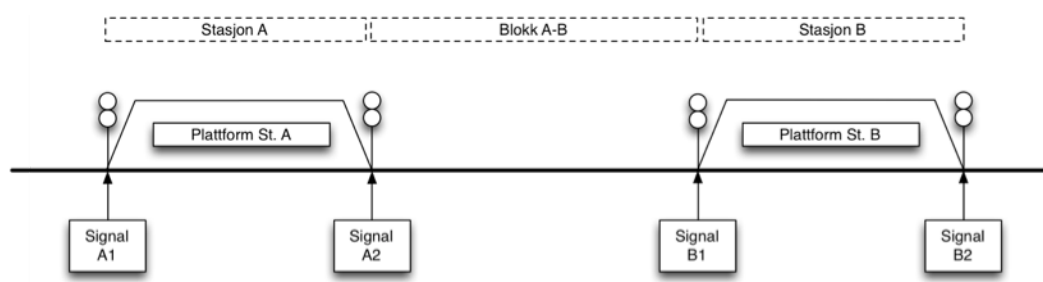
Lillestrøm (LLS) – Fetsund (FET) – Roven (RVN) – Sørumsand (SØR) – Blaker (BLK) – Rånåsfoss (RFS) – Haga (HAG) – Årnes (ÅRN) – Seterstøa (SET) – Disenå (DIS) – Skarnes (SKA) – Sander (SAN) – Galterud (GLT) – Kongsvinger (KVG)

Kongsvingerbanen hadde i denne perioden en punktlighet på 88, 83 og 72 % for henholdsvis mars, april og mai 2013. Gjennomsnittspunktligheten for Kongsvingerbanen var på 84 % i 2013 (Jernbaneverket, 2014b).

Innsamling av data

De norske verktøyene som er beskrevet baserer seg primært på trafikkdata fra TIOS. Mer spesifikt er det passeringsdata fra sporfelt som brukes. Dette er i all hovedsak hovedinnkjør/-utkjør på stasjoner, samt noen blokkposter. I et idealisert nettverk vil det ikke oppstå avvik som gjør at togene blir forsinket. Dette er derimot urealistisk, og derfor finnes det ulike systemer for avvikshåndtering i Norge. Dersom et tog er forsinket med mer enn 4 minutter skal dette registreres manuelt av togledelsen i Jernbaneverket, sammen med en forsinkelsesårsak. Dette registreres da også i en landsdekkende database som inneholder informasjon om toghendelser, kapasitetsbegrensninger og avvik. Denne databasen kalles TIOS, som står for Trafikkinformasjon og oppfølgingssystem (Sætermo et al., 2006). Systemet er eid og utviklet av Jernbaneverket.

Dataene som kommer til TIOS er automatisk registrert gjennom signalanlegget og sporfeltene som er knyttet til de ulike signalene. Dette kommer fra fjernstyringssystemene VICOS og EBICOS, og målepunktene er illustrert i figur 26. Dette illustrerer også hvordan alle tog overvåkes strekningsvis i Norge (Jernbaneverket, 2013). Selv om TIOS i hovedsak viser punktlighet på minuttnivå, så lagres sekundoppløsning i den underliggende databasen der det er tilgjengelig. Dette er på steder der det er sentralisert togstyring, eller CTC (Landmark, 2014).



Figur 26: Målepunkter inn og ut av stasjon (Landmark, 2014)

Rent skjematisk registreres data i TIOS ved at sporfelt frigis. Det vil si hvis et tog reiser fra Stasjon A til Stasjon B blir en ankomsttid (ATA_TID – Actual Time of Arrival) registrert når toget passerer sporfeltet koblet til signal A1, og en avgangstid (ATD_TID – Actual Time of Departure) blir registrert når sporfeltet koblet til signal A2 passerer. Tilsvarende vil det bli registrert ankomst på stasjon B ved signal B1 og avgang ved signal B2. Gitt at det er mulig å følge det samme toget kan stasjonsoppholdet beregnes som differansen mellom ATD_TID og ATA_TID. Tilsvarende kan kjøretiden for blokken mellom stasjonene beregnes som ATA_TID minus ATD_TID.

I tillegg til TIOS, eksisterer databasen Banedata. Denne inneholder informasjon om hendelser relatert til infrastrukturen. I tillegg inneholder Banedata informasjon om de komponentene som er linket til hendelsen, eksempelvis feil på en sporveksel. En tredje database, BMS (Banemeldingssentralen), inneholder den samme informasjonen, men ikke linken til komponenten. Disse 3 databasene danner et grunnlag for rapportering, punktlighetsoppfølging og årsaksanalyser av driftsforstyrrelser i togtrafikken. Med utgangspunkt i datagrunnlaget til TIOS kan det lages ulike former for rapporter over punktlighet for regioner, togprodukter og strekninger. Derfor er TIOS, Banedata og BMS viktige kilder til data for forsinkelser og hvordan disse oppfører seg i nettverket. Mye av nøkkelen er derfor å undersøke hvordan disse dataene kan struktureres og brukes i analyser av følgeforsinkelser. Infrastrukturdata fra TIOS er allerede koblet opp mot verktøyene som brukes i denne analysen. Derfor er all innsamling av data allerede gjennomført (og gjennomføres fortløpende for hver oppdatering av databasen).

Gjennomføring av analyse

Alle togene som har hatt forsinket kryssing på mer enn en stasjon i KryssForsink blir tatt med i analysen. Det er valgt en forsinkelsesmargin på 239 sekunder, ettersom dette er grensen for punktlighet for lokaltog. For disse togene er det notert dato, den valgte forsinkelsesmargin, omtrentlig tidspunkt for kryssing, hvilket tog de krysset med (togpar), og på hvilken stasjon dette skjedde. Dette gjøres dag for dag ved hjelp av KryssForsink. For å strukturere resultatene fra KryssForsink over flere dager, brukes Microsoft Excel. Et eksempel på hvordan dette er notert i Excel er vedlagt som vedlegg B (s. 125). I vedlegget er et eksempel på hvordan forsinkelsene sprer seg fra en stasjon til en annen, og hvilke togpar som er involvert. Dette gjør det enkelt å få oversikt over forsinkelseskjedene for hver dag. Disse forsinkelseskjedene kan også strekke seg lenger frem i tid eller ut i nettverket enn det som er illustrert i vedlegg B.

De registrerte saktekjøringene i perioden 1. mars 2013 – 31. mai 2013 er tilgjengelig i en egen Excel-tabell. Dette er vedlagt som vedlegg C (s. 127). Filtrering av alle de noterte forsinkelsene opp mot denne tabellen finner de relevante følgeforsinkelsene. Det vil si alle følgeforsinkelser som kan knyttes opp mot den registrerte saktekjøringen. For å rydde dataene ytterligere blir det skilt mellom to typer forsinkelsesspredning:

Forsinkelsestype 1: Forsinkelsen oppstår på stasjon knyttet til saktekjøring, og sprer seg videre

Forsinkelsestype 2: Forsinkelsen oppstår på en annen stasjon, og sprer seg videre via stasjon knyttet til saktekjøring

Etter at dataene er ryddet, er det mulig å konstruere spredningstrær for de største og lengste forsinkelseskjedene for hver opprinnelsesstasjon. Dette er de forsinkelseskjedene som har berørt flest stasjoner og beveget seg lengst i nettverket fra de stasjonene som opprinnelig hadde forsinket kryssing. Spredningstrærne illustrerer grafisk hvordan forsinkelsene sprer seg til og fra stasjoner. Et eksempel på et spredningstre for forsinkelsestype 1 og – type 2 er vedlagt som vedlegg D (s. 129).

Følgende informasjon er illustrert i spredningstrærne:

Sek 1; (Tog nr. 1) STASJON (Tog nr. 2); Sek 2

Der benevningene betyr:

Sek 1– forsinkelse i antall sekunder for tog nr. 1

(Tog nr. 1) – tog nr. 1 som har forsinket kryssing på stasjonen, og har vært forsinket på en tidligere stasjon

STASJON – stasjonen der togene har forsinket kryssing

Sek 2 – forsinkelse i antall sekunder for tog nr. 2

(Tog nr. 2) – tog nr. 2 som har forsinket kryssing på stasjonen

Det er verdt å merke seg at toget som er markert med rødt har vært forsinket på en tidligere stasjon på strekningen. Dette kan også være tog nr. 2 ovenfor. Begge togene som krysser kan altså være forsinket fra før. Stasjoner markert med oransje i spredningstrærne er berørt av saktekjøring.

Spredningstrærne danner bakgrunnen for oppkobling mot årsakskoderegistreringen i TIOS. På den måten undersøkes de forsinkelsesårsakene som er registrert på hvert enkelt tognummer.

Analysen blir gjennomført ved hjelp av KryssForsink, men støtteverktøyene brukes ved behov. Eksempler på bruk av støtteverktøyene er:

- Rutefinner blir brukt hvis det er ønskelig å finne ut hva slags stasjoner et gitt tog trafikkerer en dag det er forsinket.
- Kryssinginteraksjon blir brukt for å identifisere hvilke tog som krysset på stasjonene en gitt dag. Verktøyet bidrar også til å identifisere hvilket tog som forsinket det andre, og størrelsen på forsinkelsen.
- TogGraf-verktøyet blir brukt for å undersøke alle togenes kjørerute og kryssinger på strekningen.

Resultater

Tabell 8 viser saktekjøringer for perioden 01.03.13 – 31.05.13 på strekningen fra Lillestrøm – Kongsvinger.

Tabell 8: Saktekjøring på Kongsvingerbanen (01.03.13-31.05.13)

SAKTEKJØRING PÅ KONGSVINGERBANEN(01.03.13-31.05.13)		
Stasjon	Årsak	Dato
Fetsund (FET) stasjon	Ustabil spor	Hele perioden
Årnes (ÅRN) stasjon	Arbeider i spor	Hele perioden
Sander (SAN) stasjon	Ujevnt spor	F.o.m. 01.04.13
Sørumsand (SØR) stasjon	Ujevnt spor	F.o.m 22.04.13
Fetsund (FET) stasjon	Ujevnt spor	F.o.m 20.05.13

Overordnede observasjoner

Tabell 9: Forsinkelseskjeder på Kongsvingerbanen (01.03.13-31.05.13)

FORSINKELSESKJEDER PÅ KONGSVINGERBANEN(01.03.13-31.05.13)	
Antall forsinkelseskjeder totalt	528
Antall forsinkelseskjeder knyttet til saktekjøring	87
Antall forsinkelseskjeder av forsinkelsestype 1	44
Antall forsinkelseskjeder av forsinkelsestype 2	43

Tabell 9 viser de overordnede observasjonene av forsinkelseskjeder. Det er viktig å påpeke at det totale antall forsinkelseskjeder her inkluderer alle små kjeder der et tog har forsinket kryssing ved mer enn én stasjon, og det markeres linje mellom stasjonene i KryssForsink. I mange tilfeller vil disse små kjedene være del av en større kjede, men det har falt utenfor analysens hensikt å finne alle de lengre kjedene. For forsinkelseskjeder knyttet til saktekjøring er dette derimot gjennomført. Tabell 9 viser at det er jevnt fordelt mellom forsinkelser som opprinnelig sprer seg fra stasjon berørt av saktekjøring (44 av 87 kjeder), og forsinkelser som oppstår på en annen stasjon og sprer seg via stasjoner berørt av saktekjøring (43 av 87 kjeder).

Observasjoner knyttet til forsinkelsestype 1:

Tabell 10: Antall forsinkelseskjeder - Stasjon berørt av saktekjøring

ANTALL FORSINKELSESKJEDER SOM OPPSTOD PÅ EN STASJON BERØRT AV SAKTEKJØRING	
Fetsund (FET) stasjon	19
Årnes (ÅRN) stasjon	13
Sander (SAN) stasjon	6
Sørumsand (SØR) stasjon	6
TOTALT	44

Tabell 10 viser at av de 44 forsinkelseskjedene er det Fetsund (FET) stasjon som har vært opprinnelsen til spredningen av forsinkelser 19 ganger. Deretter følger Årnes (ÅRN) stasjon med 13 forsinkelseskjeder. Sander (SAN) og Sørumsand (SØR) stasjon står for 6 forsinkelseskjeder hver.

Tabell 11: Største forsinkelsesspredning - Stasjon berørt av saktekjøring

STØRSTE FORSINKELSESPREDNING FRA STASJON BERØRT AV SAKTEKJØRING		
Opprinnelig forsinkelse:	Dato	Antall følgeforsinkelser *
Årnes (ÅRN)	31.05.13	16
Fetsund (FET)	28.05.13	15
Sander (SAN)	25.05.13	7
Sørumsand (SØR)	29.04.13	6

* Dette tallet inneholder alle forsinkede kryssinger som kan spores tilbake til stasjonen som opprinnelig hadde forsinket kryssing

Tabell 11 viser de største forsinkelseskjedene som har opprinnelse i en stasjon berørt av saktekjøring. Årnes (ÅRN) stasjon hadde en opprinnelig forsinkelse som førte til 16 forsinkede kryssinger den 31.05.13. En forsinkelse som oppstod på Fetsund (FET)

stasjon påvirket i sin tur 15 kryssinger den 28.05.13. Den 25.05.13 oppstod en forsinkelse på Sander (SAN) stasjon og påvirket 7 kryssinger på strekningen.

Til slutt var det 6 kryssinger som ble påvirket av en opprinnelig forsinkelse på Sørumsand (SØR) stasjon den 29.04.13. Det er verdt å merke seg at de største forsinkelseskjedene har oppstått i slutten av mai måned.

Observasjoner knyttet til forsinkelsestype 2:

Tabell 12: Antall forsinkelseskjeder - Stasjon ikke berørt av saktekjøring

ANTALL FORSINKELSESKJEDER SOM OPPSTOD PÅ STASJON SOM IKKE VAR BERØRT AV SAKTEKJØRING	
Seterstøa (SET)	10
Skarnes (SKA)	7
Rånåsfoss (RFS)	7
Haga (HAG)	6
Roven (RVN)	6
Matrand (MAT)	3
Galterud (GLT)	2
Kongsvinger (KVG)	1
Sørumsand (SØR)	1
TOTALT	43

Tabell 12 viser at da forsinkelsene ikke oppstod på en stasjon som var berørt av saktekjøring er det Seterstøa (SET) som oftest har vært opprinnelsen til spredning av forsinkelser. Denne stasjonen står for 10 av 43 forsinkelseskjeder. Deretter følger Skarnes (SKA) med 7 av 43 forsinkelseskjeder. Sammen med Rånåsfoss (RFS) sine 7 forsinkelseskjeder står disse 3 stasjonene for omtrent 56 % av alle forsinkelseskjedene. Vi kan også observere at 3 forsinkelseskjeder hadde sitt utspring i en stasjon utenfor den valgte delstrekning (Matrand stasjon). Dette illustrerer hvordan den primære årsaken til forsinkelsene kan stamme fra et annet punkt i jernbanenettverket enn den strekningen som analyseres.

Tabell 13: Største forsinkelsesspredning - Stasjon ikke berørt av saktekjøring

STØRSTE FORSINKELSESSPREDNING FRA STASJON SOM IKKE VAR BERØRT AV SAKTEKJØRING				
Opprinnelig forsinkelse	Dato	Antall følgeforsinkelser* totalt	Via stasjon(er) berørt av saktekjøring	Antall følgeforsinkelser* videre
Matrand (MAT)	24.05.13	22	SAN, FET, SØR, FET, SAN	21, 18, 7, 6, 5
Haga (HAG)	31.05.13	19	SAN, SØR, ÅRN, SØR, ÅRN	14, 12, 8, 5, 1
Rånåsfoss (RFS)	23.05.13	14	SØR, FET, SØR	10, 0, 7
Seterstøa (SET)	30.04.13	13	SØR, FET, SØR	5, 0, 2
Skarnes (SKA)	30.05.13	10	SØR, SAN	7, 3
Roven (RVN)	23.05.13	9	SAN, SØR, SØR, SØR, FET	0, 6, 4, 1, 0
Sander (SAN)	25.05.13	7	FET	6
Galterud (GLT)	24.04.13	5	SØR	2
Kongsvinger (KVG)	05.05.13	3	SØR	0
Sørumsand (SØR)	15.03.13	2	FET	1

* Dette tallet inneholder alle forsinkede kryssinger som kan spores tilbake til stasjonen som opprinnelig hadde forsinket kryssing

Tabell 13 viser de største forsinkelseskjedene som har opprinnelse i en stasjon som ikke var berørt av saktekjøring, men spredde seg via en eller flere stasjoner som var berørt av saktekjøring. Den største spredningen av følgeforsinkelser oppstod utenfor det som er den valgte delstrekningen, men spredde seg til Kongsvingerbanen og førte til 22 følgeforsinkelser i kryssinger på stasjon. En observasjon er samsvaret mellom antallet ganger en stasjon har vært kilde til forsinkelsen, og de største forsinkelseskjedene. Seterstøa (SET) stasjon stod for flest forsinkelseskjeder, og har sin største kjede på 13 følgeforsinkelser. Både Haga (HAG), Rånåsfoss (RFS) og Skarnes (SKA) stasjon er også representert med store forsinkelseskjeder. Det eneste unntak er Matrand (MAT) stasjon som har størst forsinkelseskjede, men kun var opprinnelse til 3 forsinkelseskjeder i tabell 12. Det er verdt å merke seg at ofte er det

en stasjon som er berørt av saktekjøring som mottok den opprinnelige forsinkelsen tidlig i kjeden. Sander (SAN) og Sørumsand (SØR) stasjon mottok forsinkelsene først i 8 av de 10 største forsinkelseskjedene. De største spredningene av forsinkelser oppstod i slutten av mai måned, med unntak av følgeforsinkelsene fra Seterstøa (SET) den 30.04.13, og de mindre kjedene fra Galterud (GLT), Kongsvinger (KVG) og Sørumsand (SØR).

Tabell 14: Forsinkede kryssinger per tognr. for de største forsinkelseskjedene

Antall forsinkede kryssinger per tognnummer	
Tognr.	Antall forsinkede kryssinger
52	11
56	3
57	12
59	8
1003	8
1004	1
1005	12
1006	7
1007	7
1008	13
1009	4
1010	5
1011	1
1012	2
1015	5
1016	1
1017	4
1018	2
1019	10
1020	9
1021	6
1022	17
1023	9

1024	26
1025	8
1026	14
1027	8
1028	16
1029	3
1030	10
1031	3
1032	1
1034	1
1051	5
1053	7
1054	9
1066	3
1067	6
1071	1
1074	3
1075	1
1077	1
4011	2
5055	2
5059	5
41613	1
41645	2
41646	1
41922	2
45944	2
45947	9
45962	8
45963	2
48215	3
TOTALT	322

Tabell 14 viser en oversikt hvor ofte de ulike tognumrene har hatt forsinket kryssing i de største forsinkelseskjedene. Her skiller det ikke mellom forsinkelsestype 1 og 2.

I de 13 største forsinkelseskjedene, i perioden 01.03.13-31.05.13, har det totalt vært 322 forsinkede kryssinger fordelt på 54 ulike tognummer. Tognumrene 52, 57, 1005, 1008, 1019, 1022, 1024, 1026, 1028 og 1030 har alle hatt forsinket kryssing 10 eller flere ganger. Alle disse togene er persontog, og er delaktig i 46 % av alle forsinkede kryssinger i disse kjedene.

Oppkobling mot årsakskoderegistrering

Årsakskoderegistreringen gjort av togledelsen i den valgte perioden har vært tilgjengelig for å undersøke forsinkelsesårsakene til togene i de største forsinkelseskjedene. Fordelingen av forsinkelsene i henhold til årsakskodene er som vist i tabell 15.

Tabell 15: Andel forsinkelser fordelt på årsakskoder

ANDEL AV FORSINKELSER I DE STØRSTE FORSINKELSESKJEDENE FORDELT PÅ ÅRSAKSKODEREGISTRERING	
Årsakskode	Andel av forsinkelser
1. Bane	0 %
2. Sikringsanlegg	3,73 %
3. Kraft/Kontaktledningsanlegg	0 %
4. Tele- og transmisjonsfeil	0 %
5. Planlagt vedlikeholdsarbeid infrastruktur	0 %
6. Materiell med feil sperrer sporet/blokkstrekning	0 %
7. Trafikkavvikling	4,97 %
81. Feil ved materiell	0 %
82. Materiell sent fra hensettingsspor	0 %
83. Manglende personell	0 %
84. Stasjonsopphold	0,31 %
85. Planforutsetninger endret	0 %
91. Forsinkelse fra utlandet	0,62 %
92. Ytre forhold	0 %
93. Uhell, påkjørsel	0 %
94. Uønsket hendelse	0 %
Tognummer ikke registrert på stasjon i TIOS	90,37 %

Tabell 15 viser at det som ofte regnes som følgeforsinkelser, altså årsakskode 7 og 84, utgjør 5,28 % av alle forsinkelsene i de 13 største forsinkelseskjedene. De fleste følgeforsinkelsene som er identifisert med KryssForsink er derimot ikke registrert i TIOS (90,37 % av tognumrene er ikke registrert på stasjon i TIOS). Av de tognumrene som har registrert årsak utgjør årsakskode 7 og 84 totalt 54,83 % av de registrerte årsakskodene. De resterende forsinkelsene er registrert som årsakskode 2 og 91.

DISKUSJON

TEMATIKK OG METODIKK FOR ANALYSER AV FØLGEFORSINKELSER

Tematikken i empiriske analyser av følgeforsinkelser er i stor grad dataanalyser og bruk av datamodeller for å se på spredning av forsinkelser. En mulig årsak til dette kan være den teknologiske utviklingen i samfunnet generelt, der bruk av datateknologi har økt tilnærmet eksponentielt. En annen årsak kan være det generelle trafikkbildet på jernbanen, med økt kapasitetsutnyttelse og et økt fremtidig kapasitetsbehov. Dette er blant annet koblet til vurderinger av praktisk og teoretisk kapasitet og ytelsesparametere. Det er derfor naturlig å se på hvordan ytelsen til nettverket kan bli forbedret ved å redusere forsinkelser. Da er det nyttig med simulering og estimering av forsinkelser, samt analytiske verktøy for å analysere et nettverk ut fra data fra togledelsen. Kvaliteten til disse verktøyene er av betydning, og øker behovet for testing, videreutvikling og tilpassing. Alt dette gir en etterspørsel etter forskning på temaet.

De fleste analysemetodene har gitt nyttige resultater. Det vil si at resultatene kan bli brukt for å forbedre ytelsen til nettverket, eller øker forståelsen av hvordan forsinkelser oppfører seg i nettverket. Dette kjenner vi igjen i det teoretiske grunnlaget gjennom norske ytelsesparametere som oppetid, regularitet og punktlighet. Analysemetodene gir også en økt forståelse av dynamikken i forsinkelser, og skillet mellom primær- og sekundærforsinkelser. Behovet for flere analyser blir også nevnt i de tidligere gjennomførte analysene. En årsak til dette kan være at en økt mengde analyser forbedrer sammenlikningsgrunnlaget, og gjør det lettere å vurdere analysenes validitet.

Et annet aspekt er at analysene gjennomført i utlandet fokuserer på dobbeltspor. For Norge er det nødvendig å øke kunnskapen for forsinkelsesspredning på enkeltspor.

Forskjellen mellom enkelt- og dobbeltspor gjør at det også er nyttig å øke fokuset på dobbeltspor, spesielt sett i lys av den pågående InterCity-utbyggingen. Fremtidens nettverk vil være preget av enkeltsporete innfartsårer som går over i travlere dobbeltspor. Derfor er det mange gode grunner til å analysere følgeforsinkelser i togtrafikken i Norge. En mulighet er å tilpasse og videreutvikle egne verktøy og metoder for å kunne gjøre dette best mulig, og gi de beste resultatene for norsk jernbanedrift.

Så godt som alle metodene for å analysere følgeforsinkelser baserer seg på at det er en sterk korrelasjon mellom forsinkelsen til to tog, som igjen er en kausalitet for spredning av forsinkelser. Det vil enkelt sagt si at metodene antar at dersom tog A er forsinket, vil dette forsinke tog B. Dette kan knyttes opp mot de betingelsene som ligger bak algoritmen til KryssForsink. Det er veldig få av metodene som klarer å skille ut at tog A og tog B begge kan være forsinket av andre årsaker samtidig. Et annet aspekt er retningen på forsinkelsesspredningene. Er det tog A som forsinke tog B, eller er det motsatt? Dette kan være tilfellet, selv om tog A hadde en forsinket kryssing tidligere i nettverket. Dette er kanskje den største svakheten/utfordringen med disse analysemetodene. Et viktig spørsmål er om dette er noe som lar seg kontrollere ved bruk av nye metoder eller i kombinasjon med eksisterende metoder. Et eksempel kan være å undersøke kryssingskorrelasjon ved hjelp av verktøy som Kryssingsinteraksjon. Her oppstår likevel noen av de samme ulempene som liknende metoder med regresjonsanalyse. En vurdering av hva slags ulemper som er ”akseptable” i slike analyser kan være gunstig.

Til tross for problemer med kausalitet og korrelasjon, har empiriske metoder rettet mot følgeforsinkelser på enkeltspor vist seg gunstig for å identifisere korrelasjoner som fører til punktlighetsproblemer i jernbanenettverk. En av styrkene til empiriske analysemetoder er at de gjør det mulig å se på effekten av dårlig punktlighet på et lavere nivå. Det er altså mulig å analysere følgeforsinkelser med en mindre margin for punktlighet enn det som registreres manuelt av togledelsen. Effekten av mindre forsinkelser som ikke blir registrert kan føre til vedvarende problemer. Dersom disse ikke identifiseres og undersøkes nærmere, vil ytelsesparameterne gi et ”falsk” inntrykk av hvordan jernbanenettverket fungerer. Dette påvirker vurderingen av vesentlige faktorer som tilgjengelig og utnyttet kapasitet, punktlighetsmarginer og målsetninger for jernbanedriften.

CASE-STUDIE: FØLGEFORSINKELSER PÅ KONGSVINGERBANEN

Vurdering av tilgjengelige data

KryssForsink bruker de tilgjengelige dataene for å undersøke om betingelsene for spredning av forsinkelser oppfylles. Disse dataene er basert på passeringstidspunktene for inn- og utkjørsignalene til stasjoner. Passeringstidspunktene er det noen måletekniske utfordringer ved. Dette er fordi inn- og utkjørsignalene (og tilhørende sporfelt) ikke står ved plattform. Det betyr at det ved noen stasjoner kan det være en viss distanse fra toget setter i fart til sporfeltet eller togveien blir løst ut. I tillegg til dette lagres ruteplanene i TIOS slik at det kun eksisterer planlagte ankomsttider (STA_TID) i de tilfeller der det er planlagt stopp (utveksling av passasjerer/gods, eller rutemessig kryssing/opphold). Ruteplanen legges heller ikke ut fra signalene, der tidene registreres, men fra plattformene. Dette gir i så måte en ”falsk” forsinkelse ved at togene som forlater plattformen ved planlagt avgang, vil passere utkjørssignalet etter rutetiden. Et annet aspekt er at på stasjoner med passasjerutveksling eller planlagt kryssinger blir det lagt inn tid i ruteplanen slik at kjøretiden fra utkjørsignal til utkjørsignal er kjøretid + stasjonsopphold ved stasjon B (ref. figur 26). For mindre stasjoner og holdeplasser (samt krysstopp og lignende) ligger ikke stasjonsopphold i ruteplanen. Da legges det inn en kjøretid + slakk for tiden fra utkjørsignal til utkjørsignal. Ettersom slakken allerede er disponert når toget ankommer stasjonen, disponerer toget egentlig av slakken til den etterfølgende blokken når toget står på stasjon B. Dette gjør at toget vil være ”forsinket” i avgang fra stasjon B, og må ta inn stasjonsoppholdet i avsetningen til slakk på den neste blokkstrekningen. Dette kan gjøre seg litt gjeldende på småstrekninger som Kongsvingerbanen, hvor dette er utstrakt praksis på små stasjoner og holdeplasser.

Alle disse faktorene påvirker datagrunnlaget til case-studien av følgeforsinkelser på Kongsvingerbanen. Det betyr ikke at datagrunnlaget er dårlig, men det er viktig å kjenne til når metode, verktøy, resultater og mulige svakheter ved analysen vurderes.

Vurdering av analysemetode og -verktøy

Denne analysen av følgeforsinkelser har brukt en kombinasjon av metoder relatert til algoritmer, og identifisering av forsinkelsessammenhenger ved hjelp av grafer. Verktøyet KryssForsink ble programmert ut fra matematiske betingelser, og kan derfor kategoriseres under metode 4. Vurderingen av forsinkelsenes oppførsel og sammenheng er gjort ved hjelp av toggrafer og Excel, og kan kategoriseres som metode 5. Bruk av støtteverktøyet Kryssingsinteraksjon er knyttet opp mot metode 1.

Gjennomføringen av analysen inneholder elementer av tidligere norske analyser som er gjennomført. Det kan ses ved at det er likhetstrekk mellom denne analysen og analysene til NSB (2013a) og Sørensen (2013). I tillegg er algoritmen utviklet av Sørensen et al. (2013) grunnlaget for verktøyet KryssForsink.

Metoden med å gjennomføre en case-studie har vært en gunstig forskningsmetodikk. På denne måten har arbeidet vært overkommelig, men mulighetene med slike analyser blitt illustrert. Dette er også mye av hensikten med case-studier. Ved å forhåndsdefinere en case-strekning og –periode gjøres datagrunnlaget håndterbart, men likevel solid. Dette gjør at fordeler og ulemper ved å bruke KryssForsink til empiriske analyser av følgeforsinkelser kan identifiseres raskere. Dette gir mer tid til evaluering av resultater og videreutvikling og tilpassing av metoder og verktøy.

Ved å bruke KryssForsink har det vært lettere å identifisere forsinkelseskjeder, ettersom resultatene presenteres visuelt i en toggraf. Dette gjør det enklere å forstå spredningen av forsinkelser enn ved å analysere alle dataene i Excel. Det er likevel slik at for lengre perioder (større datamengder) er det nødvendig å benytte seg av støtteverktøy som Excel for å strukturere dataene. Det er en tidkrevende prosess å strukturere og overføre dataene til Excel. Hvordan dataene struktureres er også av betydning, ettersom forsinkelseskjeder kan forsvinne i datamengdene. Det har vært gunstig å jobbe gjennom dataene stegvis, og benytte seg av filtrering på datoer for saktekjøring, samt kategorisere forsinkelsene i to forsinkelsestyper. Visualisering av forsinkelsesspredning ved hjelp av spredningstrær har også vært en bra metode for å tolke resultatene av analysen.

Vurdering av resultater

Resultatene av analysen har funnet de største forsinkelseskjedene som har oppstått i perioder med saktekjøring på en enkeltsporet jernbanestrekning. Det har vært mulig å identifisere de stasjonene som oftest har vært opprinnelse til forsinkelsesspredning, og de togene som oftest har hatt forsinket kryssing. For de største forsinkelseskjedene er også de ulike årsakskodene blitt identifisert. Alle disse resultatene er nyttige.

Det er først interessant å se på den overordnede statistikken for Kongsvingerbanen i den valgte perioden. Strekningen hadde en punktlighet på henholdsvis 88, 83 og 72 % for mars, april og mai 2013. Kobles dette opp mot de overordnede observasjonene ser vi at de største forsinkelseskjedene alle har oppstått i mai måned, og mer spesifikt den siste uken i mai. Dette avspeiler den registrerte punktligheten, og kan forsterke gyldigheten til de andre resultatene i analysen. Det eneste unntaket er den største forsinkelseskjeden fra Seterstøa (SET) som oppstod den 30.04.13.

Identifisering av de største forsinkelseskjedene er nyttig for å se på størrelsesforholdet på forsinkelsesspredningen. Hvis flere stasjoner har store forsinkelseskjeder kan dette indikere at det er mangel på kapasitet i ruteplanen eller infrastrukturen for hele strekningen. Det kan også indikere en generell sårbarhet, og lite robusthet for å håndtere avvik som oppstår. Dersom enkelte stasjoner har større forsinkelseskjeder enn andre, kan det bety at disse stasjonene er flaskehals der forsinkelser lett sprer seg videre. Resultatene fra analysen av Kongsvingerbanen viser at enkelte stasjoner hadde nettopp dette. De største forsinkelseskjedene oppstod på stasjonene Matrand (MAT), Haga (HAG), Fetsund (FET), Årnes (ÅRN), Rånåsfoss (RFS), Seterstøa (SET) og Skarnes (SKA). Disse stasjonene hadde en opprinnelig forsinkelse som førte til 10 eller flere følgeforsinkelser. Uten videre kunnskap om hvordan disse stasjonene er utformet i form av infrastruktur og prioriteringer i ruteplan er det likevel vanskelig å konkludere med at stasjonene er flaskehals. Det er likevel interessant å sammenlikne dette med hvor ofte forsinkelseskjeder har oppstått på disse stasjonene. I den valgte perioden er både Fetsund (FET) og Årnes (ÅRN) stasjon representert flest ganger av de stasjonene som var berørt av saktekjøring. Dette kan skyldes at disse stasjonene hadde saktekjøring i hele perioden, mens stasjonene Sander (SAN) og

Sørumsand (SØR) kun hadde saktekjøring i deler av perioden. Det interessante er at alle fire stasjonene var berørt av saktekjøring, men kun Fetsund (FET) og Årnes (ÅRN) har hatt forsinkelseskjeder som inneholder over 10 følgeforsinkelser. Forutsettes det at ruteplan- og trafikkforutsetningene har vært like over hele perioden kan det tyde på at forsinkelser lettere sprer seg ut i nettverket fra disse to stasjonene.

Dersom vi ser på stasjonene som ikke har vært berørt av saktekjøring har Matrand (MAT) stasjon kun vært opprinnelsen til 3 forsinkelseskjeder. Dette tyder på at selv om stasjonen har vært opprinnelse til den største spredningen av forsinkelser, er det ikke et sårbart punkt i nettverket. Dersom spredningen har gått via andre flaskehalsler kan dette forklare hvorfor spredningen har blitt så stor. Sørumsand (SØR) og Sander (SAN) stasjon mottok følgeforsinkelser ganske tidlig i 8 av de 10 største forsinkelseskjedene. Dette kan tyde på at disse stasjonene likevel oppfører seg som flaskehalsler, til tross for resultatene knyttet til forsinkelsestype 1. Det er også naturlig å anta at alle 4 stasjonene som var berørt av saktekjøring vil oppføre seg som flaskehalsler på grunn av endrede forutsetninger i ruteplanen. Seterstøa (SET), Skarnes (SKA), Haga (HAG) og Rånåsfoss (RFS) er de stasjonene som oftest har vært opprinnelsen til forsinkelseskjeder av forsinkelsestype 2. De har altså hatt de største forsinkelseskjedene, og oftest vært kilden til spredning av forsinkelser. Dette kan tyde på at disse stasjonene er flaskehalsler på strekningen.

Ved å se på tognummer som oftest har hatt forsinket kryssing er det også interessante resultater. Det at 46 % av de forsinkede kryssingene har involvert de samme persontogene rokker ved noen oppfatninger om at godstog er kilden til forsinkelsesproblemer i jernbanenettverket. Denne analysen viser at dette ikke er tilfellet for de største forsinkelseskjedene på Kongsvingerbanen. Det betyr ikke at godstog er fritatt for ansvaret for spredning av forsinkelser. Godstog er fortsatt delaktig i forsinkede kryssinger, og kan være en årsak til at den store spredningen av forsinkelser fortsetter videre ut i nettverket. Resultatene viser likevel at godstog ofte ikke er involvert i slike forsinkede kryssinger. Når godstog derimot er involvert er det fullt mulig at forsinkelser sprer seg. Dette kan avhenge av mange faktorer, som for eksempel godsselskap, ruteplan, togledelse og infrastrukturen i seg selv.

Oppkoblingen mot registreringen gjort av togledelsen i TIOS ga interessante resultater. Dette fordi mange av tognumrene som KryssForsink identifiserte forsinket kryssing på, ikke har blitt registrert i TIOS. Det kan være mange ulike årsaker til dette. En umiddelbar tanke er at det har skjedd avlesingsfeil av tognummer i KryssForsink. Dobbeltsjekking av forsinkelseskjedene som er identifisert har avkreftet dette for de fleste kjedene. Ved å gå nærmere inn i dataene fra TIOS er den mest sannsynlige årsaken til dette funnet. Registreringen av forsinkelser blir gjort ved den første stasjonen der punktlighetsgrensen overskrides. Skal det registreres en ny forsinkelsesårsak på en ny stasjon, krever det at forsinkelsen er økt med den samme punktlighetsgrensen. Dette blir gjort for å unngå overrapportering, men kan i dette tilfellet føre til underrapportering. Mange av forsinkelsene som KryssForsink har identifisert, kan spores tilbake til en registrert årsak et annet sted i nettverket, og er derfor ikke registrert på den stasjonen KryssForsink har identifisert forsinkelsen. En annen mulig årsak til at mange tognummer ikke har identifisert årsak er at noen tognummer er godstog/regiontog, og den valgte punktlighetsmargin i KryssForsink har vært den som gjelder for lokaltog. Dermed identifiseres forsinkede kryssinger i KryssForsink, som ikke vil registreres av togledelsen. Den store andelen persontog som har vært delaktig i forsinkede kryssinger gjør derimot at denne årsaken alene ikke kan forklare resultatet. En tredje årsak kan være at togledelsen har gjort feil i registreringen. Under pressede situasjoner, noe det ofte kan være ved store forsinkelser, er det mulig at årsakskoderegistreringen ikke har den høyeste prioritet. Den fjerde årsaken kan være algoritmen som er grunnlaget for KryssForsink, herunder dens betingelser for følgeforsinkelser. Det er mulig at disse betingelsene identifiserer følgeforsinkelser som togledelsen ikke registrerer som følgeforsinkelser, eller forsinkelser i det hele tatt. Til slutt er det problematikken med registrering av forsinkelser på blokkposter. På blokkposter er ikke punktlighet et stort fokus for togledelsen, ettersom dette kun er punkter på blokkstrekninger. Det er ankomst- og avgangstider på stasjonene som er av betydning, både for togledelsen og passasjerene. Summen av alle disse mulige årsakene kan gi et stort utslag i antallet tognummer som ikke samsvarer mellom KryssForsink og TIOS. Det er likevel et interessant resultat, og sammenhengen mellom årsakskoderegistreringen og resultater fra sanntidsdata er noe som burde utforskes videre.

Mulige svakheter med analysen

Den største svakheten med analysen er muligheten for menneskelige feil. Dette gjelder for eksempel feil ved strukturering, avlesing og tolking av data. Det gjelder også programmeringen av KryssForsink sine betingelser, og registreringen av forsinkelsesårsaker gjort av toglødsledelsen. Analysen er både kvalitativ og kvantitativ, og de kvalitative vurderingene er spesielt avhengig av at disse svakhetene er redusert så mye som mulig. Det er ikke mulig å validere dette uten å gjennomføre en liknende analyse, og undersøke om resultatene blir de samme.

En annen svakhet er knyttet til det faktum at forsinkelsesdataene som registreres automatisk er koblet til inn- og utkjørssignalet på stasjon. Dette ble også nevnt ovenfor i vurderingen av de tilgjengelige data. Vi får dermed ikke et nøyaktig tall på størrelsen til forsinkelsene, ettersom disse signalene er plassert utenfor stasjonen (der togene faktisk krysser). Avstanden fra inn- og utkjørsignal til plattformen vil også variere fra stasjon til stasjon. Konsekvensene av dette antas likevel ikke å være så store i denne analysen. Dette fordi det kun vil være avgjørende i grensesjiktet for den valgte punktlighetsmarginen på 239 sekunder om forsinkelsen blir inkludert i analysen eller ikke.

Problematikken med slakk i ruteplanen, manglende stasjonsopphold, og manglende fokus på punktlighet på blokkposter er også en mulig svakhet. Dette påvirker både de registrerte forsinkelsene i TIOS, og resultatene som finnes ved å bruke KryssForsink. Slakk i ruteplanen, sammen med manglende stasjonsopphold, kan gjøre at KryssForsink identifiserer forsinkelser som i realiteten ikke er forsinkelser. Manglende fokus på punktlighet på blokkposter kan føre til mangelfull registrering i TIOS.

Det gjenstår også arbeid med utviklingen av KryssForsink. Verktøyet er i en prototypefase, og resultatene av analysen er derfor brukt for å illustrere mulighetene med verktøyet. Svakhetene med verktøyet er sterkt knyttet til liknende analyser der det har blitt benyttet algoritmer til å identifisere følgeforsinkelser. Betingelsene som KryssForsink er basert på er antatt som gjeldene, men det kan likevel diskuteres

hvorvidt disse dekker det som kan klassifiseres som følgeforsinkelser. Det illustrerer også en problematikk rundt hva som faktisk er følgeforsinkelser, både i praksis og matematisk.

KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER

I dette kapitlet presenteres konklusjonen for de problemstillingene som skulle bli belyst i denne masteroppgaven:

1. Hvordan kan vi benytte eksisterende analysemetoder for å forbedre forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket?
2. Hvordan kan vi forbedre disse analysemetodene/-verktøyene?
3. Hva slags nytte kan oppnås ved å analysere følgeforsinkelser i Norge?

I dette kapitlet er det også en anbefaling av en ny definisjon av følgeforsinkelser. Til slutt er det anbefalt videre forskning på følgeforsinkelser i jernbanenettverk i Norge.

KONKLUSJONER

1. Hvordan kan vi benytte eksisterende analysemetoder for å forbedre forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket?

Jeg har kategorisert fem ulike metoder for empiriske analyser av følgeforsinkelser. Disse er henholdsvis:

1. Regresjonsanalyse m/ flere variable
2. Sannsynlighetsfordeling for forsinkelser
3. Sannsynlighetsmodeller for spredning av forsinkelser
4. Identifisering av mønstre vha algoritmer
5. Identifisering av sammenhenger vha grafer

I tidligere gjennomførte empiriske analyser av følgeforsinkelser har disse metodene blitt brukt for å belyse problemstillinger knyttet til:

- **Beskrivende ytelsesparametere:** Regresjonsanalyser muliggjør beregning av parametere som beskriver jernbanenettverket gjennom data fra ruteplaner, togegenskaper, forsinkelser og infrastruktur
- **Sårbare punkter i nettverket:** Kan identifiseres ved hjelp av sannsynlighetsfordelinger for forsinkelser gjennom fordeling i tid og sted.
- **Påvirkningen ulike faktorer har på spredningen av forsinkelser:** Sannsynlighetsmodeller kan predikere forsinkelser, og indikere påvirkningen til ulike faktorer ved å variere parameterne i modellene.
- **Systematiske avhengigheter mellom forsinkelser, sårbarhet i ruteplan og rutekonflikter:** Kan identifiseres ved hjelp av algoritmer med matematiske betingelser for forsinkelsesspredning, og benytter data fra togledelsen
- **Skille mellom primær- og sekundærforsinkelser:** Ved hjelp av toggrafer og enkle verktøy som gir rask bearbeiding av data kan vi skille mellom primær- og sekundærforsinkelser, og derav primær- og sekundærårsaker.

Alle disse problemstillingene er koblet til faktorer som påvirker vår forståelse av jernbanenettverket. Rutekonflikter og sårbare punkter i nettverket vil eksempelvis påvirke den praktiske kapasiteten som er mulig å utnytte, og påvirke robustheten, påliteligheten og stabiliteten i nettverket. Identifisering av systematiske avhengigheter og årsak-virkningsforhold kan bidra til en økt forståelse av de virkelige årsakene til forsinkelser. I beste fall kan det gi bedre årsakskoderegistreringer fra togledelsen, utbedring av systematiske feil i infrastruktur og/eller ruteplan, og bedre punktlighet, regularitet og oppetid.

Økt bruk av eksisterende analysemetoder vil derfor øke vår forståelse av jernbanenettverket, og kan fjerne de feil som fører til følgeforsinkelser. Dette har også blitt illustrert med case-studien av følgeforsinkelser på Kongsvingerbanen. Her ble det identifisert mulige flaskehals (sårbare punkter), og hvordan saktekjøring påvirket spredningen av forsinkelser. Identifisering av tognumre som ofte var involvert i forsinkelser kan også ha bidratt til riktigere ansvarsfordeling. Ved å koble de empiriske resultatene mot årsakskoderegistreringen har vi fått en økt forståelse av hva som forsinket togene, og mulige mangler med registreringen. Tabell 16 oppsummerer de fem analysemetodene som er identifisert, og hvordan disse kan benyttes.

Tabell 16: Konklusjon - Hvordan benytte eksisterende analysemetoder?

Analysemetode	Hvordan kan vi benytte metoden?
1.Regresjonsanalyse m/flere variable	Kan benyttes for beregning av beskrivende ytelsesparametere
2. Sanns.fordeling for forsinkelser	Kan benyttes for å identifisere sårbare punkter i nettverket
3. Sanns.modeller for spredning av forsinkelser	Kan benyttes for prediksjon av forsinkelsesspredning og vurdering av faktorer som påvirker forsinkelser
4. Identifisering av mønstre vha. algoritmer	Kan benyttes for identifisering av systematiske avhengigheter mellom forsinkelser, indikere sårbarhet i ruteplan og identifisere rutekonflikter
5. Identifisering av sammenhenger vha. grafer	Kan benyttes for å skille mellom primær- og sekundærforsinkelser

2. Hvordan kan vi forbedre disse analysemetodene/-verktøyene?

Analysemetoder/-verktøy for empiriske analyser av følgeforsinkelser har også sine svakheter knyttet til de problemstillingene de er egnet til å belyse. Eksempler på slike svakheter er:

- **Viktige faktorer som påvirker forsinkelser** kan bli ignorert i regresjonsanalyser, og resultatet kan føre til sterk korrelasjon der det i virkeligheten ikke er det
- **Manglende evaluering** av tidligere brukte sannsynlighetsfordelinger for forsinkelser gir usikkerhet knyttet til validiteten av enkelte sannsynlighetsfordelinger. Det er altså en begrenset evaluering vha empiriske data på de statistiske slutninger som er gjort tidligere.
- **Hensynet til dynamikken i forsinkelser og togledelsesstrategier ved forsinkelser** er mangelfull i sannsynlighetsmodellering for forsinkelser. Et annet aspekt er akselerasjon og retardasjon som forårsaker tapt tid, og i realiteten ikke er forsinkelser.
- **Begrensning av omfang/hensikt** ved bruk av algoritmer gjør at verktøyene ikke nødvendigvis er brukbare i andre tilfeller. Det gjenstår også mye arbeid rundt datainnsamling for en del av algoritmene.
- **Begrenset kompleksitet** på datasett og størrelse på analysene er en svakhet knyttet til bruk av enkle verktøy som toggrafer.

Resultatene av empiriske analyser av følgeforsinkelser vil i stor grad avhenge av hva som blir gjort for å redusere disse svakhetene. Spesielt er dette viktig for å kunne gjøre bedre kvalitative vurderinger av resultatene. Det kan være gunstig å gjøre en vurdering på hva slags svakheter som er ”akseptert” i analysemetodene/verktøyene. Et annet aspekt er kompleksiteten, størrelsen og omfanget/hensikten til analysen som blir gjennomført. Dette er faktorer som begrenser analysemetodene og –verktøyene. Gjennom case-studien av Kongsvingerbanen ble 3 ulike analysemetoder benyttet i kombinasjon. Da har styrkene til noen metoder veiet opp for de andre metodenes svakheter. Tidligere gjennomførte analyser av følgeforsinkelser bekrefter at dette er gunstig. Analysen i denne oppgaven er basert på et verktøy der en algoritme har

definerte matematiske betingelser for spredning av forsinkelser. Her ligger det et forbedringspotensial i form av tilpassing og videreutvikling av algoritmen. Det bør også bli gjennomført flere case-studier av følgeforsinkelser. Dette kan forbedre de kvalitative vurderingene, kvalitetssikre og videreutvikle verktøy, og gi sammenliknbare resultater. Tabell 17 oppsummerer hvordan vi kan forbedre de fem analysemetodene.

Tabell 17: Konklusjon - Hvordan kan vi forbedre analysemetodene/verktøyene?

Analysemetode	Hvordan kan vi forbedre analysemetoden/-verktøyet?
1.Regresjonsanalyse m/flere variable	Kan forbedres ved å sikre at viktige faktorer som påvirker forsinkelser er inkludert i analysen
2. Sanns.fordeling for forsinkelser	Kan forbedres ved å gjøre evalueringer vha. empiriske data på de statistiske slutninger og fordelinger som er brukt tidligere.
3. Sanns.modeller for spredning av forsinkelser	Kan forbedres ved å ta mer hensyn til toglødsstrategier, togenes retardasjon/akselerasjon og variasjon av forsinkelser
4. Identifisering av mønstre vha. algoritmer	Kan forbedres ved å sikre at omfang og hensikt av analysen tar hensyn til videre bruk og tilpassing, samt sikre god datainnsamling.
5. Identifisering av sammenhenger vha. grafer	Kan forbedres ved å bruke metoden/verktøyet i kombinasjon med andre metoder/verktøy.

3. Hva slags nytte kan oppnås ved å analysere følgeforsinkelser i Norge?

I innledningen til denne masteroppgaven ble det nevnt hvor stort omfang forsinkelser har for alle med tilknytning til jernbanen i Norge. Det er derfor naturlig å anta at vi kan få stor nytte av å analysere følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket. Dette kan knyttes til besvarelsen av de to første problemstillingene der vi får økt forståelsen av det norske jernbanenettverket, og forbedrer/tilpasser de eksisterende metodene/verktøyene for analyser av følgeforsinkelser. Summen av dette antas å kunne identifisere problematikk som påvirker ytelsen til det norske jernbanenettverket. Dersom aktørene som er ansvarlig for utbygging, drift og vedlikehold løser den identifiserte problematikken burde de samfunnsøkonomiske kostnadene bli redusert. Tidligere gjennomførte analyser av følgeforsinkelser bygger opp om disse påstandene. Det samme gjør case-studien av følgeforsinkelser på Kongsvingerbanen. Tabell 18 på neste side oppsummerer de ulike metodenes nytte for norsk jernbane, samt hvem som har ansvar for/kan ha nytte av å gjennomføre analyser av følgeforsinkelser. Ansvaret/nytten ligger hos enten Jernbaneverket (JBV), Norges Statsbaner (NSB) eller andre jernbaneaktører (Andre).

Tabell 18: Konklusjon - Hva slags nytte kan oppnås vha. metodene/verktøyene?

Analysemetode	Hva slags nytte kan oppnås?
1.Regresjonsanalyse m/flere variable	Gir nytte ved å beregne beskrivende ytelsesparametere som gir en bedre forståelse av nettverkets ytelse (JBV/NSB/Andre)
2. Sanns.fordeling for forsinkelser	Gir nytte ved å identifisere sårbare punkter og utbedre disse. Da kan vi få økt tilgjengelig kapasitet, robusthet, stabilitet og pålitelighet. Dette forbedrer ytelsen (JBV)
3. Sanns.modeller for spredning av forsinkelser	Gir nytte ved å estimere forsinkelser og indikere svakheter i ruteplan/infrastruktur som kan utbedres før implementering/utbygging. Kan sikre god punktlighet, regularitet og oppetid gjennom preventive tiltak (JBV/NSB/Andre)
4. Identifisering av mønstre vha. algoritmer	Gir nytte ved å identifisere rutekonflikter og sårbarhet i ruteplan. Ved utbedring kan dette gi bedre ruteplanlegging og økt punktlighet (JBV/NSB)
5. Identifisering av sammenhenger vha. grafer	Gir nytte ved å skille mellom primær- og sekundærforsinkelser. Dette kan bidra til bedre årsakskoderegistrering, ansvarsfordeling og forståelse av nettverket (JBV/NSB/Andre)

ANBEFALINGER

I denne oppgaven har jeg konsekvent brukt begrepet følgeforsinkelser. Jeg har benyttet følgende definisjon:

En følgeforsinkelse er en forsinkelse som oppstår på grunn av avhengigheter mellom tog i jernbanenettverk. Ruteplanlegging og/eller infrastrukturen som togene trafikkerer er årsaken til disse avhengighetene. Forsinkelsesårsaken(e) har ingen tilknytning til det toget som forsinkes, utover disse avhengighetene.

I litteraturen, og tidligere analyser, brukes ulike definisjoner og synonymer. Dette skaper problemer for arbeid med analyser av følgeforsinkelser. En felles forståelse av begrepet følgeforsinkelse, kan bidra til en økt enighet rundt hvordan forsinkelser oppfører seg i jernbanenettverk, og forklare den dynamiske oppførsel som forsinkelser er preget av. Felles definisjon av begrepet vil også bidra til tydeligere matematiske definisjoner av hva som kan kvantifiseres som følgeforsinkelser. Jeg anbefaler derfor at definisjonen ovenfor legges til grunn for videre arbeid med analyser av følgeforsinkelser i Norge. Denne definisjonen anbefales fordi:

- To tog kan være forsinket samtidig ved kryssing på en stasjon. Det ene toget er ikke nødvendigvis korrelert med det andre. Avhengigheter og korrelasjoner kommer av infrastrukturen og/eller ruteplanen.
- Definisjonen kan brukes til å forklare dynamikken (variasjonen) i forsinkelser
- Definisjonen sier tydelig at følgeforsinkelser kun skyldes årsaker som ikke har noen tilknytning til toget som forsinkes, utover de avhengighetene som eksisterer. Det skilles dermed mellom primær- og sekundærårsaker. Kvantifisering av en følgeforsinkelse kan således ikke bestå av primærforsinkelser, selv om toget kan være forsinket av både en primær- og sekundærårsak samtidig.
- Definisjonen ser bort fra tapt tid ved akselerasjon/retardasjon av toget, samt eventuelle avstander fra målepunkt til stasjon. Dette blir ansett som ”falske” forsinkelser, og er ikke årsaken til følgeforsinkelser.

VIDERE FORSKNING PÅ FØLGEFORSINKELSER

Det er et økt behov for forskning på følgeforsinkelser. Forsinkelser har store samfunnsøkonomiske kostnader knyttet til seg, det er stor satsning på jernbanen i Norge, og det er ventet stor fremtidig transportvekst. Gjennomgangen av tidligere empiriske analyser av følgeforsinkelser viser først og fremst at Nederland dominerer forskningen. Det er spesielt TU Delft som gjentagende ganger går igjen. Det viser at her er det et lite miljø som fokuserer stort på dette temaet. Norges innsats på området kan diskuteres, spesielt med tanke på fremtidig utvikling av jernbanen og kapasitetsutnyttelsen av dagens nettverk. Det kan derfor være naturlig å se til forskning gjort i Nederland, og vurdere å opprette kontakt med dette fagmiljøet for å fremme forskningen i Norge. Instituttet for bygg, anlegg og transport (BAT) bør vurdere dette i samarbeid med SINTEF.

Videreutvikling av SINTEFs prototypeverktøy gjennom testing og tilpassing etter behov burde også prioriteres. Denne masteroppgaven har vist noe av nytten ved å bruke disse verktøyene, men også illustrert mangler og behov for videreutvikling og tilpassing. Noen forslag til videreutvikling, basert på resultatene fra case-studien, er vedlagt som vedlegg E (s. 131).

Validering av metode- og verktøybruk er også viktig, eksempelvis med å gjennomføre liknende analyser. På lengre sikt burde det også være et fokus på dobbeltsporet jernbaneinfrastruktur, og overgangen mellom enkelt- og dobbeltsporet infrastruktur, der det antas at en større spredning av forsinkelser kan oppstå. Det er også aktuelt med tanke på den pågående utbyggingen av InterCity-triangelet på Østlandet.

Det burde være av stor interesse for både Jernbaneverket, NSB og andre jernbaneaktører å få en bedre forståelse av det norske jernbanenettverket ved hjelp av analyser av følgeforsinkelser. Her er det en tanke at de samfunnsøkonomiske kostnadene med følgeforsinkelser kan reduseres kraftig. Derfor burde alle jernbaneaktører se dette som en gylden mulighet. Med et større fagmiljø vil de identifiserte analysemetodene og –verktøyene i denne masteroppgaven i større grad kunne bli evaluert, videreutviklet og tilpasset for Norges jernbane.

REFERANSELISTE

- ABRIL, M., BARBER, F., INGOLOTTI, L., SALIDO, M. A., TORMOS, P. & LOVA, A. 2008. An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44, 774-806.
Tilgjengelig fra: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554507000579>
[Hentet: 10.02.15]
- BABU, D. K., KUMAR, Y. N. S. & GLNVS 2011. Frequent Itemsets Used in Mining of Train Delays.
Tilgjengelig fra: http://www.interscience.in/IJCSI_Vol2Iss1/IJCSI_Paper_13.pdf [Hentet: 23.02.15]
- BAYISSA, T. F. 2013. *How do Delays Along the Way Influence Delays to Final Destination*. Master thesis, NTNU.
Tilgjengelig fra: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-21455>
[Hentet: 10.02.15].
- BRUINSMA, F., RIETVELD, P. & VAN VUUREN, D. 2001. Coping with unreliability in public transport chains: a case study for The Netherlands.
Tilgjengelig fra: <http://degree.ubvu.vu.nl/repec/vua/wpaper/pdf/19990031.pdf>
[Hentet: 13.02.15]
- CAREY, M. & KWIECIŃSKI, A. 1994. Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28, 251-267.
Tilgjengelig fra: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261594900019> [Hentet: 10.02.15]
- CONTE, C. 2007. *Identifying dependencies among delays*. Doctorate thesis, Göttingen.
Tilgjengelig fra: <http://ediss.uni-goettingen.de/bitstream/handle/11858/00-1735-0000-000D-F124-2/conte.pdf> [Hentet: 01.03.15].
- CULE, B., GOETHALS, B., TASSENOY, S. & VERBOVEN, S. 2011. Mining Train Delays. In: Gama, J., Bradley, E. & Hollmén, J. (eds.) *Advances in Intelligent Data Analysis X*. Springer Berlin Heidelberg.
Tilgjengelig fra: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-24800-9_13 [Hentet: 01.03.15]
- FLIER, H., GELASHVILI, R., GRAFFAGNINO, T. & NUNKESSER, M. 2009. Mining Railway Delay Dependencies in Large-Scale Real-World Delay Data.

- In: Ahuja, R., Möhring, R. & Zaroliagis, C. (eds.) *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Springer Berlin Heidelberg.
Tilgjengelig fra: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05465-5_15 [Hentet: 01.03.15]
- GOVERDE, R. M. 2005. *Punctuality of railway operations and timetable stability analysis*, TU Delft, Delft University of Technology.
Tilgjengelig fra: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:a40ae4f1-1732-4bf3-bbf5-fdb8dfd635e7/> [Hentet: 01.03.15].
- GOVERDE, R. M., DAAMEN, W. & HANSEN, I. A. 2008. Automatic identification of route conflict occurrences and their consequences. *Computers in Railways XI*, 473-482.
Tilgjengelig fra: <http://www.transumofootprint.nl/upload/documents/03 Projecten/Betrouwbaarheid Transportketens/03 Output/02 Wetenschappelijke publicatie/Paper Automatic identification of route conflicts BTK .pdf> [Hentet: 26.02.15]
- GOVERDE, R. M. & HANSEN, I. A. 2001. Delay propagation and process management at railway stations. 5th World Conference on Railway Research (WCRR 2001), Köln, November 25-29, 2001, 2001. WCRR.
Tilgjengelig fra: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:f2425fbf-ea0f-448f-9eb3-2317d9526b56/> [Hentet: 16.02.15]
- GYLEE, M. 1994. Punctuality analysis - A basis for monitoring and investment in a liberalized railway system. Rail. proceedings of seminar M held at the 22nd PTRC European Transport Forum, 1994 University of Warwick, Enland.
Tilgjengelig fra: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=426275> [Hentet: 04.02.15]
- JERNBANEVERKET. 2013. *Slik fungerer jernbanen*.
Tilgjengelig fra: [http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/28193/Slik fungerer jernbanen versjon 191213.pdf](http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/28193/Slik%20fungerer%20jernbanen%20versjon%20191213.pdf) [Hentet: 24.02.15]
- JERNBANEVERKET 2014a. Kode 7 Trafikkavvikling - Analyse av forsinkelsesårsaker. *Upublisert*.
- JERNBANEVERKET. 2014b. *Punktlighet persontog 2013*.
Tilgjengelig fra: <http://www.jernbaneverket.no/no/Nyheter/Togenes-punktlighet-og-regularitet/Punktlighet-persontog-2013/> [Hentet: 01.04.15]
- JERNBANEVERKET. 2014c. *Togenes punktlighet og regularitet*.
Tilgjengelig fra: <http://www.jernbaneverket.no/no/Nyheter/Togenes-punktlighet-og-regularitet/> [Hentet: 21.02.15]
- KRÜGER, N. A., VIERTH, I. & FAKHRAEI ROUDSARI, F. 2013. Spatial, temporal and size distribution of freight train delays: evidence from Sweden.
Tilgjengelig fra: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A686240&dswid=-435> [Hentet: 01.03.15]

- LABERMEIER, H. 2013. On the dynamic of primary and secondary delay. Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen2013), 2013. 1-11.
- LANDEX, A., KAAS, A. H., SCHITTENHELM, B. & SCHNEIDER-TILLI, J. 2006. Evaluation of railway capacity. *Trafikdage/Trafficdays*. Tilgjengelig fra: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:51998/datastreams/file_2997244/content [Hentet: 10.02.15]
- LANDMARK, A. D. 2014. Analyseverktøy for Togtrafikk. *Upublisert*.
- LINDFELDT, A. 2010. A study of the performance and utilization of the Swedish railway network. First International Conference on Road and Rail Infrastructure, 2010a. Tilgjengelig fra: http://www.kth.se/polopoly_fs/1.160196!/Menu/general/column-content/attachment/Lindfeldt_2010_Performance_and_Utilization.pdf [Hentet: 03.03.15]
- LINDFELDT, O. 2010b. Evaluation of punctuality on a heavily utilised railway line with mixed traffic. *Timetable Planning and Information Quality*, 115. Tilgjengelig fra: https://http://www.google.no/books?hl=no&lr=&id=BbWtfTuTHwcC&oi=fnd&pg=PA115&dq=Evaluation+of+punctuality+on+a+heavily+utilised+railway+line+with+mixed+traffic&ots=hZXh0XJoh3&sig=o7Ym70upzXliAvOCimWSP317iR4&redir_esc=y-v=onepage&q=Evaluation%20of%20punctuality%20on%20a%20heavily%20utilised%20railway%20line%20with%20mixed%20traffic&f=false [Hentet: 27.02.15]
- MILINKOVIC, S., VESKOVIC, S. & MARKOVIC, M. 2013. Modelling train delays in rail networks with large disturbances. Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen), 2013.
- NIE, L. & HANSEN, I. A. 2005. System analysis of train operations and track occupancy at railway stations. *European journal of transport and infrastructure research EJTIR*, 5 (1). Tilgjengelig fra: <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:tudelft.nl:uuid:82cb62cc-fd19-4c84-9d88-b0e29647abbe> [Hentet: 05.03.15]
- NSB 2013a. Forsinkelsesspredning i Excel. *Upublisert*.

- NSB 2013b. Sekundærforsinkelser som funksjon av primærforsinkelser. *Upublisert*.
- NTB. 2015. *Hver dag blir 223 tog forsinket eller innstilt*. Teknisk Ukeblad.
Tilgjengelig fra: <http://www.tu.no/samferdsel/2015/04/14/hver-dag-blir-223-tog-forsinket-eller-innstilt> [Hentet: 01.05.15]
- PACHL, J. 2002. *Railway operation and control*.
- PORTER, J. L., A 2006. Lean Six Sigma. *Top Fuel 2006*.
Tilgjengelig fra:
[http://www.euronuclear.org/events/topfuel/transactions/Topfuel-Poster Session II.pdf - page=12](http://www.euronuclear.org/events/topfuel/transactions/Topfuel-Poster%20Session%20II.pdf) [Hentet: 05.03.15]
- RICHTER, T. 2013. Analysis of delays on saturated railway line. Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen), 2013.
- RUDNICKI, A. 1997. Measures of regularity and punctuality in public transport operation.
- SAMSET, K. 2014. Forskningsmetodekurset 20.august 2014 - Del 1 Kvalitativ forskning. *Upublisert*.
- SKARTSÆTERHAGEN, S. 1993. Kapasitet på jernbanestrekninger.
Tilgjengelig fra: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/155910> [Hentet: 18.02.15]
- SNL. 2005-2007. *Kapasitet*.
Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kapasitet%20From> [Hentet: 03.03.14]
- SÆTERMO, I. F., OLSSON, N. & VEISETH, M. 2006. Analyser av infrastrukturrelaterte forsinkelser på strekningen Asker - Oslo S. .
Tilgjengelig fra:
http://www.sintef.no/globalassets/project/pemro/rapporter/pemro-ap2_1-infrastrukturtilstand.pdf [Hentet: 25.02.15]
- SØRENSEN, A. Ø. 2013. PRECIS: Dovrebanen 2013. *Upublisert*.
- SØRENSEN, A. Ø., LANDMARK, A. D. & ØKLAND, A. 2013. Delay propagation on single-track railway line, algorithm used to analyse real-world data.
Upublisert.
- VEISETH, M. 2002. *Punktlighet i jernbanedrift*. Master thesis, NTNU.

Tilgjengelig fra: <http://jernbaneforskning.no/files/pages/554/2002-veiseth-master.pdf> [Hentet: 03.02.15].

VROMANS, M. 2005. *Reliability of railway systems*, Erasmus Research Institute of Management (ERIM).

Tilgjengelig fra: <http://repub.eur.nl/pub/6773/> [Hentet: 05.02.15].

YUAN, J. 2006. *Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*, Eburon Uitgeverij BV.

Tilgjengelig fra:

http://www.google.no/books?hl=no&lr=&id=YMQ4kXBx2EUC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Stochastic+Modelling+of+Train+Delays+and+Delay+Propagation+in+Stations&ots=uz1DPQn6Wu&sig=irQJwzrYtHycOY_IgIhuphGmiHw&redir_esc=y - v=onepage&q&f=false ([Hentet: 02.02.15].

YUAN, J. & HANSEN, I. A. 2007. Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 202-217.

Tilgjengelig fra:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019126150600021X>

[Hentet: 08.02.15]

ÅSLAND, V. B. 2014. *Analyser av følgeforsinkelser - en litteraturstudie*. Specialization project, NTNU.

VEDLEGG

VEDLEGG A: Oppgavetekst.....	s. 121
VEDLEGG B: Eksempel – Notering av følgeforsinkelser i Excel.....	s. 125
VEDLEGG C: Saktekjøring på Kongsvingerbanen (01.03.13-31.05.13).....	s. 127
VEDLEGG D: Eksempel – Spredningstrær.....	s. 129
VEDLEGG E: Forslag til videreutvikling av KryssForsink.....	s. 131

VEDLEGG A: OPPGAVETEKST

MASTEROPPGAVE (TBA4995 Jernbane, masteroppgave)

VÅREN 2015

FOR

Student: Vegard Berglund Åsland

Analysen av følgeforsinkelser i jernbanenettverk

BAKGRUNN

Denne masteroppgaven er en videreføring av arbeidet som ble gjennomført i prosjektoppgaven ”Analyser av følgeforsinkelser – en litteraturstudie”, ved NTNU høsten 2014. Resultatene fra litteraturstudien viste et økt behov for forskning på følgeforsinkelser. Ved å analysere følgeforsinkelser kan en blant annet finne sammenhenger mellom primær- og sekundærforsinkelser, identifisere rutekonflikter og finne sårbare punkter i nettverket. Med kjennskap til dette kan det utvikles strategier for å forbedre ytelsen i henhold til ytelsesparametere som punktlighet, opptid og regularitet. Dette er igjen vesentlig for å opprettholde eller utvide den nåværende kapasitetsutnyttelsen på det norske jernbanenettverket. Når kapasitetsutnyttelsen øker, så øker også mengden sekundærforsinkelser og følgeforsinkelser mellom tog i konflikt vil opptre. Dette fenomenet har ulike karakteristikk på henholdsvis enkelt- og dobbeltspor. Premissene for sikker jernbanedrift gjør også at dette ikke er trivielt å studere i empiriske data.

OPPGAVE

Oppgaven er å etterprøve analyseteknikker for spredning av følgeforsinkelser. Herunder gjelder også tilpasning til de typer data som er tilgjengelig i norsk jernbanedrift. Dette inkluderer tilpasning og videreutvikling for norske formål og gjennomføring av en eller flere analyser.

Beskrivelse av oppgaven

Oppgaven skal omfatte følgende punkter:

- Empiriske analyser og verktøyutvikling for følgeforsinkelser i Norge.
- Gjennomføre en case-studie av følgeforsinkelser.

Målsetting og hensikt

Hensikten med masteroppgaven er å forbedre forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket. Dette skal gjøres gjennom å etterprøve, tilpasse og videreutvikle analyseteknikker for spredning av følgeforsinkelser med norske data. Målsettingen er derfor knyttet til følgende punkter:

- Etterprøve, forbedre og tilpasse eksisterende analyseverktøy for følgeforsinkelser med norske data
- Gjennomføre en egen analyse av følgeforsinkelser.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

Ved å gjennomføre denne masteroppgaven skal følgende forskningsspørsmål belyses:

1. Hvordan kan vi benytte eksisterende analysemetoder for å forbedre forståelsen av følgeforsinkelser i det norske jernbanenettverket?
2. Hvordan kan vi forbedre disse analysemetodene/-verktøyene?
3. Hva slags nytte kan oppnås ved å analysere følgeforsinkelser i Norge?

GENERELT

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

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

Besvarelsen skal inneholde

- Standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- Tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- Sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- Hovedteksten
- Oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

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

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>.

Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

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

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

(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.
Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

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

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

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

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Elias Kassa

Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: Nils Olsson (NTNU) og Andreas Dypvik Landmark (SINTEF)

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 22.01.15 (Revidert 01.04.15)

Underskrift

Faglærer

VEDLEGG B: EKSEMPEL – NOTERING AV FØLGEFORSINKELSER I EXCEL

Dato	Forsinkelsesmargin [sek]	Tog nr 1	Tog nr 2	Forsinket kryssing på stasjon	Omtrentlig tid	Tog nr 1	Tog nr 2	Forsinket kryssing på stasjon	Omtrentlig tid	Tog nr 1	Tog nr 2	Forsinket kryssing på stasjon	Omtrentlig tid
01.03.13	239	5059	1020	BLK	15:35	1022	5059	DIS	15:40				
01.03.13	239	48215	1020	RFS	15:30	1022	48215	SKA	15:35				
01.03.13	239	1018	1020	SET	15:00	1020	48215	RFS	15:30	1020	5059	BLK	15:35
01.03.13	239	1015	1018	SET	14:00	1015	52	SAN	14:15				
03.03.13	239	1079	56	DIS	21:40	1034	1079	SAN	21:50				
03.03.13	239	41603	56	SKO	20:50	1029	56	GLT	21:20	1079	56	DIS	21:40
04.03.13	239	1007	1010	DIS	10:50	1009	1010	RVN	11:10				
04.03.13	239	1013	1014	FET	13:00	1013	5054	SET	13:10				
04.03.13	239	1005	1006	FET	08:45	1005	1008	ARN	09:10				
05.03.13	239	1038	41981	RVN	03:00	1037	1038	FET	03:05				
05.03.13	239	1017	1018	RVN	14:50	1017	1020	SET	15:05				
05.03.13	239	45962	59	RVN	09:00	1054	59	SØR	09:05				
05.03.13	239	1017	1020	SET	15:05	1019	1020	RVN	15:30				
05.03.13	239	41639	52	SET	14:50	5033	52	RVN	15:05				

Figur 27: Eksempel – Notering av følgeforsinkelser i Excel

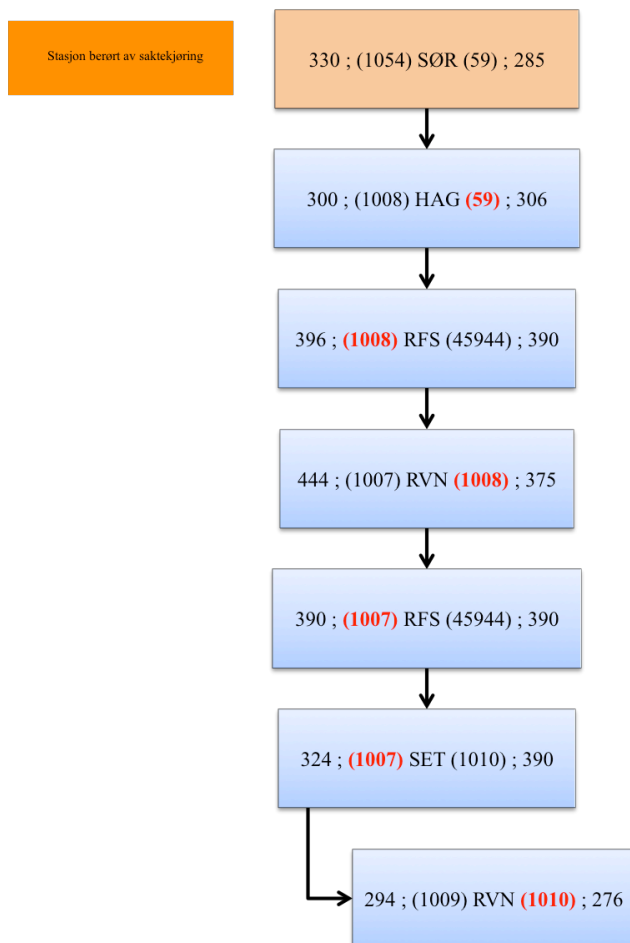
VEDLEGG C: SAKTEKJØRING PÅ KONGSVINGERBANEN (01.03.13-31.05.13)

REGISTRERTE SAKTEKJØRINGER PÅ KONGSVINGERBANEN I PERIODEN 01.MARS 2013 - 31.MAI 2013																	
ID	TID	BANEID	BANE	ÅR	UKE	FRA	TIL	FRA_KM	TIL_KM	HASTIGHET	ÅRSAK	FRA_KD	TIL_KD	UNIK	START_DATO	SLUTT_DATO	VARIGHET (DAGER)
44002	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	9	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
49104	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	10	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
46135	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	11	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
46175	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	12	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
44043	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	13	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
46250	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	14	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
30871	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	15	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
39814	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	16	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
39652	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	17	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
39669	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	18	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
39693	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	19	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
44190	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	20	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
31237	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	21	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
39780	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	22	Lillestrøm	Fetsund	21.75	22.6	40	Ustabil spor pga arbeider	LLS	FET	FALSE	25.06.12	16.06.13	357
43988	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	9	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
44009	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	10	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
50737	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	11	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
39529	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	12	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
37460	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	13	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
31894	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	14	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
53401	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	15	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
46328	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	16	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
32031	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	17	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
39667	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	18	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
31154	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	19	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
43335	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	20	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN		FALSE	04.02.13	19.05.13	105
31896	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	14	Sander		86.91	87.81	60	Ujevnt spor	SAN	TRUE	01.04.13	07.04.13	7	
46294	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	15	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	TRUE	08.04.13	09.06.13	63	
46334	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	16	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
25448	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	17	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
40577	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	18	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
31107	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	19	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
42094	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	20	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
39534	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	21	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
46626	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	22	Sander		86.9	87.8	60	Ujevnt spor	SAN	FALSE	08.04.13	09.06.13	63	
39325	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	17	Serumsand		37.28	38.23	40	Ujevnt spor	SØR	TRUE	22.04.13	16.06.13	56	
39679	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	18	Serumsand		37.28	38.23	40	Ujevnt spor	SØR	TRUE	22.04.13	16.06.13	56	
46439	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	19	Serumsand		37.28	38.23	40	Ujevnt spor	SØR	FALSE	22.04.13	16.06.13	56	
44114	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	20	Serumsand		37.28	38.23	40	Ujevnt spor	SØR	FALSE	22.04.13	16.06.13	56	
32867	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	21	Serumsand		37.28	38.23	40	Ujevnt spor	SØR	FALSE	22.04.13	16.06.13	56	
31377	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	22	Serumsand		37.28	38.23	40	Ujevnt spor	SØR	FALSE	22.04.13	16.06.13	56	
51085	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	21	Fetsund		28.2	29.8	40	Ujevnt spor	FET	TRUE	20.05.13	16.06.13	28	
32728	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	21	Årnes		58.08	58.93	40	Arbeider i spor	ÅRN	TRUE	20.05.13	09.06.13	21	
39778	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	21	Årnes		58.08	58.93	60	Arbeider i spor	ÅRN	TRUE	20.05.13	09.06.13	21	
31378	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	22	Fetsund		28.2	29.8	40	Ujevnt spor	FET	FALSE	20.05.13	16.06.13	28	
31383	OTO	B03	Kongsvingerbanen	2013	22	Årnes		58.08	58.93	40	Arbeider i spor	ÅRN	FALSE	20.05.13	09.06.13	21	

Figur 28: Saktekjøringer på Kongsvingerbanen (01.03.13-31.05.13)

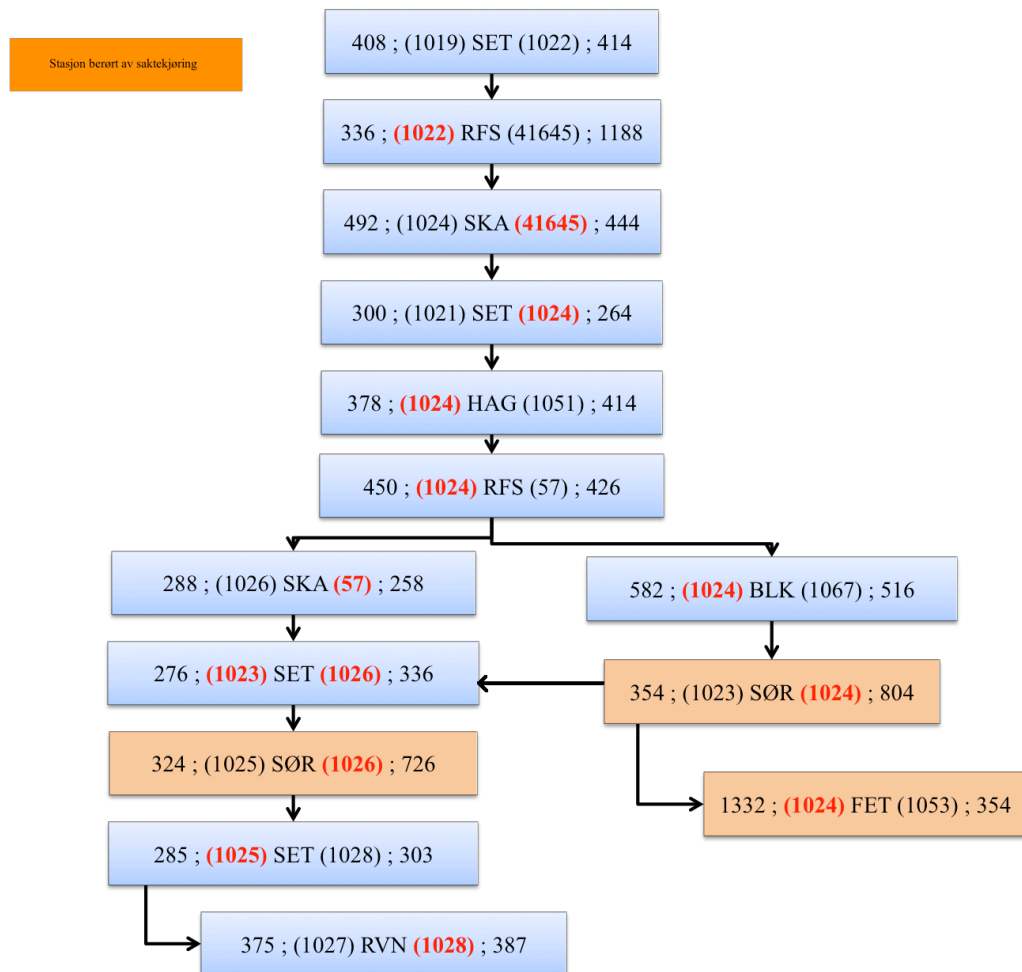
VEDLEGG D: EKSEMPEL – SPREDNINGSTRÆR

Forsinkelsestype 1: Forsinkelsen oppstår på stasjon knyttet til saktekjøring, og sprer seg videre



Figur 29: Eksempel - Spredningstre for forsinkelsestype 1

Forsinkelsestype 2: Forsinkelsen oppstår på en annen stasjon, og sprer seg videre via stasjon(er) knyttet til saktekjøring



Figur 30: Eksempel - Spredningstre for forsinkelsestype 2

VEDLEGG E: FORSLAG TIL VIDEREUTVIKLING AV KRYSSFORSINK

Videreutvikling og tilpassing

Algoritmen som er grunnlaget for KryssForsink er har mange av de samme ulempene som er knyttet til analysemetode 4. Dette gjelder spesielt at algoritmen er begrenset til det omfang og den hensikt som opprinnelig var definert for verktøyet. Det vil si spredningen av forsinkelser gjennom kryssinger på enkeltspor. Et viktig aspekt i vurderingen av videreutvikling er om algoritmen kan utvikles til å analysere dobbeltsporet jernbaneinfrastruktur. Det vil selvfølgelig også avhenge om det er et ønske om dette. Det viktigste spørsmålet vil da være hvilke betingelser som må være gjeldende for om forsinkelser sprer seg fra et tog til et annet. Her kan det være gunstig å se til de tidligere gjennomførte analysene som bruker liknende metodikk, og hva slags betingelser som brukes der. I et langsiktig perspektiv er det viktig å bygge kompetanse rundt forsinkelser på dobbeltsporet jernbane i Norge.

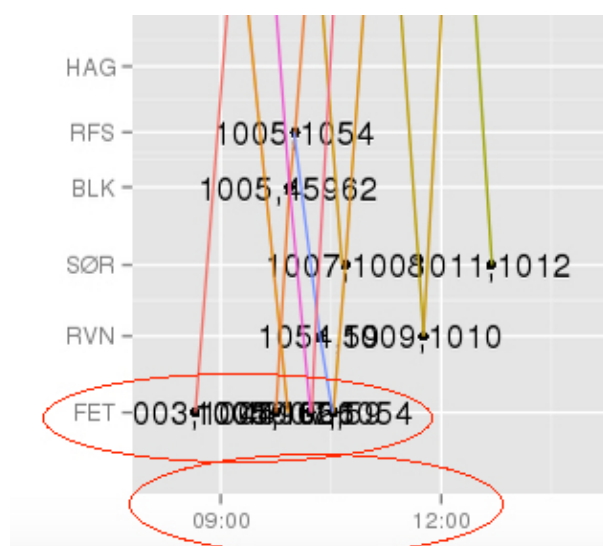
En ren videreutvikling av verktøyet for dets opprinnelige omfang og hensikt er også mulig, og kanskje det mest gunstige på kort sikt. Case-studien av Kongsvingerbanen har vært bra for å illustrere muligheter og mangler med KryssForsink. Noen av de mulige svakheter med analysen bør kunne reduseres ved tilpassning av algoritmen. Eksempelvis kan det med fordel tas hensyn til hvordan ruteplan legges, og registreringen av passeringstidspunkt på hovedsignal, og punktlighet på blokkposter.

På bakgrunn av dette foreslås følgende videreutvikling og tilpassing av KryssForsink:

- Implementere/vurdere algoritmebetingelser for spredning av forsinkelser på dobbeltspor
- Tilpassning av betingelser for spredning av forsinkelser fra blokkpost, inn-/utkjørsignal, og ruteplanlegging

Kvalitetssikring og brukergrensesnitt

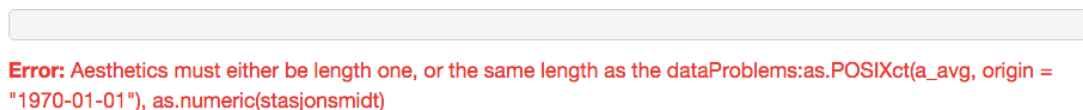
Det første som ble observert ved å analysere følgeforsinkelser i KryssForsink var problemene som oppstår ved flere forsinkelser på samme stasjon. KryssForsink er programmert slik at dersom et togpar er forsinket utover den valgte forsinkelsesmargin vil det markeres et punkt, med tilhørende togpar på hver side. Dersom det er flere forsinkede kryssinger samtidig vil disse ligge over hverandre, og hindre lesbarheten. Løsningen i dette tilfellet ble å bruke kombinasjoner av zooming, endre forsinkelsesmargin for å midlertidig fjerne enkelte togpar, eller bruke Kryssingsinteraksjon for å se på hvilke togpar som krysset den gitte datoen. Derfor er kanskje det første forbedringspotensialet til verktøyet å muliggjøre bedre lesbarhet for brukeren. En annen observasjon er gjort med hensyn til aksene i toggrafene som presenteres. Dersom forsinkelsene oppstår over flere tider på døgnet, viser x-aksen i KryssForsink tidene 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 og 00:00. Dette gjør at avlesningen av tidspunktene blir noe unøyaktig og omtrentlig. Dersom det er få forsinkelser og omtrentlig likt tidspunkt er tidsaksen derimot god. På samme måte vil KryssForsink på lengre banestrekninger, ha en y-akse som inneholder for kort avstand mellom stasjonene ifht lesbarhet. Et eksempel på disse erfaringene er vist i figur 31.



Figur 31: Eksempel - Dårlig lesbarhet i KryssForsink

Analysen som ble gjennomført er basert på en delstrekning. Spesielt for lengre banestrekninger ville det vært gunstig å kunne velge ut hvilken delstrekning en ser på, fremfor at hele strekningen vises. Dette antas også å kunne forbedre lesbarheten ifht observasjonene ovenfor. Det er derimot viktig at eventuell forsinkelsespredning som går utover den delstrekningen som er valgt ikke forsvinner, men tas med.

I forsøkene på å forbedre lesbarheten har det, som nevnt tidligere, vært forsøkt ulike forsinkelsesmarginer for å midlertidig filtrere ut togpar. I noen tilfeller oppstår det derimot feilmeldinger når forsinkelsesmarginen ikke gir resultater. Dette er antatt, og feilmeldingen beskrives ikke slik at en vanlig bruker kan forstå problemet. Et eksempel på dette er vist i figur 32.



Figur 32: Eksempel - Feilmelding i KryssForsink

Til slutt er det også en tanke at dersom en del av disse aspektene forbedres, vil mulighetene for å legge til andre funksjoner være til stede. Da vil lesbarhet eksempelvis kunne muliggjøre at forsinkelsespredning kan presenteres over mer enn én dag (slik det gjøres nå). Dette kan føre til at det er lettere å spore mønstre som oppstår, fremfor å bruke støtteverktøy som Excel for å strukturere dataene.

På bakgrunn av dette foreslås følgende forbedringer av brukergrensesnittet til KryssForsink:

- Mulighet for å midlertidig velge bort tognr. eller togpar
- Bedre akser, både for stasjon og tidsavlesning
- Mulighet for å velge ut delstrekninger (Fra: ”Stasjon”, Til: ”Stasjon”)
- Beskrivelse av feilmeldinger, som eksempelvis skyldes for stor forsinkelsesmargin
- Vise forsinkelser over en større periode enn én dag