

RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur

Klara Marie Øien Sæverud

Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)

Innlevert: juli 2017

Hovudrettleiar: Jørn Vatn, MTP

Medveileadar: Marte Mikalsen, Bane NOR

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for maskinteknikk og produksjon

Forord

Masteroppgåva er gjennomført våren 2017 som den avsluttande delen av det toårige masterprogrammet i sikkerheit, pålitelegheit og vedlikehald ved institutt for produksjon og maskinteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Arbeidet er gjennomført i samarbeid med Bane NOR, og arbeidsmengda svarar til 30 studiepoeng.

Tema for masteroppgåva er RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Sommaren 2016 hadde eg sommarjobb i Jernbaneverket, der eg erfarte at gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur kan vere utfordrande. Dette danna grunnlaget for temaet i eit fordjupingsprosjekt som eg gjennomførte hausten 2016, og vidare også for temaet i denne masteroppgåva.

Det er gått ut ifrå at lesaren av masteroppgåva har grunnleggande kunnskap om RAMS, statistikk og jernbane. Forklaring av teorien og omgrepa som er nytta i oppgåva, er likevel gjort på ein måte som forhåpentlegvis gjer oppgåva forståeleg, også for lesarar utan denne kunnskapen.

Trondheim, 2017-07-08

Klara-Marie Øien Sæverud
Klara-Marie Øien Sæverud

Anerkjenning

Eg vil takke vegleiaren min professor Jørn Vatn for god oppfølging gjennom arbeidet med masteroppgåva. Vegleiingsmøter med tilbakemeldingar, råd og innspel frå han har vore svært verdifult og viktig for resultatet av oppgåva. Eg vil også takke Marte Mikalsen frå Bane NOR som har kome med gode innspel undervegs i prosessen, sett meg i kontakt med nøkkelpersonar og hjelpt meg å få tak i nødvendige dokument og datamateriale for gjennomføring av oppgåva. Til slutt vil eg takke familie, venar og medstudentar som har vore viktige støttespelarar gjennom heile prosessen.

K.M.Ø.S.

Samandrag

Ved bygging av ny jernbaneinfrastruktur, eller betydeleg endring av eksisterande jernbaneinfrastruktur, skal det gjennomførast RAM-analysar. Slike analysar vurderer jernbaneinfrastrukturen si yting, i form av evna den har til å vere i ein tilstand der tog kan køyre som planlagt, utan at det oppstår forseinking eller kanselleringar i togtrafikken. Bane NOR er ansvarleg for den nasjonale jernbaneinfrastrukturen, og har utvikla ein metodikk for RAM-analysar. Delar av denne analysemetodikken kan vere utfordrande å gjennomføre i praksis, blant anna fordi den hovudsakleg baserar seg på ekspertvurderingar der ekspertane må fastsette dei totale konsekvensane av feil i infrastrukturen, utan å kunne støtte seg på utrekningsmodellar eller systematiserte erfaringsdata.

Målet med masteroppgåva er å kome med forslag til forbetringar til RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Som eit grunnlag for å kunne gjere dette er krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg studert, og det er gjort ein dokumentstudie av analyserapportar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar.

Analyserapportane er samanlikna med gjeldande krav og retningslinjer for RAM-analysar, ved hjelp av ein guide som er utvikla for formålet. I tillegg er det gjennomført statistiske analysar, for å vurdere muleg bruk av erfaringsdata og statistikk, på områder i RAM-analysemetodikken som i dag baserar seg på ekspertvurderingar.

Funn frå dokumentstudien stadfestar at RAM-analysemetodikken til Bane NOR har utfordringar og forbetringspotensiale. Basert på informasjon og erfaringar som er henta ut ifrå dei studerte analyserapportane er større grad av standardisering, innføring av akseptkriterium for regularitet, nærmare vurdering av metode for fastsetting av akseptkriterium, retningslinjer for handtering av usikkerheit og bruk av statistikk og erfaringsdata i større omfang enn i dag foreslått som mulege forbetringar til Bane NOR sin RAM-analysemetodikk.

Vurdering av omfang av forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur er ein sentral del av RAM-analysane til Bane NOR. TIOS og BaneData er databasar som inneheld informasjon om høvesvis forseinkingar og feil i infrastrukturen. Informasjon frå desse to databasane er kopla saman, for å kunne nytte multippel lineær regresjon til å estimere kor mykje forseinking som oppstår ved feil i jernbaneinfrastruktur. Det er utvikla to regresjonsmodellar til dette føremålet, ein modell som ser på gjennomsnittleg forseinking per tog som er forseinka, og ein

Samandrag

modell som ser på total forseinking for alle tog som er forseinka på grunn av ein feil. Forklaringsvariablane i regresjonsmodellane er nedetid ved feil, tal på tog som køyrer på strekninga, kapasitetsutnytting på strekninga, tidspunkt for feil, faggruppe objektet som har feila høyrer inn under og kva bane strekninga som analyserast høyrer til. Det er også gjort statistiske analysar som viser fordeling og sannsyn av lengde på nedetid ved feil for nokre utvalte objekttypar. Lengde på nedetid ved feil er også informasjon som er sentral for RAM-analysane.

Dei utvikla regresjonsmodellane har låg forklaringsgrad og tilfredsstillar heller ikkje alle nødvendige føresetnader for at modellane skal vere gyldige. For analysane av nedetid ved feil vil det vere nødvendig med eit større datagrunnlag for å kunne estimere nedetid for fleire objekttypar eller eventuelt feilmodar. Frå arbeidet med dei statistiske analysane kjem det også fram at det er manglar og forbettringspotensiale når det kjem til registrering av data i systema til Bane NOR, noko som truleg er med på å redusere kvaliteten på dei statistiske analysane som er gjennomført.

Masteroppgåva bidreg til å setje fokus på områder i RAM-analysemetodikken til Bane NOR med forbettringspotensiale, og viser mulege statistiske framgangsmetodar for estimering av nokre sentrale talverdiar til analysane. Implementering av forbettringsforslaga i analysemetodikken vil kunne gjere gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur enklare, skape eit likare grunnlag for analysane på tvers av prosjekt og analysegruppesamansetting samt betre kvaliteten på resultatane frå analysane.

Summary

By the construction of new railway infrastructure, or significant change of existing railway infrastructure, RAM analyses shall be carried out. Such analyses consider the performance of the railway infrastructure in terms of the ability it has to be in a state where trains can drive as planned, without the occurrence of delays or cancellations in the rail traffic. Bane NOR is responsible for the Norwegian national railway infrastructure and has developed a methodology for RAM analyses. Parts of this methodology can be challenging to carry out in practice, among other things, because it is primarily based on expert judgments where experts must determine the total consequences of infrastructure failures, without being able to rely on calculation models or systematized experience data.

The objective of this master thesis is to come up with suggestions for improvements to Bane NOR's RAM analysis methodology. As a basis for doing this, requirements and guidelines for carrying out RAM analyses for the railway infrastructure in Norway have been studied, and a document study of analysis reports from earlier performed RAM analyses has been carried out. The analysis reports are compared with current requirements and guidelines for RAM analyses using a guide that is developed for the purpose. In addition, statistical analyses have been conducted to consider possible use of experience data and statistics, in areas of the RAM analysis methodology that today are based on expert judgments.

Findings from the document study confirm that Bane NOR's RAM analysis methodology has challenges and improvement potential. Based on information and experiences that are collected from the studied analysis reports, a greater degree of standardization, introduction of acceptance criteria for regularity, closer assessment of method for setting acceptance criteria, guidelines for handling uncertainty and use of statistics and experience data to a greater extent than today is suggested as possible improvements to Bane NOR's RAM analysis methodology.

Assessment of extent of delay in the event of a failure in the railway infrastructure is an important part of Bane NOR's RAM analyses. TIOS and BaneData are databases that contain information about respectively delays and failures in the infrastructure. Information from these two databases is linked, to be able to use multiple linear regression to estimate how much delay failures in the railway infrastructure causes. Two regression models are

Summary

developed for this purpose, one model that looks at the average delay per train that are delayed, and one model that looks at the total delay for all trains that are delayed due to a failure. Explanatory variables in the regression models are downtime, number of trains, capacity utilization, what time of the day the failure occurs, subject group the object that has a failure belongs to and what line the stretch that is analysed belongs to. Statistical analyses that show the distribution and probability of downtime if a failure occurs are also conducted for selected object types. The duration of the downtime when a failure occurs is also information that is important for the RAM analyses.

The regression models that are developed have low degree of explanation, and they do not satisfy all necessary assumptions for the models to be valid. For downtime analyses a larger number of registrations is necessary to be able to estimate downtime for more object types or failure modes. Work with the statistical analyses also shows that there are shortcomings and improvement potential when it comes to registering data in Bane NOR's systems, which most likely impacts the quality of the statistical analyses that are conducted in a negative manner.

The thesis contributes to point focus on areas in Bane NOR's RAM analysis methodology that has improvement potential, and shows possible statistical approaches for estimating some key values for the analyses. Implementation of the improvement suggestions in the analysis methodology could make the conduction of RAM analyses for railway infrastructure easier, create a more equal basis for the analyses across different projects and analysis group compositions as well as improve the quality of the results from the analyses.

Innhold

Forord	i
Anerkjenning	iii
Samandrag	v
Summary	vii
Figurliste	xiii
Tabelliste	xv
1 Innleiing	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Målsettingar.....	2
1.3 Tilnærming.....	2
1.3.1 Dokumentstudie.....	3
1.3.2 Statistiske analysar.....	4
1.4 Avgrensing.....	4
1.5 Rapporten sin struktur.....	5
1.6 Omgrepsavklaringar.....	6
2 Krav og retningslinjer for RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur	7
2.1 EN 50126.....	7
2.2 Prosjektarbeid i Bane NOR.....	8
2.3 RAMS-arbeid i Bane NOR.....	8
2.3.1 RAMS-handbok.....	8
2.4 RAM-analysemetodikk.....	9
2.4.1 Omfang av analyse.....	11
2.4.2 RAM-krav.....	12
2.4.3 Systemdefinisjon.....	13
2.4.4 Overordna modell for førebyggjande vedlikehald.....	13
2.4.5 Gjennomføring av RAM-analyse.....	14
3 Dokumentstudie av RAM-analyserapportar	17
3.1 Kvantitative RAM-analysar.....	17
3.1.1 InterCity-analysane.....	19
3.1.2 Ulrikenanalysen.....	23

Innhald

3.1.3	Analysar basert på gamal RAM-analysemetodikk.....	25
3.2	Kvalitative RAM-analysar	27
3.2.1	Kvifor kvalitativ?	28
3.2.2	Kva informasjon gir analysane?	29
3.3	Oppsummering og diskusjon.....	32
3.3.1	Generell gjennomføring av analysane.....	32
3.3.2	Fastsetting av akseptkriterium.....	32
3.3.3	Bruk av formlar	33
3.3.4	Innhenting av innputt	35
3.3.5	Handtering av usikkerheit	36
3.3.6	Kvalitativ eller kvantitativ RAM-analysemetodikk	37
3.3.7	Områder for forbedring i RAM-analysemetodikken til Bane NOR.....	39
3.3.8	Evaluering av metode.....	39
4	Statistiske metodar	41
4.1	Korrelasjon	41
4.2	Multipel lineær regresjon	41
4.2.1	Minste kvadrat-metoden.....	42
4.2.2	Forklaringsgrad	43
4.2.3	Signifikanssannsyn.....	43
4.2.4	Føresetnader	44
5	Statistiske analysar.....	45
5.1	Bakgrunn	45
5.1.1	Bakgrunn for val av forklaringsvariablar	46
5.1.2	Forklaringsvariablar	47
5.2	Datainnsamling.....	48
5.2.1	TIOS	49
5.2.2	BaneData	49
5.2.3	Hendelseslogg for samankopling av informasjon	49
5.2.4	Dataomfang	50
5.3	Resultat frå analysar av nedetid ved feil	51
5.4	Resultat frå regresjonsanalysar.....	55
5.4.1	Kontroll av føresetnader.....	55
5.4.2	Modell for total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur	61

5.4.3	Modell for gjennomsnittleg forseinking per tog ved feil i jernbaneinfrastruktur	64
5.5	Bruk av funn.....	67
5.5.1	Analysar av nedetid ved feil.....	67
5.5.2	Regresjonsanalysar.....	68
5.6	Oppsummering og diskusjon.....	70
5.6.1	Resultat.....	70
5.6.2	Val av forklaringsvariablar.....	72
5.6.3	Tilgjengeleg datamateriale.....	73
5.6.4	Metode og modellar.....	74
6	Konklusjon.....	77
6.1	Vidare arbeid.....	79
	Vedlegg A: Forkortingar.....	81
	Vedlegg B: Guide for gjennomføring av dokumentstudie.....	83
	Bibliografi.....	85

Figurliste

Figur 1.1: Illustrasjon av tilnærming til oppgåva.....	3
Figur 1.2: Oversikt over strukturen i rapporten.....	5
Figur 2.1: Plassering av RAM-analysar i UPB-prosessen (tilpassa frå Bane NOR (2017i)).....	8
Figur 2.2: Oversikt over dokumenta som utgjer RAMS-handboka til Bane NOR.	9
Figur 2.3: RAM-analyseprosessen til Bane NOR (reprodusert frå Bane NOR (2017l)).	10
Figur 2.4: Utsnitt av mal for feilmodeanalyse (Bane NOR, 2017c).	14
Figur 2.5: Utsnitt av mal for konsekvensanalyse (Bane NOR, 2017c).	15
Figur 5.1: Grafisk framstilling av forholdet mellom registrerte og analyserte forseinkingar..	51
Figur 5.2: Histogram med fordeling av nedetider ved feil for (a) signal og (b) drivmaskin....	53
Figur 5.3: Histogram med fordeling av nedetider ved feil for (a) sporfelt og (b) sporgeometri.	53
Figur 5.4: Kaplan-Meier plott som viser sannsynet for at ulike objekttypar ikkje er reparert etter ei viss tid.	54
Figur 5.5: Spreiingsplott for samanhengen mellom (a) kapasitetsutnytting og total forseinking ved feil og (b) tal på tog og gjennomsnittleg forseinking per tog ved feil.	55
Figur 5.6: Residualplott for kontroll av homoeskadisitet for (a) modell for total forseinking og (b) modell for gjennomsnittleg forseinking per tog.	56
Figur 5.7: Residualplott for kontroll av homoeskadisitet med logaritmisk transformasjon av responsvariabel for (a) modell for total forseinking og (b) modell for gjennomsnittleg forseinking per tog.	57
Figur 5.8: Residualplott (a) og histogram (b) for kontroll av føresetnaden om normalfordeling av residualar for regresjonsmodell for total forseinking.	59
Figur 5.9: Residualplott (a) og histogram (b) for kontroll av føresetnaden om normalfordeling av residualar for regresjonsmodell for gjennomsnittleg forseinking per tog.	59
Figur 5.10: Residualplott (a) og histogram (b) for kontroll av føresetnaden om normalfordeling av residualar for regresjonsmodell for total forseinking, med logaritmisk transformasjon av responsvariabel.	60

Tabelliste

Tabell 1.1: Forklaring av viktige omgrep i rapporten.	6
Tabell 2.1: Formlar til bruk i RAM-analysar (Bane NOR, 2017c).	16
Tabell 3.1: Oversikt over studerte analyserapportar frå kvantitative RAM-analysar.	18
Tabell 3.2: Kort presentasjon av hovudfunn frå dokumentstudien av InterCity-analysane.	19
Tabell 3.3: Kort presentasjon av hovudfunn frå dokumentstudien av Ulrikenanalysen.	23
Tabell 3.4: Kort presentasjon av hovudfunn frå dokumentstudien av analysar basert på gamal RAM-analysemetodikk.	25
Tabell 3.5: Oversikt over studerte analyserapportar frå kvalitative RAM-analysar.	27
Tabell 3.6: Kort oversikt over grunngjeving for val av kvalitativ RAM-analysemetodikk.	28
Tabell 3.7: Kort oversikt over kva informasjon dei studerte kvalitative RAM-analysane gir.	29
Tabell 5.1: Sentralmål for nedetid ved feil for utvalte objekttypar.	52
Tabell 5.2: Korrelasjonsmatrise for kontroll av multikollinearitet.	58
Tabell 5.3: Resultat frå regresjonsanalyse av total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur.	62
Tabell 5.4: Resultat frå regresjonsanalyse av gjennomsnittleg forseinking per tog ved feil i jernbaneinfrastruktur.	65

1 Innleiing

1.1 Bakgrunn

Det stillast krav for handtering av pålitelegheit, tilgjengelegheit, vedlikehaldbarheit og sikkerheit (RAMS) ved utbygging, drift og vedlikehald av jernbaneinfrastruktur. Bane NOR har ansvar for den nasjonale jernbaneinfrastrukturen, og derunder også at nødvendige RAMS-krav blir ivareteke. Ein del av RAMS-arbeidet til organisasjonen inkluderer gjennomføring av RAM-analysar, der tilgjengelegheit til jernbaneinfrastruktur blir vurdert. Tilgjengelegheit er systemet si evne til å vere i ein tilstand der det kan oppfylle kravd funksjon (EN 13306, 2010). For å oppnå høg tilgjengelegheit må systemet, som i dette tilfellet er jernbaneinfrastrukturen, ha høg pålitelegheit og vedlikehaldbarheit. Pålitelegheit er evna systemet har til å oppfylle kravd funksjon, mens vedlikehaldbarheit er evna systemet har til å oppretthalde eller vinne tilbake til ein tilstand der kravd funksjon kan utførast (EN 13306, 2010). Kravd funksjon er i dette tilfellet at tog skal kunne køyre som planlagt på jernbaneinfrastrukturen, utan at det oppstår forseinking eller kanselleringar i togtrafikken. Sikkeheit, som også inngår i akronymet RAMS, blir ikkje vurdert i ei RAM-analyse.

RAM-analysar blir typisk gjennomført under planlegginga av eit prosjekt for å føresjå ytinga til eit jernbanesystem, i tillegg til å gi eit grunnlag for forbedring og optimalisering av systemet (Pistolas og Vernon, 2016). For å følgje retningslinjene til Bane NOR for gjennomføring av RAM-analysar skal analysane gjennomførast kvantitativt, med ein metodikk som krev inputtdata som i stor grad baserar seg på ekspertvurderingar. I praksis har desse vurderingane vist seg å kunne vere utfordrande å gjere, noko som har resultert i at RAM-analysar tidlegare har blitt gjennomført med ulike tilnærmingar til både kvantitativ og kvalitativ analysemetodikk. I Jernbaneverket (2015c) er utfordringar og mulegheiter for RAM-analysemetodikken til Bane NOR kort diskutert, og ei av utfordringane som blir trekt fram er estimering av forseinking, noko som er foreslått å løyse med bruk av modelleringsverktøy.

Hausten 2016 gjennomførte underteikna eit fordjupingsprosjekt, Sæverud (2016), med tilgjengelegheitsmodellering for jernbaneinfrastruktur som tema. Tanken var å teste om slik modellering kunne brukast ved gjennomføring av RAM-analysar i Bane NOR. Eksisterande metodar for tilgjengelegheitsmodellering for både jernbaneinfrastruktur og andre nettverkssystem blei undersøkt gjennom ein litteraturstudie. Frå litteraturstudien kom det fram

Kapittel 1. Innleiing

at litteratur som omhandlar RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur ikkje er veldig omfattande, og det blei ikkje avdekka ei metode for tilgjengelegheitsmodellering som kunne nyttast direkte i Bane NOR sine RAM-analysar. Likevel blei det i fordjupingsprosjektet utvikla ein enkel modell ved hjelp av programmering, for å kunne estimere forseinking for tog ved feil i jernbaneinfrastruktur. Det å utvikle denne modellen vidare er vurdert til å krevje både kunnskap og arbeidsmengde utover det som er muleg å få til i ei masteroppgåve, og tilnærminga til masteroppgåva er difor litt anna.

I tillegg til modellering kan analytiske formlar eller statistiske analysar nyttast til å estimere forseinking i togtrafikken (Mattsson, 2007). Bane NOR har fleire system for registrering av erfaringsdata, med informasjon om blant anna forseinkingar og vedlikehald av den nasjonale jernbaneinfrastrukturen. Slike registreringar opnar opp for gjennomføring av statistiske analysar og det er tenkeleg at RAM-analysar i Bane NOR, i større grad enn i dag, kan basere seg på statistikk i tillegg til ekspertvurderingar.

1.2 Målsettingar

Det overordna målet for masteroppgåva er å foreslå forbetringar til RAM-analysemetodikken til Bane NOR. For å kunne gjere dette inngår følgjande delmål i oppgåva:

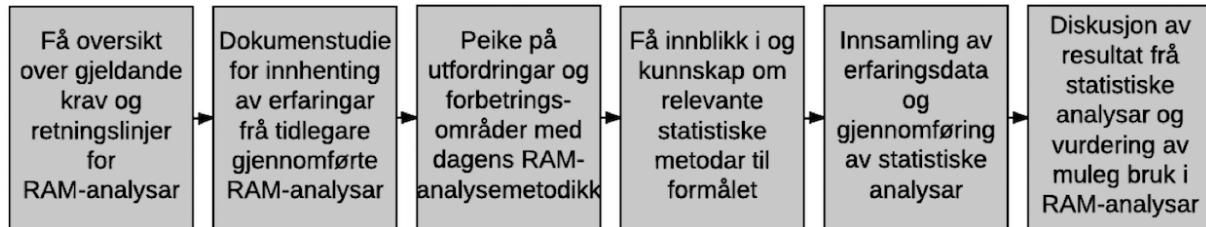
1. Få oversikt over gjeldande krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg.
2. Hente inn erfaringar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar for Bane NOR.
 - Korleis er dei gjennomført?
 - Kvar ligg utfordringane?
3. Få innblikk i om, og i så fall korleis, meir omfattande bruk av statistiske metodar kan nyttast til å støtte kvantifisering i RAM-analysar.

1.3 Tilnærming

For å svare på det fyrste delmålet i masteroppgåva er det gjort ein gjennomgang av styringsdokument for Bane NOR som omfattar krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar. Det er også gjort ein gjennomgang av sentrale dokument som desse krava og retningslinjene baserar seg på. Vidare er det, for å kunne svare på det andre delmålet i oppgåva, gjennomført ein dokumentstudie av RAM-analyserapportar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar. Basert på erfaringar frå desse analysane er det peika på utfordringar og forbetningsområder i RAM-analysemetodikken til Bane NOR. I det tredje

delmålet er det fokusert på eit av dei mulege forbettringsområda til analysemetodikken. For å svare på dette delmålet er det henta inn erfaringsdata og gjennomført statistiske analysar for estimering av sentrale verdiar for RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Som grunnlag for å gjennomføre dei statistiske analysane er teori om relevante statistiske metodar studert.

Tilnærminga til oppgåva er illustrert i Figur 1.1.



Figur 1.1: Illustrasjon av tilnærming til oppgåva.

1.3.1 Dokumentstudie

Dokumentstudie blir av Tjora (2012) brukt om studie av dokument som vanlegvis er produsert for andre formål enn forskning. Grønmo (2004) beskriv metoden som ei kvalitativ innhaldsanalyse av tekstdata, for å få fram viktige samanhengar og relevant informasjon om dei fenomenene ein ønskjer å studere. Analysen har som mål å gjere det muleg for ein lesar å få auka kunnskap om eit saksområde, utan sjølv å måtte gå gjennom alle dokumenta som er studerte (Tjora, 2012).

Utvalet av dokument som er studert i denne masteroppgåva er basert på kva som har vore muleg å få tak i av analyserapportar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar for Bane NOR. Det er gjennomført søk etter relevante dokument i Bane NOR sitt elektroniske arkiv Proarc, ved hjelp av søkeorda "RAMS", "RAM" og "analyse". Søket ga godt over 400 treff, men det har ikkje vore muleg å gå gjennom alle desse. Derimot har det, basert på tittelen til dokumenta, blitt plukka ut dokument som har verka relevante for oppgåva.

Framgangsmetoden har gjort at nokre av dokumenta som er plukka ut har vist seg å likevel ikkje vere relevante, og desse er det ikkje gått nærmare inn på. Det kan også tenkast at relevante dokument kan ha blitt oversett på grunn av inntrykket tittelen til dokumentet ga. Fleire av dokumenta som utifrå søket blei plukka ut som relevante har ikkje vore muleg å hente ut ifrå arkivet, då dei har vore merka som enten "under arbeid" eller "utgått". Totalt er analyserapportar frå femten RAM-analysar studert, og innhaldet i analyserapportane er kvalitativt analysert og samanlikna med Bane NOR sine krav og retningslinjer for

gjennomføring av RAM-analysar. For å sikre struktur i gjennomgangen av analyserapportane er det utvikla ein guide for gjennomføring av dokumentstudien, sjå vedlegg B.

1.3.2 Statistiske analysar

Statistikk blir brukt som hjelpemiddel til å trekke slutningar i situasjonar der noko er uføreseieleg eller tilfeldig (Løvås, 2004). I denne oppgåva er statistikk nytta som eit hjelpemiddel til estimering av forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur og lengde på nedetid ved feil, som er sentrale verdiar i RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur.

Data er nødvendig for å gjennomføre statistiske analysar, og for å få tilstrekkeleg nøyaktigheit frå ei analyse er det viktig at utvalstorleiken som analyserast er stor nok (Hansen og Pachl, 2008). Nytt datamateriale i dei statistiske analysane i oppgåva baserar seg på uttrekk av informasjon frå Bane NOR sine system for registrering av operasjonelle data. Då underteikna ikkje har djup innsideforståing for desse systema har det vore litt arbeid å finne ut kva informasjon som har vore relevant å hente ut ifrå systema, samt korleis dette kunne gjerast på ein best muleg måte. Gjennom samtalar med personar med erfaring frå systema har det kome fram at kvaliteten på registrert data kunne vore betre. Samtidig har det kome fram at det har vore ei forbetring i registreringane dei siste åra, og omfanget av datamaterialet som er nytta i dei statistiske analysane er difor avgrensa til registreringar frå år 2015 og 2016. Det er samla inn erfaringsdata frå heile det norske jernbanenettet, og programvarane Excel og SPSS er nytta til behandling av innhenta datamateriale og gjennomføring av dei statistiske analysane.

1.4 Avgrensing

Masteroppgåva avgrensar seg til å omhandle RAM-analysar for den nasjonale jernbaneinfrastrukturen. Sjølv om Bane NOR har ansvar for denne, leiger dei også inn konsulenttenester frå andre selskap. Arbeid gjennomført av ulike selskap er difor studert i oppgåva, men Bane NOR sine retningslinjer er gjeldande uavhengig av kven som har gjennomført analysane.

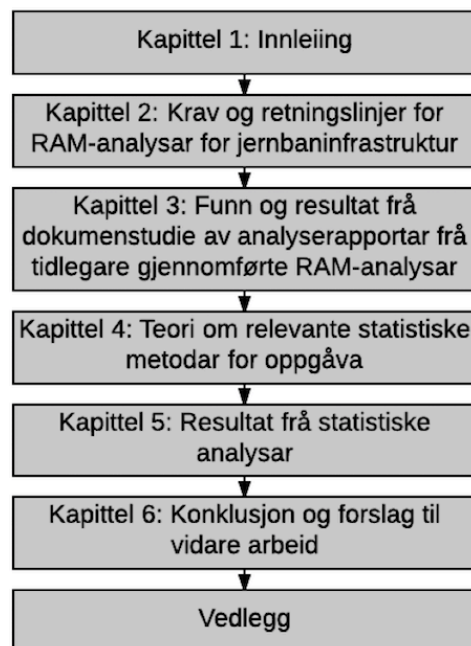
Då det i Sæverud (2016) blei avdekka at litteraturen som omhandlar RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur ikkje er særleg omfattande, er det valt å ikkje gjere eit vidare litteraturstudie innanfor dette temaet i masteroppgåva. I staden for er det retta meir fokus på gjennomføring av eigne analysar i oppgåva.

På grunn av avgrensa tid til gjennomføring av oppgåva har det ikkje vore muleg å gjennomføre statistiske analysar på alle felt som kan vere nyttig for RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Omfanget av dei statistiske analysane er difor avgrensa til å hovudsakleg omfatte analysar av forseinking, i tillegg til enkle analysar av lengde på nedetid ved feil i jernbaneinfrastruktur. Forseinking i togtrafikken kan oppstå av ulike grunnar, men i dei statistiske analysane er det berre fokusert på forseinking ved feil i infrastrukturen, då det er dette som er i fokus i RAM-analysane til Bane NOR. Feil i infrastrukturen omfattar her feil relatert til faggruppene signal, overbygning, underbygning, lågspenning, høgspenning og tele.

1.5 Rapporten sin struktur

Resten av rapporten er organisert som følgjande. Kapittel 2 gir ei oversikt over gjeldande krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar. I kapittel 3 er funn og resultat frå dokumentstudien av analyserapportar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar presentert, og mulege forbetringar til dagens RAM-analysemetodikk er foreslått. Kapittel 4 gir eit teoretisk grunnlag for dei statistiske analysane som er gjennomført i oppgåva. I kapittel 5 er bakgrunn, framgangsmetode og resultat frå dei statistiske analysane presentert og diskutert.

Konklusjonen frå arbeidet, samt forslag til vidare arbeid, er presentert i kapittel 6. Vedlegg A gir ei oversikt over forkortingane som er nytta i rapporten. Ei enkel oversikt over strukturen i rapporten er vist i Figur 1.2.



Figur 1.2: Oversikt over strukturen i rapporten.

1.6 Omgrepsavklaringar

I Tabell 1.1 er omgrep som utan nærmare forklaring er nytta vidare i rapporten forklart.

Tabell 1.1: Forklaring av viktige omgrep i rapporten.

Omgrep	Forklaring
Forseinking	Tog som kjem til endestasjonen fire minutt eller seinare etter oppsett ruteplan er forseinka (for langdistansetog er grensa seks minutt eller seinare) (Bane NOR, 2017j). Tog som ikkje er forseinka er punktlege.
Følgjeforseinking	Forseinking som skuldast at eit anna tog er forseinka (Olsson, et al., 2015).
Logistisk forseinking	Den samla tida der det ikkje kan utførast vedlikehald i påvente av at kravde vedlikehaldsressursar framskaffast, unntatt eventuelle administrative forseinkingar (EN 13306, 2010).
Nedetid	Det tidsintervallet ei eining er i ein tilstand som karakteriserast enten av ein feil, eller ved manglande evne til å oppfylle kravd funksjon under førebyggjande vedlikehald (EN 13306, 2010).
Objekt	Del, komponent, innretning, delsystem, funksjonell eining, utstyr eller system som kan beskrivast og vurderast individuelt, omtalt som eining i EN 13306 (2010).
Oppetid	Blir brukt for å beskrive forseinkingsnivået i togtrafikken og reknast ut som tal på planlagde togtimar, fråtrekt tal på forseinkingstimar forårsaka av forhold i jernbaneinfrastrukturen, i prosent av planlagde togtimar (Bane NOR, 2017l).
Primærforseinking	Forseinking som har ei direkte årsak (Olsson, et al., 2015).
Regularitet	Talet på tog som blir køyrt som planlagt i rutetabellane, når ein ser vekk ifrå tog som lang tid i førevegen er planlagt innstilt som følgje av arbeid på sporet (Bane NOR, 2017j).
Synergi	Bane NOR sitt system for avvikshandtering, der uønskte hendingar på jernbanen blir registrert (Bane NOR, u.å.).
Teknisk regelverk	Samlenemning for normalar innanfor dei ulike jernbanetekniske fagområda til Bane NOR, og eit viktig styringsverktøy og hjelpemiddel ved utforming, bygging og dimensjonering av jernbaneanlegg (Bane NOR, 2017k).

2 Krav og retningslinjer for RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur

Dette kapitlet omhandlar gjeldande krav og retningslinjer for RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg. RAMS-arbeidet til Bane NOR baserar seg på prosesstandarden EN 50126 (1999), og kapitlet startar med ein kort introduksjon til denne standarden og kva den seier om RAM-analysar. Vidare i kapitlet er RAMS-arbeidet til Bane NOR, med fokus på metodikk for gjennomføring av RAM-analysar, presentert.

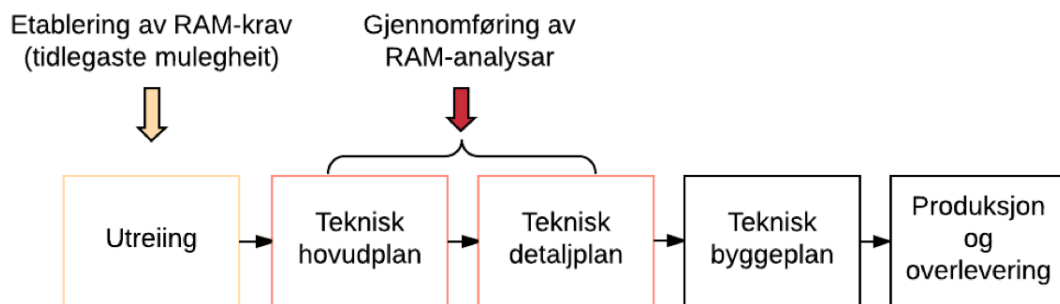
2.1 EN 50126

EN 50126 (1999) er ein standard for spesifikaasjon og demonstrasjon av RAMS for jernbaneapplikasjonar. Standarden gir retningslinjer for handtering av RAMS gjennom heile livssyklusen til eit jernbanesystem. Livssyklusen inneheld ulike fasar med mål, innputt, krav og leveransar. I kvar fase er det delt inn i generelle oppgåver, RAM-relaterte oppgåver og sikkerheitsrelaterte oppgåver.

Som ei av dei RAM-relaterte oppgåvene som er lista i EN 50126 (1999) er det stilt krav til gjennomføring av ei innleiande RAM-analyse i ei tidleg fase av eit prosjekt. Bortsett frå dette er ikkje krav til gjennomføring av RAM-analysar direkte nemnt i standarden. Likevel er RAM-analysar foreslått som eit av fleire passende verktøy for å gjennomføre og administrere eit RAMS-program, samansett av ein sikkerheitsplan og eit RAM-program. EN 50126 (1999) definerer ein sikkerheitsplan og eit RAM-program som eit dokumentert sett av tidsplanlagde aktivitetar, ressursar og hendingar som tener til å implementere organisasjonsstruktur, ansvarsområder, prosedyrar, aktivitetar, evnar og ressursar som til saman sikrar at gitte RAM-krav, eller sikkerheitskrav, vil tilfredsstillast i eit prosjekt. Det er sikkerheitsplanen og RAM-programmet som, når effektivt gjennomført, gir tillit i evna til å oppnå samsvar med RAMS-krav for det endelege systemet (EN 50126, 1999). For å kunne nytte RAM-analysar som verktøy i denne samanheng er det i følge EN 50126 (1999) fundamentalt å ha tilgjengelegheit til støttande statistisk pålitelegheitsdata, som til dømes feilrate og reparasjonsrate, samt operasjonelle data, som til dømes feilmodar, for komponentane som er brukt i eit design.

2.2 Prosjektarbeid i Bane NOR

UPB-prosessen er Bane NOR sin prosess for utreiing, planlegging og bygging av jernbaneinfrastruktur. Prosessen er delt inn i ulike prosjektfasar. Figur 2.1 viser dei ulike prosjektfasane i UPB-prosessen, og peikar på kvar i prosessen arbeidet med RAM-analysar skal gjerast. Frå figuren ser ein at RAM-analysar skal gjennomførast i prosjektfasane hovudplan og detaljplan, mens etablering av RAM-krav kan starte allereie i utreiingsfasen til prosjekta.



Figur 2.1: Plassering av RAM-analysar i UPB-prosessen (tilpassa frå Bane NOR (2017i)).

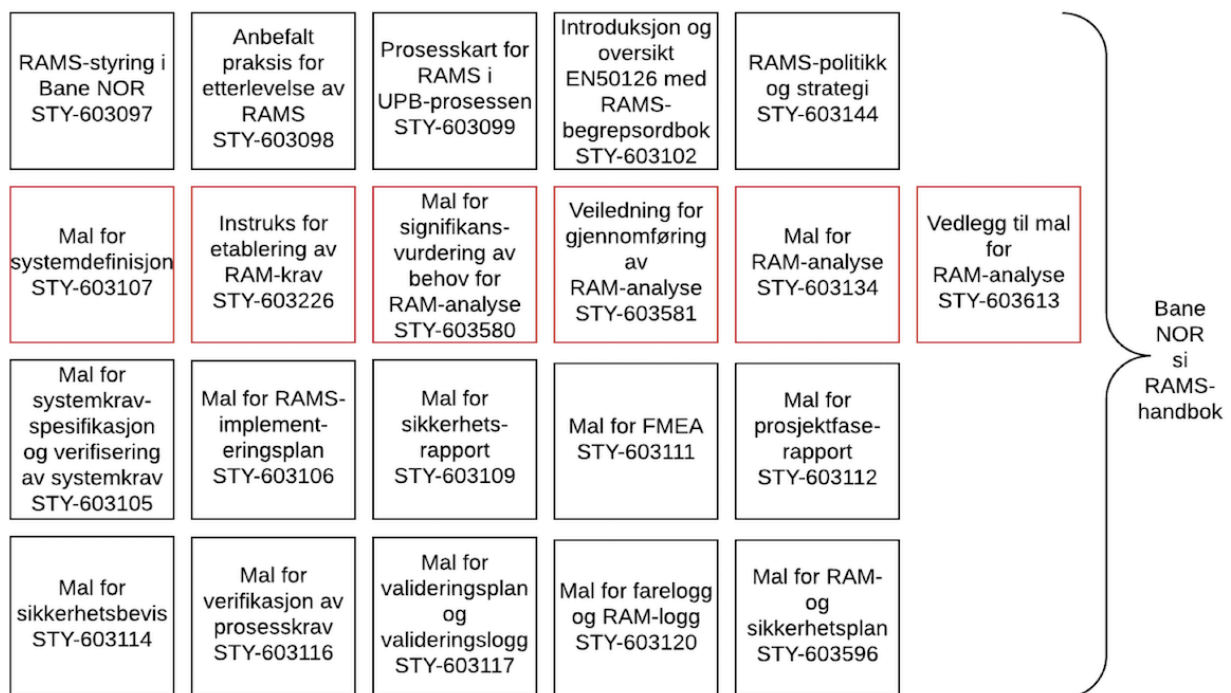
2.3 RAMS-arbeid i Bane NOR

Bane NOR sitt RAMS-arbeid skal sikre at jernbaneinfrastruktur blir planlagt, prosjektert, bygd og vedlikehalde på ein slik måte at den bidreg til at måla til sikkerheit, punktlegheit og regularitet blir nådd (Bane NOR, 2017h). I § 3-1 i *Jernbaneinfrastrukturforskriften* (2011) er det stilt krav om at EN 50126 (1999) skal følgjast ved bygging av ny jernbaneinfrastruktur og ved endring av programmerbare tekniske system, samt ved utvikling og endring av STM-einingar. Ei STM-eining, eller særskilt overføringseining, er rekna som ein del av signalanlegget til jernbanen og er plassert i toget for å oversette informasjon frå system i jernbaneinfrastrukturen til togkontrollsystemet (Jernbaneinfrastrukturforskriften, 2011). Ved endringar av jernbaneinfrastruktur som ikkje omfattar programmerbare tekniske system, STM-einingar eller bygging av ny infrastruktur skal infrastrukturførevaltar vurdere og dokumentere om endringa er av ein slik karakter at bruk av EN 50126 (1999) er hensiktsmessig (Jernbaneinfrastrukturforskriften, 2011).

2.3.1 RAMS-handbok

For å gi ei enkel og forståeleg oversikt over dei viktigaste aktivitetane EN 50126 (1999) krev utført, har Bane NOR utarbeida ei RAMS-handbok (Bane NOR, 2017g). Handboka er

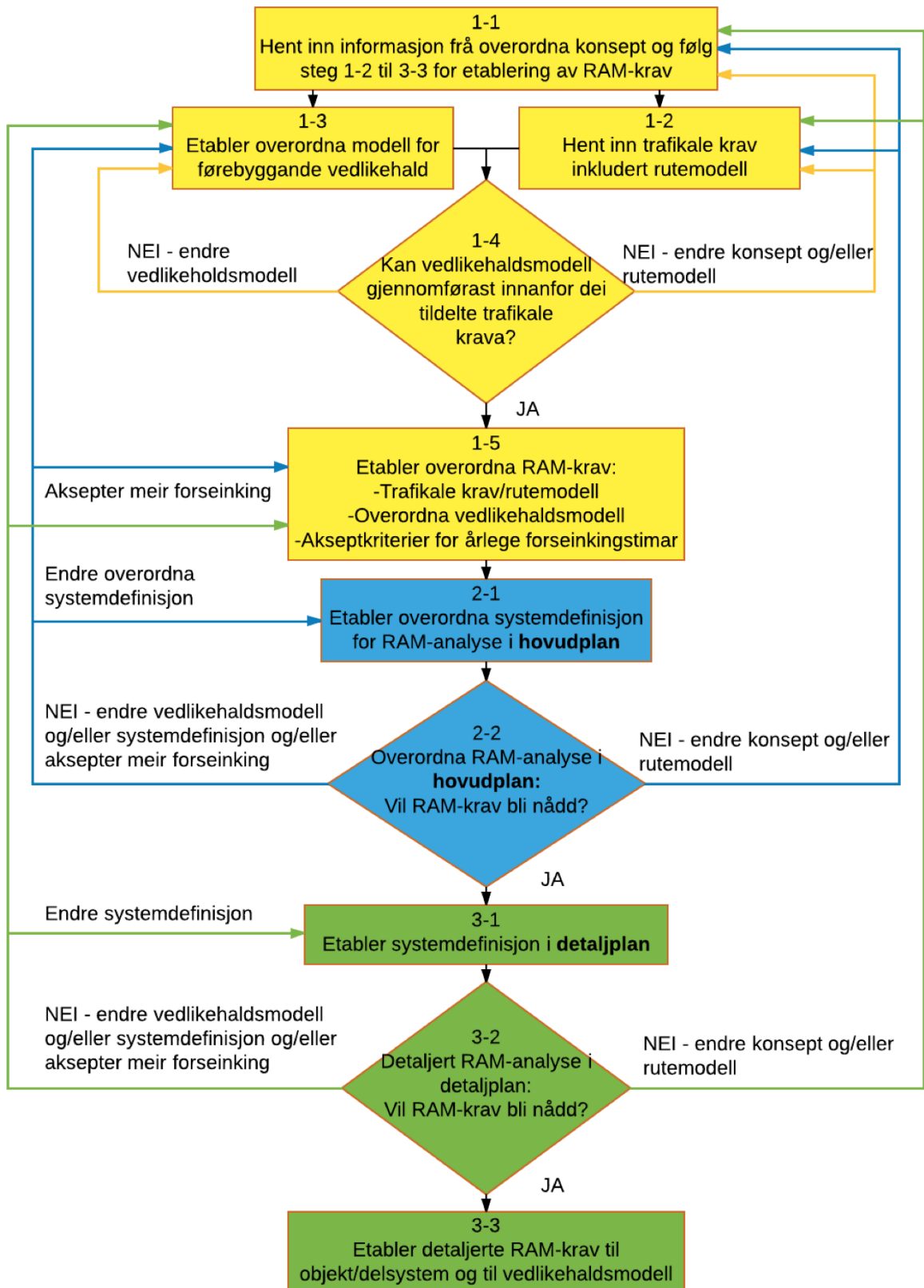
sentral for RAMS-arbeidet til organisasjonen, og inneheld styringsdokument og malar for gjennomføring av RAMS-relaterte arbeidsoppgåver. Fleire av dokumenta i handboka omhandlar RAMS-arbeid for jernbaneinfrastruktur generelt. I tillegg fokuserer nokre av dokumenta hovudsakleg på sikkerheit, mens andre har fokus på RAM. Som foreslått i EN 50126 (1999) baserar RAMS-handboka seg på at RAM-analysar skal brukast som verktøy for å tilfredsstille nokre av krava i standarden. Figur 2.2 viser dei ulike dokumenta som inngår i RAMS-handboka, der dei mest sentrale dokumenta for RAM-analysar er markert med raudt. Det er desse dokumenta som er fokusert på vidare i kapitlet og Bane NOR (2017), ”Veiledning for gjennomføring av RAM-analysar”, er via størst merksemd.



Figur 2.2: Oversikt over dokumenta som utgjer RAMS-handboka til Bane NOR.

2.4 RAM-analysemetodikk

Som vist i Figur 2.2 er det fleire dokument som står i forhold til kvarandre ved gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Til saman skal dokumenta leie fram mot ein god prosess for å identifisere RAM-krav for jernbaneprojekt og dokumentere måloppnåing for desse krava (Bane NOR, 2017). Prosessen med å identifisere nødvendige RAM-krav og validere måloppnåing er vist som ein trinnvis prosess i Figur 2.3. Vidare i kapitlet er denne prosessen nærmare forklart.



Figur 2.3: RAM-analyseprosessen til Bane NOR (reprodusert frå Bane NOR (2017)).

2.4.1 Omfang av analyse

Det fyrste steget i RAM-analysemetodikken til Bane NOR er å hente inn informasjon om overordna konsept, for så å bestemme nødvendig omfang av RAM-analyse for prosjektet. Dette blir gjort i steg 1-1 i Figur 2.3. Jernbaneprosjekt kan variere mykje i både storleik og kompleksitet (Bane NOR, 2017l), noko det er teke høgde for i krav til gjennomføring av RAM-analysar. I RAMS-handboka til Bane NOR er det delt inn i fire ulike prosjektkategoriar som skal gjere det muleg å vurdere nødvendig omfang av ei RAM-analyse for eit prosjekt. Dei ulike prosjektkategoriene er: (Bane NOR, 2017l)

1. Strekningar der det skal gjennomførast total utbygging av ny jernbaneinfrastruktur.
2. Total fornying av eksisterande jernbaneinfrastruktur.
3. Prosjekt som omfattar ein del av ei strekning, men er ein del av ein serie med prosjekt som på sikt vil fornye strekninga totalt.
4. Fornyng eller oppgradering som er av ein slik karakter at val av løysingar og/eller modell for vedlikehald har ein signifikant påverknad på oppetida til strekninga.

For prosjektkategori 1, 2 og 3 skal det i følgje Bane NOR (2017l) gjennomførast fullstendig RAM-analyse i tråd med gjeldande retningslinjer. Dette omfattar stega i Figur 2.3 frå start til slutt, og inneber at det skal gjennomførast vedlikehaldsanalyse, overordna RAM-analyse og detaljert RAM-analyse for prosjektet. Prosjekt som fell under prosjektkategori 4 må gjennom ei signifikansvurdering for å avgjere nødvendig omfang av RAM-analyse for prosjektet. Signifikansvurderinga baserar seg på tre overordna spørsmål om målsettingar for strekninga, omfang av planlagt vedlikehald og valmulegheiter for strekninga med omsyn til designløysingar og beredskap, og blir forklart i Bane NOR (2017f), ”Mal for signifikansvurdering av behov for RAM-analyse”. Utifrå svaret på dei overordna spørsmåla gir Bane NOR (2017f) ein vegleiande konklusjon på om fullstendig, delvis eller inga RAM-analyse skal gjennomførast for prosjektet. Alt etter resultatet frå signifikansvurderinga kan ei delvis RAM-analyse omfatte enten gjennomføring av vedlikehaldsanalyse (steg 1-1 til 1-4 i Figur 2.3) eller gjennomføring av overordna og detaljert RAM-analyse (steg 1-5 til 3-3 i Figur 2.3). Dersom konklusjonen frå signifikansvurderinga er at det ikkje skal gjennomførast RAM-analyse for prosjektet kan dette vere enten fordi prosjektet er vurdert til å ikkje påverke RAM-forholda på den aktuelle strekninga negativt, eller fordi det ikkje føreligg reelle valmulegheiter for gjennomføring av prosjektet (Bane NOR, 2017f). For prosjekt som ikkje

fell inn under nokon av prosjektkategoriene som er lista opp over, er det ikkje krav til gjennomføring av RAM-analyse (Bane NOR, 2017l).

2.4.2 RAM-krav

Etablering og validering av RAM-krav skal gjerast i fleire omgangar i RAM-analysemetodikken til Bane NOR. RAM-krava blir i Bane NOR (2017l) delt inn i overordna krav, foreløpige krav og detaljerte krav. Innhald og detaljeringsnivå for krava varierer, alt etter når i prosjektet dei blir etablert. Overordna RAM-krav blir etablert gjennom steg 1-1 til 1-5 i Figur 2.3. Krava omfattar: (Bane NOR, 2017l)

- Trafikale krav, derunder ein framtidig rutemodell
- Krav til maksimalt tal på årlege forseinkingstimar
- Ein overordna vedlikehaldsmodell

Dei overordna RAM-krava skal validerast gjennom ei overordna RAM-analyse i steg 2-1 og 2-2 i Figur 2.3, og basert på dette blir foreløpige RAM-krav etablert. Dette skal gjerast i hovudplanfasa til prosjektet, og analysen skal utførast på delsystemnivå (Bane NOR, 2017l). I Bane NOR (2017e) er eit delsystem definert som ein del av eit system som utfører ein spesialisert funksjon, og overbygning samt sporveksel er gitt som døme på delsystem.

Foreløpige RAM-krav omfattar: (Bane NOR, 2017l)

- Krav til tilgjengelegheit for delsystema på strekninga
- Krav til utrykkings- og reparasjonstider i forbindelse med feilretting
- Krav til kvalitetsklassar (med omsyn til farta det skal køyrast med på strekninga), overbygningsklassar (med omsyn til type trafikk som skal køyre på strekninga) og risikoklassar¹ for over- og underbygning

Detaljerte RAM-krav blir etablert i ei detaljert RAM-analyse i steg 3-1 og 3-2 i Figur 2.3. Dette skal gjerast i detaljplanfasa til prosjektet, og analysen skal utførast på komponentnivå (Bane NOR, 2017l). I Bane NOR (2017e) er ein komponent definert som ein sjølvstendig del av eit system eller delsystem og drivmaskin, som er ein del av ein sporveksel, er gitt som døme på ein komponent. Detaljerte RAM-krav omfattar: (Bane NOR, 2017l)

- Endelege krav til tilgjengelegheit for system, delsystem og komponentar på strekninga

¹ Dette kravet går ut i revidert versjon av Bane NOR (2017l), "Veiledning for gjennomføring av RAM-analyser".

- Endelege krav til reparasjons- og utrykkingstider i forbindelse med feilretting

Av Figur 2.3 ser ein at dersom det gjennom vedlikehaldsanalyse og RAM-analysar kjem fram at RAM-krav ikkje blir tilfredsstilt av prosjektet, må det gjerast endringar. Dette kan vere endringar i konsept, rutemodell, vedlikehaldsmodell, systemdefinisjon eller i grad av akseptert forseinking for prosjektet. I følgje Bane NOR (2017l) vil slike endringsforslag typisk være gjenstand for kost/nytte-vurderingar, og vurdering av kva som er kostnadsdrivande skal ta omsyn til livslaupskostnadar. Valideringsprosessen av RAM-krav er nærmare forklart i delkapittel 2.4.4 og 2.4.5.

2.4.3 Systemdefinisjon

Før ei RAM-analyse kan gjennomførast skal det utarbeidast ein systemdefinisjon som grunnlag for analysen (Bane NOR, 2017l). Dette blir gjort i steg 2-1 og 3-1 i Figur 2.3. Formålet med systemdefinisjonen er å gi alle som deltek i utvikling eller endring av eit system ei felles forståing av systemet, korleis det skal nyttast og grensesnitt mot tilliggande system (Bane NOR, 2017d). Det er forventa at systemdefinisjonen skildrar system, komponentar og funksjonar som kan påverke togframføringa på den aktuelle strekninga (Bane NOR, 2017l). Fyrste utkast av systemdefinisjonen skal utarbeidast seinast i hovudplanfasa til prosjektet, og deretter oppdaterast etterkvart som ein får meir informasjon om systemet (Bane NOR, 2017d).

2.4.4 Overordna modell for førebyggjande vedlikehald

Som ein del av RAM-analyseprosessen til Bane NOR skal det gjennomførast ei vedlikehaldsanalyse. Dette blir gjort for å vurdere om det er muleg å gjennomføre nødvendig førebyggjande vedlikehald, utan å påverke rutemodell og oppetid negativt, på strekninga som analyserast (Bane NOR, 2017l). Vedlikehaldsanalysen omfattar etablering av ein overordna modell for førebyggjande vedlikehald (steg 1-3 i Figur 2.3), samt validering av denne modellen (steg 1-4 i Figur 2.3). Ved etablering av vedlikehaldsmodellen skal det, for å estimere strekninga sitt totale behov for vedlikehald, samlast inn informasjon om vedlikehaldsaktivitetar for systema på strekninga som analyserast (Bane NOR, 2017l). Vidare skal det vurderast om vedlikehaldsmodellen kan gjennomførast innanfor tildelte trafikale krav, som er henta inn i steg 1-2 i Figur 2.3. I den overordna vedlikehaldsmodellen skal det

også skisserast kvar personell, maskiner og reservedelar forventast plassert (Bane NOR, 2017l).

2.4.5 Gjennomføring av RAM-analyse

RAM-analysar gjennomførast i form av feilmodeanalysar kombinert med konsekvensanalysar. Førebyggande vedlikehald er vurdert i den overordna vedlikehaldsmodellen, så i sjølve RAM-analysen er vedlikehaldsfokuset på korrigerande vedlikehald. Eit rekneark til bruk i utføringa av RAM-analysar er utvikla i Bane NOR (2017c), ”Vedlegg til mal for RAM-analyse”. Den delen av reknearket som omfattar feilmodeanalyse er vist i Figur 2.4, mens Figur 2.5 viser den resterande delen av reknearket som omfattar konsekvensanalyse. Frå figurane ser ein at nokre felt er gule, mens andre er kvite. Dei gule felte krev innputt, mens verdiane i dei kvite felte blir rekna ut med formlar som ligg inne i reknearket. Desse formlane er vist i Tabell 2.1.

I feilmodeanalysen skal alle relevante delsystem eller komponentar listast med tilhøyrande feilmodar. Vidare krevjast det for kvar feilmode informasjon om (Bane NOR, 2017l):

- Gjennomsnittleg tid til feil (MTTF) i timar
- Gjennomsnittleg logistisk forseinking (MLD) i timar
- Gjennomsnittleg reparasjonstid (MRT) i timar
- Deteksjonsmetode

Objekt	Feilmodus	MTTF	MLD	MRT	MDT	Deteksjon
<Objekt>	<Feilmodus>	0	0,00	0,00	0,00	<Deteksjon>
<Objekt>	<Feilmodus>	0	0,00	0,00	0,00	<Deteksjon>
<Objekt>	<Feilmodus>	0	0,00	0,00	0,00	<Deteksjon>
<Objekt>	<Feilmodus>	0	0,00	0,00	0,00	<Deteksjon>

Figur 2.4: Utsnitt av mal for feilmodeanalyse (Bane NOR, 2017c).

Alt etter kva som er mest relevant for analysen er erfaringsdata, ekspertvurderingar, krav frå teknisk regelverk og dokumentasjon frå produsent eller leverandør foreslått i Bane NOR (2017l) som kjelder til å hente inn informasjon om MTTF og MRT. I analysen vil desse verdiane vere generiske for komponentar eller delsystem av same type, med mindre lokale forhold tilseier noko anna (Bane NOR, 2017l). MLD vil hovudsakleg vere påverka av

uttrykkingstid ved feilretting (Bane NOR, 2017l), og vil difor variere alt etter kvar komponenten eller delsystemet er plassert på strekninga. Når verdiar frå feilmodeanalysen er lagt inn i reknearket i Bane NOR (2017c), kan gjennomsnittleg tid til feil (MDT) reknast ut ved hjelp av formel som er vist i Tabell 2.1.

Konsekvens av dei ulike feilmodane frå kvart delsystem eller komponent skal reknast ut, i form av årleg bidrag til forseinkingstimar og kansellerte tog, etter at feilmodeanalysen er gjennomført. Det fyrste steget i denne prosessen er at det, ved hjelp av ekspertvurderingar, skal hentast inn informasjon om: (Bane NOR, 2017l)

- Konsekvens av feil for togtrafikken i form av stopp, redusert fart eller alternativ køyreveg
- Forseinking per tog før feilen er retta
- Kor lenge ein feil kan vare før tog blir kansellert
- Tal på tog per time (denne informasjonen er henta inn i steg 1-2 i Figur 2.3)
- Tida det tek før togtrafikken er tilbake til normalt etter feilretting (normaliseringstid)
- Forseinking per tog ved normalisering av togtrafikken etter feilretting

Konsekvens	Forsinkelser/ tog før feilretting	Feilens varighet før kansellering	Feilens varighet etter kansellering	Antall tog per time	Antall tog forsinket før feilretting	Normaliseringsperiode etter feilretting	Forsinkelse/ tog ved normalisering	Antall tog forsinket ved normalisering	Total Forsinkelse ved feil	Feil per år	Total Forsinkelse per år	Antall Kansellerte tog per år
<Konsekvens>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<Konsekvens>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<Konsekvens>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<Konsekvens>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figur 2.5: Utsnitt av mal for konsekvensanalyse (Bane NOR, 2017c).

Etter at nødvendige ekspertvurderingar er henta inn, og dei gule feltene i Figur 2.5 er ferdig utfylt, nyttast formlane i Tabell 2.1 til å rekne ut resterande informasjon i reknearket. Dette er nødvendig for å til slutt kunne vurdere om det aktuelle prosjektet tilfredsstillar fastsette RAM-krav. I Bane NOR (2017l) er det påpeika at det er viktig at estimat for tal på kansellerte tog per år synleggjerast på lik linje med estimat for forseinkingstimar i RAM-analysane, til trass for at Bane NOR ikkje har eksplisitte målsettingar for omfang av kanselleringar.

Tabell 2.1: Formlar til bruk i RAM-analysar (Bane NOR, 2017c).

Storleik	Formel	Variablar
MDT	$MDT = MLD + MRT$	der MDT er gjennomsnittleg nedetid, MLD er gjennomsnittleg logistisk forseinking og MRT er gjennomsnittleg reparasjonstid.
Feilen si varigheit etter kansellering	$t_{fek} = MDT - t_{ffk}$	der MDT er gjennomsnittleg nedetid og t_{ffk} er feilen si varigheit før kansellering.
Tal på forseinka tog før feilretting	$n_{tff} = t_{fek} * n_{tt}$	der t_{fek} er feilen si varigheit etter kansellering og n_{tt} er tal på tog per time.
Tal på forseinka tog ved normalisering	$n_{tfn} = n_{tt} * NT_{ef}$	der n_{tt} er tal på tog per time og NT_{ef} er normaliseringsperiode etter feilretting.
Total forseinking ved feil	$f_{totf} = f_{ftf} * n_{tff} + n_{tfn} * f_{tn}$	der f_{ftf} er forseinking per tog før feilretting, n_{tff} er tal på forseinka tog før feilretting, n_{tfn} er tal på forseinka tog ved normalisering og f_{tn} er forseinking per tog ved normalisering.
Feil per år	$n_{f\grave{a}} = \frac{365 * 24}{MTTF + MDT}$	der $MTTF$ er gjennomsnittleg tid til feil og MDT er gjennomsnittleg nedetid.
Total forseinking per år	$f_{tot\grave{a}} = n_{f\grave{a}} * f_{totf}$	der $n_{f\grave{a}}$ er feil per år og f_{totf} er total forseinking ved feil.
Tal på kansellerte tog	$n_{kt} = t_{ek} * n_{tt} * n_{f\grave{a}}$	der t_{ek} er feilen si varigheit etter kansellering, n_{tt} er tog per time og $n_{f\grave{a}}$ er feil per år.

3 Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

I dette kapitlet er resultatet frå dokumentstudien av analyserapportar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar presentert. Det er skilt mellom RAM-analysar som er gjennomført med ei kvantitativ tilnærming, og RAM-analysar som er gjennomført med ei kvalitativ tilnærming. Dei kvantitative analysane er presenterte først, etterfølgt av dei kvalitative analysane. Avslutningsvis i kapitlet er dei viktigaste funna frå dokumentstudien summert opp og diskutert, og det er gitt forslag til forbetringar til RAM-analysemetodikken til Bane NOR.

3.1 Kvantitative RAM-analysar

Oversikt over dei kvantitative RAM-analysane som inngår i dokumentstudien er vist i Tabell 3.1. Vidare i kapitlet er dei ulike analysane referert til med dokumentnummeret til analyserapportane, som er oppgitt i tabellen. Totalt er analyserapportar frå ni kvantitative RAM-analysar studert og gjennomgått ved hjelp av guiden i vedlegg B. Basert på resultatet frå denne gjennomgangen er følgjande fem faktorar vurdert som viktige å trekke fram frå dei kvantitative RAM-analysane:

- Ei kvalitativ vurdering av gjennomføringa av analysen
- Korleis akseptkriterium er bestemt
- Kva formalar som er nytta
- Korleis nødvendig innputt er henta inn
- Korleis usikkerheit er handtert

Tabell 3.1: Oversikt over studerte analyserapportar frå kvantitative RAM-analysar.

Tittel på analyserapport	Dokumentnummer	Produsert av	År
Dovrebanen (Eidsvoll)-Hamar, Eidsvoll-Langset, RAM-analyse	UEH-10-Q-56142 _02E_001	Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen AS	2016
Dovrebanen (Eidsvoll)-Hamar, Kleverud-Sørli, RAM-analyse	UEH-30-Q-56142 _02E_001	Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen AS	2016
Gardermobanen (Gardermoen)-Eidsvoll, Dovrebanen (Eidsvoll)-Hamar, Venjar-Eidsvoll, RAM-analyse	UEH-00-Q-56142 _02E_001	Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen AS	2016
Dovrebanen, Sørli – Hamar – Brummundal, RAM-analyse	ICP-56-Q-25507 _02E_001	Rambøll, Sweco	2016
Bergensbanen (Dale)-Bergen, Arna-Fløen (Ulriken tunnel), RAM-analyse (oppetidsanalyse) av Dobbeltspor i Ulriken	UUT-00-Q-00135 _00E_001	Multiconsult	2016
Bergensbanen (Dale) – Bergen; Arna – Bergen, RAM-analyse, Fase 20.00	UUT-00-Q-18347 _00B_001	Norconsult	2015
Hell-Værnes, Nordlandsbanen, Hastighetsøkning og kapasitet, RAM-analyse – Endelig anlegg	IUP-00-Q-06869 _01E_001	Rambøll	2015
Vestfoldbanen Holm – Nykirke, RAM-analyse Signal	UVB-50-Q-91022 _00E_001	Bane NOR	2014
Sørlandsbanen, (Egersund) - Stavanger, (Klepp) – Stavanger, RAM-analyse signal	SSG-10-Q-00022 _01B_001	Bane NOR	2013

3.1.1 InterCity-analysane

Fire av RAM-analyserapportane som er gjennomgått i dokumentstudien omfattar strekningar som inngår i InterCity-prosjektet til Bane NOR. I dette prosjektet skal det planleggast eit moderne dobbeltspora jernbanenett for store delar av Austlandet, som skal stå ferdig i 2030 (Jernbaneverket, 2015b). Tre av dei studerte analyserapportane (UEH-10-Q-56142, UEH-30-Q-56142 og UEH-00-Q-56142) er frå analysar som er gjennomført i detaljplanfasa til prosjektet, mens den siste analyserapporten (ICP-56-Q-25507) er frå ei analyse som er gjennomført i hovudplanfasa til prosjektet. Relevant informasjon frå desse analyserapportane er gjennom dokumentstudien vurdert til å vere svært lik, og funn frå analyserapportane er difor presentert i fellesskap i dette delkapitlet. Funna er kort presentert i Tabell 3.2, før dei er nærmare forklart vidare i delkapitlet. Der det er ulikheiter i analysemetodikken til analysane er dette kommentert.

Tabell 3.2: Kort presentasjon av hovudfunn frå dokumentstudien av InterCity-analysane.

Faktor	Kommentar
Gjennomføring	Følgjer analysemetodikken til Bane NOR. Inneheld i tillegg ein kvalitativ analysedel.
Akseptkriterium	Nyttar akseptkriterium for både regularitet og forseinkingstimar, basert på felles mål for InterCity-strekningane.
Formlar	Formlane i reknearket i analysemetodikken til Bane NOR er nytta. I tillegg er det supplert med fleire formlar og føresetnader.
Innputt	Henta frå konseptdokumentet til prosjektet, teknisk regelverk og Bane NOR si database for anbefalte feilratar. Innputt er vidare justert og komplementert av analysedeltakarar.
Usikkerheit	Påpeika at eksisterer, og synleggjort ved bruk av sensitivitetsbetraktningar.

I all hovudsak følgjer InterCity-analysane Bane NOR si vegleiing for gjennomføring av RAM-analysar. Alle relevante punkt som inngår i analysemetodikken til Bane NOR er gjennomført og svart på i analyserapportane, men i tillegg er det gjennomført kvalitative RAM-analysar i forkant av dei kvantitative analysane. For analysane som er utført i detaljplan er dette forklart med at den kvalitative analysen dekkjer dei RAM-forholda som er viktige i utarbeiding av ein reguleringsplan, med tanke på omfang av driftsvegar og areal som må regulerast til prosjektet. I den kvalitative delen av analysen er det foreslått tiltak for å oppnå

Kapittel 3. Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

gode RAM-forhold på strekninga. Desse tiltaka omfattar blant anna områder som tilkomst til infrastrukturen og plassering av tekniske hus, noko som vil vere viktig for å utføre vedlikehald på ein effektiv måte. For analysen som er utført i hovudplanfasen er ulike alternativ for realisering av strekningane oppe til vurdering, og den kvalitative delen av RAM-analysen fungerer som ei grovanalyse, for å vurdere RAM-forholda for dei ulike alternativa opp imot kvarandre. Kvantitativ RAM-analyse er deretter gjennomført for det alternativet som er vurdert som det dårlegaste, med omsyn til RAM-forhold, i den kvalitative analysen. Då dei kvantitative RAM-krava blir tilfredsstilt for dette alternativet, er det gått ut ifrå at alle alternativa tilfredsstiller nødvendige RAM-krav.

Konseptdokumentet til InterCity-prosjektet, Jernbaneverket (2015b), er mykje brukt for å hente inn informasjon til bruk i RAM-analysane. I tillegg er tal frå Bane NOR si database for anbefalte feilratar, Jernbaneverket (2016), og teknisk regelverk nytta for å hente innputt til analysane. I følgje analyserapportane er innhenta informasjon justert og komplementert med erfaringar og kunnskap frå analysedeltakarane der dette har vore nødvendig, og det er påpeika at resultatane av analysane såleis kan vere avhengig av kven analysedeltakarane er og kva erfaring og kunnskap dei har.

Akseptabelt tal på forseinkingstimar for strekningane er rekna ut ifrå eit felles oppetidsmål for InterCity-strekningane, gitt i Jernbaneverket (2015b). Oppetidsmålet er gitt i prosent, og akseptkriterium for årlege forseinkingstimar er rekna ut ved å hente inn informasjon om totalt tal på årlege togtimar for dei ulike strekningane, for så å multiplisere dette talet med prosentandelen som skil oppetidsmålet frå å vere 100%. I fleire av analyserapportane er det kommentert at eit felles oppetidsmål for strekningane i prosjektet, samt eit felles tal på tilgjengelege togfrie timar for å gjennomføre vedlikehald, ikkje er optimalt. Dette er forklart med at nokre strekningar kan inkludere haldeplassar med mange objekt, mens andre strekningar berre er dobbeltspora linje utan overkøyringsmulegheiter, og den geografiske avgrensinga av RAM-analysen kan difor vere avgjerande for om eit oppetidsmål blir nådd eller ikkje.

Til trass for at Bane NOR sin analysemetodikk ikkje legg opp til at det skal nyttast akseptkriterium for regularitet, er krav til regularitet etablert og validert på same måten som krav til forseinkingstimar i analysane. Dette er forklart med viktigheita av bevisstheit rundt forholdet mellom oppetid og regularitet. I analyserapportane er det poengtert at dersom ein

berre stiller krav til oppetid på ei strekning, og ikkje regularitet, kan ein i staden for å til dømes køyre med redusert fart eller enkeltspora drift, heller kansellere tog på strekninga. På denne måten vil oppetida auke, mens regulariteten blir redusert.

Reknearket som Bane NOR har utvikla for bruk i RAM-analysar, Bane NOR (2017c), er nytta i alle dei studerte InterCity-analysane. I tillegg til formlane som frå før av ligg inne i Bane NOR (2017c) er det teke i bruk ekstra formlar og føresetnader, for avgjerse av verdiar til fleire av kolonnane i reknearket som krev manuell innputt. Kva formlar og føresetnader som nyttast er avhengig av om konsekvens av feil er stopp, redusert fart eller enkeltspora drift. Dersom ein feil fører til stopp i togtrafikken er forseinking per tog sett til å vere lik togfølgetida på strekninga i analysane. Togfølgetid er tida mellom to etterfølgjande tog i same retning (Jernbaneverket, 2015b). Fører ein feil til enkeltspora drift vil dette ha same effekt på forseinking som feil som fører til redusert fart. Grunnen til dette er at det må køyrast med redusert fart forbi området der det er feilretting. Ved feil som fører til redusert fart er forseinking per tog rekna ut med Formel 3.1 i analysane.

$$F_{red} = \left(\frac{S_{v_{red}}}{V_{red}} - \frac{S_{v_{red}}}{V_{norm}} \right) + \left(\frac{S_{brems}}{\frac{V_{start} + V_{slutt}}{2}} - \frac{S_{brems}}{V_{start}} \right) + \left(\frac{S_{aks}}{\frac{V_{start} + V_{slutt}}{2}} - \frac{S_{aks}}{V_{start}} \right) \quad (3.1)$$

der F_{red} er forseinking per tog i timar ved redusert fart,

$S_{v_{red}}$ er strekning i km med redusert fart,

S_{brems} er bremselengde i km,

S_{aks} er akselerasjonslengde i km,

V_{red} er redusert fart i km/t,

V_{norm} er normal fart i km/t,

V_{start} er startfart i km/t og

V_{slutt} er slutfart i km/t.

Kor lenge ein feil kan vare før det blir kanselleringar er vurdert til å vere lik togfølgetida for feil som fører til stopp i togtrafikken. I analysane er det gått ut ifrå at berre det fyrste toget blir forseinka, mens resten av toga som blir påverka av feilen si varigheit blir kansellert. På grunn av låg togtettheit på strekningane i prosjektet er det vurdert at det ikkje vil bli følgjeforseinkingar ved feil som fører til redusert fart eller enkeltspora drift. Desse feiltypane vil difor ikkje gi kanselleringar, og feilen si varigheit før kansellering er difor sett til å vere lik

Kapittel 3. Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

gjennomsnittleg nedetid. Føresetnaden om at feil som fører til redusert fart og enkeltspora drift ikkje vil gi følgjeforseinkingar gjer også at normaliseringsperiode, og forseinking per tog ved normalisering, vil vere lik null for desse feiltypane. Ved stoppende feil er forseinking per tog ved normalisering også sett til å vere lik null, noko som er basert på at det er gått ut ifrå at det ikkje blir sett i gong delvis trafikkavvikling. Normaliseringstid for feil som fører til stopp i togtrafikken er rekna ut med Formel 3.2.

$$NT_{stop} = t_{tog} + t_{køyre} = \frac{1}{n_{tog}} + \frac{S_{utan_kryss}}{v_{norm}} \quad (3.2)$$

der NT_{stop} er normaliseringstid i timar ved feil som fører til stopp i togtrafikken,
 t_{tog} er togfølgetid i timar,
 $t_{køyre}$ er normal køyretid i timar,
 n_{tog} er tal på tog per time,
 S_{utan_kryss} er lengste avstand i km utan mulegheit for kryssing og
 v_{norm} er normal fart i km/t.

Formel 3.1 og 3.2, saman med føresetnadane som er gitt for analysane, gir innputt til alle nødvendige kolonnar i konsekvensanalysen av reknearket i Bane NOR (2017c). For å vidare rekne seg fram til forseinkingstimar og kanselleringar for dei ulike strekningane, er formlane som frå før av ligg inne i reknearket nytta.

Analyserapportane påpeikar at det ligg stor grad av usikkerheit i talmaterialet som er brukt i analysane. For å vise korleis endring av nokre av dei usikre parametrane påverkar resultatet av analysane, er det gjennomført sensitivitetsbetraktningar i analysane som omfattar detaljplan. Det er til dømes gjort endringar på parametrar som logistisk forseinking og lengde på strekning for saktekøyring ved feil. For analysane som er utført i hovudplanfasen til prosjektet er det ikkje gjennomført sensitivitetsbetraktningar, sjølv om usikkerheit er trekt fram på same måte som i analysane frå detaljplanfasen.

3.1.2 Ulrikenanalysen

Analyserapport UUT-00-Q-00135 er frå ei RAM-analyse som ser på eit nytt tunnelløp mellom Arna og Fløen i Bergen. Analysen ser på delane av infrastrukturen som ikkje omfattar signal, men for den same strekninga er det gjennomført RAM-analyse for signal i analyserapport UUT-00-Q-18347. Dei to analysane brukar ulik RAM-analysemetodikk, og analysen i analyserapport UUT-00-Q-18347 er presentert i delkapittel 3.1.3, mens analysen i analyserapport UUT-00-Q-00135 er presentert i dette delkapitlet. Funna frå gjennomgangen av sistnemnte analyserapport er kort presentert i Tabell 3.3, før dei er nærmare forklart vidare i delkapitlet.

Tabell 3.3: Kort presentasjon av hovudfunn frå dokumentstudien av Ulrikenanalysen.

Faktor	Kommentar
Gjennomføring	Feilmode- og konsekvensanalyse er gjennomført, men vedlikehaldsanalyse for førebyggjande vedlikehald er ikkje gjennomført.
Akseptkriterium	Basert på tal nytta i tidlegare gjennomført RAM-analyse for strekninga.
Formlar	Formlane i reknearket i analysemetodikken til Bane NOR er nytta. Dei fleste innputtverdiar er gitt som sannsynsfordeling, i staden for punkttestimat.
Innputt	Basert på ekspertvurderingar.
Usikkerheit	Påpeika at eksisterer, og synleggjort ved bruk av Monte Carlo simulering.

Metodikken som er nytta i analysen i analyserapport UUT-00-Q-00135 er basert på Bane NOR si vegleiiing for gjennomføring av RAM-analysar, men avgrensa til metodikken for estimering av forventa årlege forseinkingstimar. Det er altså gjennomført feilmodeanalyse og konsekvensanalyse, men det er ikkje gjennomført vedlikehaldsanalyse for førebyggjande vedlikehald. Dette er grunngeve med at vedlikehaldsanalysen for prosjektet er gjennomført og dokumentert tidlegare. Det er derimot ikkje vist til eit dokumentnamn eller nummer for vedlikehaldsanalysen, noko som gjer det utfordrande for andre å finne tak i den, og i denne omgang er det ikkje sett nærmare på analysen.

Akseptkriteriet for forseinkingstimar som er brukt i analysen er basert på tal ifrå analyserapport UUT-00-Q-18347. Ifølge analyserapporten er dette akseptkriteriet rekna ut ved hjelp av ei ”top-down”-analyse i samsvar med Jernbaneverket (2011c). I Jernbaneverket

Kapittel 3. Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

(2011c) er akseptabelt tal på forseinkingstimar for dei ulike jernbanestrekningane i Noreg utleia, basert på det totale talet på akseptable forseinkingstimar per år for heile det norske jernbanenettet.

All innputt til RAM-analysen, som er brukt for å verifisere at akseptkriteriet for forseinkingstimar blir nådd, er basert på ekspertvurderingar. Dette er grunngeve med at det ikkje har vore muleg å oppdrive konkrete talgrunnlag for analysen, og at gode historiske data ikkje har vore tilgjengeleg for statistisk estimering. Inndeling av feilmodar til analysen er tilpassa etter kva som har vore muleg for driftspersonell og togleiing å kvantifisere, og den tilgjengelege kunnskapen for analysen består av dei involverte personane si subjektive erfaring og kompetanse.

Til forskjell frå det RAM-analysemetodikken til Bane NOR legg opp til er dei fleste innputtverdiar i RAM-analysen beskrive med ei sannsynsfordeling, og ikkje eit punkttestimat. Dette er grunngeve med at metodikken skal gjere det muleg å evaluere og analysere usikkerheit i talstorleikane. Vidare er det gjennomført Monte Carlo simulering, der simuleringsverktøyet @Risk er brukt til å simulere fleire år med drift av strekninga. Denne metoden gjer at ein får ei sannsynsfordeling for årlege forseinkingstimar på strekninga. I følge analyserapporten er variasjonane i forseinkingstimar, som kan lesast ut ifrå sannsynsfordelinga, i praksis eit resultat av epistemisk usikkerheit som er usikkerheit på grunn av mangel på kunnskap, og av aleatorisk usikkerheit som er usikkerheit på grunn av naturlege variasjonar. Dette er grunngeve med at aleatorisk usikkerheit er inkludert i resultatet ved at nøkkelstorleikar, som til dømes nedetid, er beskrive som stokastiske variablar der det er teke høgde for naturlege variasjonar. I tillegg er det i analyserapporten grunngeve at epistemisk usikkerheit er inkludert i analysen, då det er subjektive meiningar som står bak vurderinga av dei naturlege variasjonane.

Sjølv om bruk av Monte Carlo-simulering tek høgde for og viser noko av usikkerheita som er knytt til analysen, er det i analyserapporten påpeika at det gjenstår usikkerheit som ikkje er kvantifiserbar. Av denne type usikkerheit er det trekt fram korrektheita av føresetnader som er gjort i analysen, komplettheit i identifikasjon av feilmodar og effekten av mange forenklingar i analysemodellen som er brukt.

3.1.3 Analysar basert på gamal RAM-analysemetodikk

Analysane i fire av dei studerte RAM-analyserapportane (SSG-10-Q-00022, IUP-00-Q-06869, UVB-50-Q-91022 og UUT-00-Q-18347) baserar seg på RAM-analysemetodikken som var gjeldande i Bane NOR før dagens analysemetodikk blei gjeldande i 2015. Funn frå desse analyserapportane er presentert i fellesskap, då dei gjennom dokumentstudien er vurdert til å vere relativt like og bidra med same type relevant informasjon til masteroppgåva.

Metodikken som er brukt i analysane tek utgangspunkt i Jernbaneverket (2011b), som viser framgangsmetode for gjennomføring av ”bottom-up”-analyse, og Jernbaneverket (2011c), som viser framgangsmetode for gjennomføring av ”top-down”-analyse. Metodikken i Jernbaneverket (2011b) og Jernbaneverket (2011c) har danna grunnlaget for dagens RAM-analysemetodikk i Bane NOR, og er vidare i rapporten omtalt som ”gamal RAM-analysemetodikk”. I ”Top-down”-analysen blir akseptkriterium for forseinkingstimar rekna ut, mens ”bottom-up”-analysen skal verifisere at akseptkriterium blir nådd. Funn frå gjennomgangen av analyserapportane er kort presentert i Tabell 3.4, før dei er nærmare forklart vidare i delkapitlet.

Tabell 3.4: Kort presentasjon av hovudfunn frå dokumentstudien av analysar basert på gamal RAM-analysemetodikk.

Faktor	Kommentar
Gjennomføring	Svarar ut dei fleste punkt i RAM-analysemetodikken til Bane NOR, men inneheld ikkje modell for førebyggande vedlikehald.
Akseptkriterium	Rekna ut ved hjelp av ”top-down”-analyse.
Formlar	Stort sett like som formlane i dagens RAM-analysemetodikk, men med nokre forenklingar.
Innputt	Basert på ekspertvurderingar. Statistikk er brukt for MTTF-verdiar.
Usikkerheit	Påpeika at eksisterer, og teke høgde for med bruk av konservative verdiar.

Analysane som baserar seg på gamal RAM-analysemetodikk inneheld både utrekning og validering av RAM-krav, men ikkje modell for førebyggande vedlikehald. Eit rekneark som er svært likt det som inngår i dagens RAM-analysemetodikk er nytta til gjennomføring av analysane. Reknearket har derimot færre felt som krev innputt enn reknearket i dagens analysemetodikk, og inkluderer blant anna ikkje kanselleringar i togtrafikken.

Normaliseringsperiode og forseinking per tog før feilretting er heller ikkje inkludert i reknearket, og såleis er det berre samla forseinking ved feil som er estimert. Utifrå

Kapittel 3. Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

punktlegheitsdefinisjonen til Bane NOR må eit tog vere fire minutt eller seinare på stasjon for at det skal reknast som forseinka, og dette er det også teke utgangspunkt i for desse analysane.

Akseptkriterium for forseinkingstimar er, i likheit med analysen i delkapittel 3.1.2, rekna ut ved hjelp av ei ”top-down”-analyse i samsvar med Jernbaneverket (2011c). Ei nærmare forklaring på korleis dette er gjort fins i delkapittel 3.1.2. Vidare er innputt til analysane hovudsakleg basert på ekspertvurderingar frå vedlikehaldspersonell og togleiarar. For MTTF-verdiane i analysane er det brukt statistikk, men det er ikkje oppgitt kvar denne statistikken er henta ifrå. Analysane i analyserapport IUP-00-Q-06869, UVB-50-Q-91022 og UUT-00-Q-18347 har også henta inspirasjon og innputt frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar, deriblant analyserapport SSG-10-Q-00022, som var den fyrste av dei fire analyserapportane som blei produsert.

I analysane i analyserapport UVB-50-Q-91022 og UUT-00-Q-18347 er det berre signalanlegget, og ikkje resten av infrastrukturen, som er analysert. For å rekne ut eit akseptkriterium for forseinking for berre delar av infrastrukturen er trafikkinformasjons- og oppfølgingssystemet til Bane NOR (TIOS) nytta. Basert på erfaringsdata frå TIOS frå ei periode på fire år er det sett på årsaksfordeling til registrert forseinking, og utifrå dette er akseptkriterium for forseinkingstimar for signal rekna ut som ein prosent av det totale akseptkriteriet for strekninga. TIOS er nærmare forklart i delkapittel 5.2.1.

I analyserapportane er det kommentert at det er vanskeleg å sikre pålitelege verdiar for MTTF, MLD og MRT på grunn av usikkerheit rundt forhold som til dømes menneskelege faktorar, tekniske aspekt og miljøaspekt. Det at forseinking under fire minutt ikkje blir rekna med i analysane er også trekt fram som noko som fører til usikkerheit, og i analyserapport UVB-50-Q-91022 og UUT-00-Q-18347 er det påpeika at metoden gjer at små forskjellar i vurdering av forseinking kan ha stor effekt på resultatet av analysane. I analyserapport UUT-00-Q-18347 og IUP-00-Q-06869 er det trekt fram at det også er usikkerheit i analysane knytt til om alle forhold som er relevante å analysere er inkludert. Analyserapport UUT-00-Q-18347 trekk også fram at ved å nytte informasjon frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar kan ein drage med seg usikkerheit frå ei analyse vidare over i andre analysar. Felles for alle desse analysane er at det er nytta konservative verdiar for å ta høgde for usikkerheit.

3.2 Kvalitative RAM-analysar

Analyserapportar frå fem kvalitative RAM-analysar og éi delvis kvantitativ RAM-analyse er gjennomgått i dokumentstudien, og ei oversikt over desse analysane er gitt i Tabell 3.5. Det er valt å presentere funn frå den delvis kvantitative analysen saman med funn frå dei kvalitative analysane, då den delvis kvantitative analysen ikkje inneheld kvantifisering av forseinkingstimar eller kanselleringar, som er hovudfokuset i RAM-analysane som er fullstendig kvantitative. Analysane i Tabell 3.5 er studert på eit meir overordna nivå enn dei kvantitative analysane, og fordi mykje av informasjonen som er vurdert som viktig går igjen i dei ulike analysane, er det valt å presentere dei i fellesskap i dette delkapitlet. Ved gjennomgang av analyserapportane er spørsmåla som er laga for kvalitative analysar i den utvikla guiden for gjennomgang av RAM-analyserapportar, sjå vedlegg B, nytta. Utifrå dette er følgjande informasjon vurdert som viktig å trekke fram frå analysane:

- Kvifor er analysen utført kvalitativt og ikkje kvantitativt?
- Kva informasjon gir analysen?

Tabell 3.5: Oversikt over studerte analyserapportar frå kvalitative RAM-analysar.

Tittel på analyserapport	Dokumentnummer	Produsert av	År
Follobanen Detaljplan, Signal, RAM Analyserapport	UFB-40-Q_40222 _03E_001	Rambøll	2013
Nytt dobbelspor Oslo – Ski, Ski stasjon og Langhus – Ski, RAM-analyse jernbaneteknikk (fase 40)	UOS-00-Q-92000 _00B_002	Bane NOR	2012
Østfoldbanen V L (Oslo S) – Ski, Innføring Oslo S, RAM-analyse av ytre signalanlegg	UOS-10-Q-13823 _00B_001	Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen AS	2012
Ulriken tunnel, byggeplan, RAM-analyse	UUT-00-Q-10056 _00A_001	Norconsult AS	2012
Dovrebanen Eidsvoll-Hamar km 76,20 – 93,34, RAM analyse for Langset – Kleverud Byggeplan	UEH-20-Q-00021 _00A_001	Bane NOR	2012
Prosjekt: Ski stasjon, RAM-analyse. Ny grunnrutemodell Ski Stasjon (Endring i driftsmønster ved oppstart av fase 20)	UOS-90-Q-90063 00E_001	Bane NOR	2011

3.2.1 Kvifor kvalitativ?

Ei kort oppsummering av kvifor analysane i Tabell 3.5 er gjennomført kvalitativt i staden for kvantitativt er gitt i Tabell 3.6, før det vidare i delkapitlet er gått meir i detalj på grunngjeving av kvalitativ analysemetodikk i analyserapportane.

Tabell 3.6: Kort oversikt over grunngjeving for val av kvalitativ RAM-analysemetodikk.

Analyserapport	Grunngjeving for val av kvalitativ analysemetodikk
UFB-40-Q-40222	Hevda at kvalitet på kvantitativ analyse ikkje vil vere tilfredsstillande, pga. stor grad av usikkerheit i analysegrunnlag.
UOS-00-Q-92000	Fråverande.
UOS-10-Q-13823	Ingen nye element skal innførast i systemet, difor ikkje nødvendig med kvantitativ analyse.
UUT-00-Q-10056	Ikkje tydeleg grunngjeving, men mangel på definert akseptkriterium for RAM-forhold er nemnt.
UEH-20-Q-00021	Fråverande.
UOS-90-Q-90063	Ikkje tydeleg grunngjeving, men mangel på definert akseptkriterium for RAM-forhold er nemnt.

Grunngjeving for bruk av kvalitativ metode varierer i dei studerte RAM-analyserapportane. I analyserapport UEH-20-Q-00021 og UOS-00-Q-92000 er grunngjeving for valt metode fråverande. Analyserapport UOS-90-Q-90063 og UUT-00-Q-10056 har heller ikkje noko tydeleg grunngjeving for kvifor kvalitativ analysemetode er valt, men i desse rapportane er det trekt fram at Bane NOR, på tidspunktet rapportane er skrive som høvesvis er i 2011 og 2012, ikkje hadde definerte akseptkriterium for RAM-forhold.

I analyserapport UFB-40-Q-40222 er det hevda at kvaliteten på ei kvantitativ analyse ikkje vil vere tilfredsstillande for prosjektet. Dette er grunngjeve med stor usikkerheit rundt fleire av innputtverdiane til analysen, og rundt korrektheit og robustheit i føresetnadane som må gjerast for å kunne rekne ut forseinking for jernbaneinfrastrukturen på strekninga. I tillegg er bruk av kvalitativ metode grunngjeve med uklarheit rundt fastsetting av feilmodar for aktuelle komponentar, noko som er foreslått løyst ved innføring av eintydige føringar frå Bane NOR si side, på feilmodar for komponentane som inngår i jernbaneinfrastrukturen.

UOS-10-Q-13823 er ei delvis kvantitativ RAM-analyse. I analyserapporten er metodikken som er nytta for gjennomføring av analysen grunngeve med at kvantitativ RAM-analyse ikkje er nødvendig for prosjektet, basert på gjeldande retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar. Analysen vurderer berre feil som kan knytast til det ytre signalanlegget, og prosjektet er i følge analyserapporten rekna som eit modifikasjonsprosjekt når det gjeld signalanlegget. Dette er grunngeve med at signalanlegget skal utvidast og modifierast, men ingen nye element blir innført i systemet.

3.2.2 Kva informasjon gir analysane?

Felles for dei kvalitative RAM-analysane som er studert er at dei gir informasjon om forhold som kan ha påverknad på oppetida til strekninga som blir analysert. Bortsett frå i analyserapport UFB-40-Q-40222 kjem det også fram forslag til tiltak som kan gjerast for å betre RAM-forholda på dei aktuelle strekningane. Analysane er hovudsakleg basert på prinsippa for feilmode- og effektanalysar (FMEA-analysar). Slike analysar er kvalitative og har til mål å identifisere og analysere potensielle feil for eit teknisk system (Høyland og Rausand, 2009). Detaljeringsgrad og omfang av dei studerte analysane er derimot varierende, og i Tabell 3.7 er det gitt ei kort oppsummering av kva informasjon dei ulike analysane gir, før det er gått nærmare inn på dette vidare i kapitlet.

Tabell 3.7: Kort oversikt over kva informasjon dei studerte kvalitative RAM-analysane gir.

Analyserapport	Informasjon som kan hentast ut ifrå analysane
UOS-00-Q-92000	Enkel FMEA-analyse på delsystemnivå, med forslag til RAM-tiltak.
UOS-10-Q-13823	Vurdering av sannsyn for utilgjengelege togvegar og muleg bruk av alternative togvegar. Forslag til tiltak for å auke tilgjengelegheit.
UUT-00-Q-10056	Identifisering av RAM-forhold og forslag til RAM-tiltak.
UFB-40-Q_40222	Detaljert FMEA-analyse på komponentnivå.
UOS-90-Q-90063	Identifisering av RAM-forhold og forslag til RAM-tiltak.
UEH-20-Q-00021	Detaljert FMEA-analyse på komponentnivå, med forslag til RAM-tiltak.

Kapittel 3. Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

Analyserapportane UOS-90-Q-90063, UUT-00-Q-10056 og UOS-00-Q-92000 legg seg på eit relativt enkelt detaljeringsnivå for gjennomføring av RAM-analyse. I analyserapport UOS-90-Q-90063 er det gjort ei oppstilling av RAM-forhold som kan føre til redusert opptid for den aktuelle strekninga, i tillegg til ei overordna vurdering av kva effekt dei ulike forholda vil ha på oppetida til systemet. Det er også foreslått ulike tiltak som vil kunne ha ei positiv effekt på RAM-ytinga til systemet. I analyserapport UUT-00-Q-10056 blir RAM-forhold for ny infrastruktur på strekninga i prosjektet identifisert, og ei rekke anbefalte tiltak for å betre RAM-forholda på strekninga blir framheva. Synergimeldingar for eksisterande infrastruktur på strekninga er også henta inn som ekstra grunnlag for gjennomføring av analysen, i tillegg til den erfaring og kunnskap analysedeltakarane sit med. Analysen i analyserapport UOS-00-Q-92000 er utført som ei enkel FMEA-analyse der den analyserte infrastrukturen er delt opp i delsystem. For dei ulike delsystema er det sett på korleis dei kan feile, årsaker til feil, konsekvensar av feil og forslag til tiltak for å hindre feil eller eventuelt redusere konsekvensar av feil.

I analyserapport UFB-40-Q-40222 er det gjort ei detaljert FMEA-analyse på komponentnivå. For dei ulike feilmodane til komponentane er alvorlegheitsgrad, deteksjon, konsekvens, lokal effekt, total effekt, direkte effekt på andre baner og samla effekt på andre baner vurdert. I analyserapport UEH-20-Q-00021 er det også gjort ei detaljert FMEA-analyse der det er gått inn på komponentnivå for dei ulike fagområda som inngår i jernbaneinfrastrukturen. Analysen tek for seg feilmodar for dei ulike komponentane som er studert, årsak til feil, deteksjon av feil, konsekvens av feil, førebyggjande og korrigerande vedlikehaldsaktivitetar og forslag til RAM-tiltak. For nokre av feilmodane er også kvantitative verdiar for gjennomsnittleg tid til reparert (MTTR) inkludert.

Den delvis kvantitative analysen i analyserapport UOS-10-Q-13823 gir litt annan informasjon enn dei reint kvalitative analysane. Analysen tek for seg utilgjengelegheit som følgje av feil på det ytre signalanlegget på Oslo S, og nye og endra primære togvegar i samanheng med prosjektet "Follobanen Innføring Oslo S" er analysert. Sannsynet for at dei ulike togvegane er utilgjengelege, som følgje av feil i jernbaneinfrastrukturen, er kvantifisert ved hjelp av Formel 3.3. I følgje analyserapporten er dette gjort for å gi eit meir fullstendig bilde av konsekvens ved feil, enn kva ei reint kvalitativ analyse vil gi. Vidare er mulegheit for bruk av alternativ togveg vurdert kvalitativt i analysen, og det er også sett på tiltak for å auke tilgjengelegheita for dei analyserte togvegane.

$$P_{utilgjengeleg} = \sum_{feilmode_i} \lambda_i * n_i * t_{utbedr_i} \quad (3.3)$$

der $P_{utilgjengeleg}$ er sannsynet for at ein togveg er utilgjengeleg,
 λ_i er feilfrekvensen til feilmode i,
 n_i er tal på objekt med feilmode i og
 t_{utbedr_i} er effektiv utbetringsstid for feilmode i.

For å kunne nytte Formel 3.3 blir nedetid og normaliseringstid, som til saman utgjer det som i analyserapport UOS-10-Q-13823 er omtala som effektiv utbetringsstid, estimert basert på ekspertvurderingar. I analyserapporten er det peika på at nedetida vil vere varierende frå gong til gong. For å ta omsyn til dette er nedetida for kvar relevant feilmode estimert som ei trekantfordeling med minimum, forventa og maksimal varigheit. Feilfrekvens, som også trengst for å kunne bruke Formel 3.3, er basert på driftsstatistikk av registrerte feil i Synergi, og er rekna ut ved hjelp av Formel 3.4.

$$\lambda = \frac{n_{feil}}{t_{observ} * n_{objekt}} \quad (3.4)$$

der λ er feilfrekvens,
 n_{feil} er tal på observerte feil på Oslo S for ein type objekt,
 t_{observ} er observasjonstid og
 n_{objekt} tal på den bestemte objekttypen på Oslo S.

3.3 Oppsummering og diskusjon

I dette delkapitlet er funna frå dokumentstudien av RAM-analyserapportar summert opp og diskutert, og forslag til forbetringar til dagens RAM-analysemetodikk er gitt. Det er også gjort ei kort evaluering av dokumentstudien som metode for å hente inn erfaringar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar.

3.3.1 Generell gjennomføring av analysane

Alle analyserapportane som inngår i dokumentstudien gir relevant informasjon om RAM-forhold til bruk i prosjekta. Det er derimot varierende kor omfattande analysane er gjort, og funna frå dokumentstudien støttar påstanden som er gitt i bakgrunnen til oppgåva, der det er hevda at praksis for gjennomføring av RAM-analysar for Bane NOR er varierende. Nokre av dei studerte analysane følgjer retningslinjene til Bane NOR, mens andre opererer med eigne framgangsmetodar. Den største skilnaden på analysane er at nokre har ei kvantitativ tilnærming, mens andre har ei kvalitativ tilnærming. Dette er det gått nærmare inn på i delkapittel 3.3.6. Blant dei kvantitative analysane, som er dei analysane det er gått mest i djupna på i dokumentstudien, er det vidare fleire forskjellar innanfor handtering av akseptkriterium, formlar, innputt og usikkerheit. Dette er det gått nærmare inn på i delkapittel 3.3.2 - 3.3.5.

3.3.2 Fastsetting av akseptkriterium

Fastsetting av akseptkriterium for forseinkingstimar er gjort med hovudsakleg to ulike tilnærmingar i dei studerte analyserapportane. Den eine metoden baserar seg på at det er gitt eit krav til oppetid for prosjektet, og akseptabelt tal på forseinkingstimar er rekna ut ifrå dette oppetidsmålet. Denne metoden stemmer overeins med retningslinjene for etablering av RAM-krav i Bane NOR (2017b), som seier at prosjekteigar skal tildele eit krav til oppetid til prosjekt som fell inn under det som, i delkapittel 2.3.1 av denne rapporten, er definert som prosjektkategori 1, 2 og 3.

Den andre metoden som er nytta for utrekning av akseptkriterium i dei studerte RAM-analysane baserar seg på Jernbaneverket (2011c), der ei ”top-down”-metode for utrekning av akseptabelt tal på forseinkingstimar for alle jernbanestrekningane i Noreg er nytta. Denne metoden er brukt for analysar som er utført både før og etter at gjeldande retningslinjer for RAM-analysar blei innført, men metoden er ikkje nemnt i dagens RAMS-handbok. Dagens

retningslinjer legg derimot opp til at akseptkriterium for det som er definert som prosjektkategori 4, i delkapittel 2.3.1 i denne rapporten, skal ta utgangspunkt i årleg målsetting for alle baner på det nasjonale nettet (Bane NOR, 2017l). Denne metodikken liknar på den som er utført i Jernbaneverket (2011c). Bruken av Jernbaneverket (2011c) verkar derimot som noko som heng igjen frå gamle retningslinjer for RAM-analysar. I mangel på andre kjelder for å rekne seg fram til akseptkriterium for forseinkingstimar, kan Jernbaneverket (2011c) likevel tenkast å fungere som ein grei peikepinn på akseptkriterium for dei ulike jernbanestrekningane i Noreg. Dersom dokumentet skal brukast for dagens RAM-analysar bør dette derimot opplysast om i RAMS-handboka, og dokumentet må oppdaterast etterkvart som det skjer endringar i den årlege målesettinga for forseinkingstimar på jernbanenettet.

I nokre av dei studerte analyserapportane er det trekt fram at ved å nytte eit felles oppetidsmål for eit stort prosjekt, der RAM-analysar blir utført for ulike delar av prosjektet, kan den geografiske avgrensinga av RAM-analysen spele inn på om eit akseptkriterium blir nådd eller ikkje. Dette svekker verdien av konklusjonen ein kan trekke ved å oppnå eller eventuelt ikkje oppnå akseptkriteriet, og er difor eit område som burde sjåast nærmare på, og eventuelt utviklast nye rutinar for, i dagens RAM-analysemetodikk.

I tillegg til akseptkriterium for forseinking ser ein at det i nokre av dei studerte RAM-analysane også er nytta akseptkriterium for regularitet. Dette verkar fornuftig då oppetid og regularitet påverkar kvarandre, og ved å nytte akseptkriterium for regularitet på lik linje med akseptkriterium for forseinking, kan ein unngå at regulariteten på ei strekning blir låg til fordel for høg oppetid.

3.3.3 Bruk av formlar

Dei kvantitative analysane som er studert nyttar i hovudsak formlane som er utvikla for gjennomføring av RAM-analysar i reknearket i Bane NOR (2017c), men med nokre avvik og ekstra formlar og føresetnader. For at resultatet frå dei ulike analysane skal kunne tolkast på same måte er det viktig at det er ei felles forståing for føresetnadane som ligg til grunn for bruk av analysemetodikken. Ein faktor som kan ha stor betydning for sluttresultatet til analysen er kva som er rekna som forseinking. Den gamle RAM-analysemetodikken er tydeleg på at forseinking, i tråd med definisjonen til Bane NOR, er dersom eit tog kjem fire minutt eller

seinare etter oppsett ruteplan inn til endestasjon. I dagens retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar kjem det derimot ikkje fram om kvart minutt eit tog er bak oppsett ruteplan tel som forseinking, eller om forseinking berre reknast dersom eit tog er fire minutt eller seinare etter oppsett ruteplan.

I analysane som er basert på gamal RAM-analysemetodikk er det ikkje sett på kansellering av tog, men berre på forseinking. I enno større grad enn for analysane som ikkje nyttar akseptkriterium for regularitet, er det tenkeleg at det kan vere lett å kansellere tog for å oppnå høg opptid i desse analysane. Ved kvantifisering av forseinking er det berre den totale forseinkinga som er vurdert i analysane som er basert på den gamle analysemetodikken, noko som gjer at det kanskje kan vere enklare for ein ekspert å kome med ei vurdering. Samtidig er det ikkje sikkert at vurderinga blir like korrekt som når forseinking er delt inn i fleire delar, slik som i dagens analysemetodikk.

I InterCity-analysane er det teke med fleire føresetnader og formlar enn det som er gitt i RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Dette verkar nyttig då det kan redusere bruken av ekspertvurderingar, men samtidig er det essensielt å forstå innhaldet i formlane og føresetnadane for å kunne drage nytte av dei i framtidige prosjekt. Blant anna er det i InterCity-analysane sett på strekningar med dobbeltspor og låg togtettheit, noko som ikkje vil passe like bra for alle prosjekt. På grunn av føresetnadane som er sett for analysane er det sett bort ifrå følgjeforseinking ved feil i infrastrukturen, noko som i prosjekt med høgare togtettheit vil kunne gi eit feilaktig estimat på omfanget av forseinking.

Ein av formlane i InterCity-analysane, Formel 3.1, er nytta til utrekning av forseinking per tog ved redusert fart. I analysane er denne formelen også nytta for utrekning av forseinking for feil som fører til enkeltspora drift, då også dette vil føre til saktekøyring forbi området der det føregår feilretting. Utifrå det ein kan sjå i føresetnadane til analysane er det derimot ikkje teke høgde for at det ved enkeltspora drift også kjem tog i motsett retning, og at ein kan oppleve ventetid i forbindelse med kryssing på strekninga. Dette vil nok vere tilfelle i verkelegheita, og enkeltspora drift vil kunne føre til meir forseinking enn berre den som kjem av redusert fart forbi området med feilretting. Dersom ventetid for kryssing er nødvendig, blir det i tillegg til tida ein må vente, ekstra forseinking fordi toget må redusere farta heilt til stopp, og deretter akselerere frå stopp til normalfart. Låg togtettheit gir mindre sannsyn for å måtte vente på motgåande tog enn dersom togtettheita er høg. Ved låg togtettheit kan det difor vere at Formel

3.1 vil kunne nyttast utan store feilvurderingar, også for utrekning av forseinking ved enkeltspora drift, slik det er gjort i InterCity-analysane.

3.3.4 Innhenting av innputt

Mesteparten av innputt til dei studerte analysane er basert på ekspertvurderingar, hovudsakleg frå vedlikehaldspersonell og togleiarar. Dette er i tråd med det RAM-analysemetodikken til Bane NOR legg opp til, og også det som var forventet før gjennomgang av analyserapportane. Likevel ser ein i dei studerte analyserapportane at erfaringsdata og statistikk er nytta der dette har vore tilgjengeleg, noko som hovudsakleg har vore aktuelt for MTTF-verdiar. Det at tilgjengeleg statistikk blir brukt som hjelpemiddel for kvantifisering av RAM-analysar gjer det interessant å gjennomføre statistiske analysar på fleire av områda i analysemetodikken som baserer seg på ekspertvurderingar, slik at meir statistikk blir tilgjengeleg til bruk i analysane.

Ved fastsetting av delsystem eller komponentar med tilhøyrande feilmodar som skal inngå i RAM-analysane, er det stor grad av subjektive vurderingar som bestemmer. Her er det tenkeleg at ei standardisering av relevante komponentar og delsystem med tilhøyrande feilmodar, som foreslått i analyserapport UFB-40-Q-40222, vil kunne vere med på å forenkle analyseprosessen og gi eit likare utgangspunkt for gjennomføring av RAM-analysar i dei ulike prosjekta. Ei slik standardisering vil truleg også auke effektiviteten i gjennomføring av RAM-analysar, då ein slepp å tenke ut relevante komponentar og delsystem med tilhøyrande feilmodar for kvar ny analyse. For RCM-analysar, som blir nytta til å optimalisere førebyggjande vedlikehald, brukar Bane NOR allereie standardiserte feilmodar (Jernbaneverket, 2011a). Då dei same objekta inngår i både RAM-analysar og RCM-analysar vil det vere naturleg å hente inspirasjon frå dei allereie etablerte feilmodane for RCM-analysar, for å eventuelt kunne etablere standardiserte feilmodar til bruk i RAM-analysar.

I nokre av dei studerte analyserapportane ser ein at det, for gjennomføring av den aktuelle RAM-analysen, er tydd til tidlegare gjennomførte RAM-analysar for å hente inn nødvendig innputt. Dette vil truleg ikkje vere nødvendig dersom det er enkelt å hente inn innputt til analysane, noko som meir omfattande bruk av statistikk og standardiserte feilmodar truleg kan bidra til. Ved meir omfattande bruk av statistikk og standardisering i analysane vil det

vere viktig å ha fokus på at dette er meint som eit hjelpemiddel i gjennomføring av analysane, men at det ikkje er meint for å stanse tankeverksemd blant analysedeltakarane.

3.3.5 Handtering av usikkerheit

Felles for dei kvantitative analysane som er studert er at dei har stor grad av usikkerheit. I analyserapportane er det trekt fram usikkerheit knytt til innputt til analysane, komplettheit i identifikasjon av feilmodar, korrektheit av føresetnader for gjennomføring av analysane og effekten av mange forenklingar i modellane som er nytta. Dette samsvarar godt med generell litteratur på området (sjå til dømes Rausand (2013)), som skil mellom komplettheit, modell og parametarar som dei tre hovudbidragsytarane til usikkerheit i denne typen analysar.

Resultat frå ei kvantitativ analyse vil alltid ha ei viss grad av usikkerheit (Rausand, 2013). Det vil altså ikkje vere muleg å fjerne usikkerheita i analysane fullstendig, men enkelte tiltak kan gjerast for å redusere den. RAMS-handboka nemner ikkje noko om handtering av usikkerheit i RAM-analysane, men i dei gjennomgånge analyserapportane er ulike tiltak gjort for å handtere og synleggjere usikkerheit. Då usikkerheit er noko som går igjen i alle dei studerte analysane, verkar det fornuftig å inkludere noko om dette i Bane NOR sine retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar. På denne måten kan dei ulike prosjekta få ei felles forståing for korleis usikkerheit kan handterast ved gjennomføring av RAM-analysar.

I fleire av dei studerte analyserapportane er det kommentert at bruk av ekspertvurderingar fører til at resultatet frå analysen vil vere avhengig av erfaring og kompetanse til dei som er med i analyseprosessen. Bruk av statistikk og standardisering av innputt til analysane, i større omfang enn i dag, vil kunne redusere noko av denne subjektive variasjonen. I fleire av analysane som inngår i dokumentstudiet er det også nytta konservative verdiar, noko som fører til større sikkerheit i at dersom eit akseptkriterium blir nådd, så stemmer dette. Ifølgje Rausand (2013) kan ei konservativ tilnærming i mange tilfelle vere tilstrekkeleg for at ein skal kunne ha fortrulegheit med resultatata frå ei analyse.

I InterCity-analysane er det gjennomført sensitivitetsbetraktningar for analysane som er gjennomført i detaljplanfasen. Dersom konklusjonen frå analysen framleis blir den same etter å ha endra parametrane i analysen til andre sannsynlege verdiar, kan sensitivitetsbetraktningane bidra til å styrke konklusjonen i analysen. For analysen som er utført i hovudplanfasen til prosjektet er det ikkje gjennomført sensitivitetsbetraktningar, sjølv

om usikkerheit er trekt fram på same måte som i analysane frå detaljplanfasen. Såleis er usikkerheit i denne analysen forskyvd vidare til neste prosjektfase, noko som i grunnen verkar fornuftig, då RAM-analysen i hovudplanfasen berre skal vere ei overordna analyse, og den detaljerte analysen ikkje skal gjerast før i detaljplanfasen til prosjektet.

Monte Carlo simulering er nytta som eit verktøy for å synleggjere usikkerheita i Ulrikenanalysen. Metoden opnar opp for ei større forståing for, og inkludering av, usikkerheit i analysane. På den andre sida krev Monte Carlo simuleringar både innkjøp og opplæring i simuleringsverktøy, samt at brukaren har ei viss forståing for statistikk, og såleis kan det bli ressurskrevjande både tids- og pengemessig å bruke verktøyet. I Ulrikenanalysen er Monte Carlo metodikken som er nytta gjennomført på eit relativt enkelt nivå, men meir avanserte modelleringar enn det som er gjort i denne analysen er muleg. Dette ser ein til dømes i Pistolas og Vernon (2016), der Monte Carlo simulering er teke i bruk i eit simuleringsverktøy for gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Storbritannia.

3.3.6 Kvalitativ eller kvantitativ RAM-analysemetodikk

Blant dei kvalitative analysane som er studert, derunder også analysen som er delvis-kvantitativ, er alle gjennomført før gjeldande retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar i Bane NOR tredde i kraft. Vurdering av analysane opp imot dagens retningslinjer verkar difor litt urettferdig. Samtidig er ingen av analysane i dokumentstudien daterte før 2011, og på dette tidspunktet eksisterte både Jernbaneverket (2011b) og Jernbaneverket (2011c), som gir retningslinjer for gjennomføring av kvantitative RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg.

Felles for dei kvantitative analysane er at dei, i tråd med retningslinjene til Bane NOR, gir eit estimat på kor mange årlege forseinkingstimar den analyserte jernbaneinfrastrukturen vil føre til. I dei kvalitative analysane får ein ikkje svar på dette, og det blir dermed vanskeleg å sikre at infrastrukturen vil tilfredsstillе akseptkriterium for analysert strekning. Likevel gir dei kvalitative analysane eit utgangspunkt for å avgjere kvar ressursar bør settast inn for å oppnå god oppetid, og i dei fleste analyserapportane er det kome med forslag til tiltak for å betre RAM-forholda på den aktuelle strekninga. Ved å sjå på kva objekt som bidreg mest til forseinking og kanselleringar på den aktuelle strekninga, får ein også i dei kvantitative analysane ein peikepinn på kvar resursar bør settast inn for å oppnå god oppetid. I desse analysane er det derimot ikkje fokus på å foreslå tiltak for å betre RAM-forholda på

strekninga på same måte som i dei kvalitative analysane, og analysemetodikken til Bane NOR legg heller ikkje opp til at dette skal gjerast. Likevel skal tiltak for betring av RAM-forhold vurderast dersom dei kvantitative analysane viser at RAM-krav ikkje blir nådd. Sjølv om dei kvalitative analysane ikkje kan svare på om akseptkriterium blir nådd, er gjennomføring av analysane med på å sette fokus på RAM i eit prosjekt. Der det er krav om kvantitative analysar vil derimot dette ikkje vere tilfredsstillande, men i andre tilfelle kan analysane tenkast som eit nyttig verktøy for å betre RAM-forholda på ei strekning.

For ein lesar er det vanskeleg å vite om nødvendig vurdering av omfang av RAM-analyse er gjort eller ikkje, når det i dei studerte kvalitative analysane er ein gjengangar at grunngeving for valt metode er manglande eller vag. I eit par av dei kvalitative analyserapportane som ikkje har grunnge val av analysemetodikk, er det trekt fram at RAM-akseptkriterium ikkje er definert av Bane NOR på analysetidspunktet. Sidan dei kvantitative analysane legg opp til at eit akseptkriterium skal validerast, kan det tenkast at mangel på definert akseptkriterium har støtta val av kvalitativ analysemetode i desse analysane. Det er derimot verdt å merke seg at Jernbaneverket (2011c), som fleire av dei kvantitative analyserapportane har teke utgangspunkt i for utrekning av akseptkriterium for forseinkingstimar, eksisterte allereie i 2011. Utifrå dette er det, iallfall for analysane som er gjennomført etter 2011, eit svakt argument å bruke mangel på definert akseptkriterium for RAM-forhold for å ikkje gjennomføre kvantitativ RAM-analyse.

I analyserapport UFB-40-Q-40222 er val av kvalitativ metode grunngeve med stor usikkerheit rundt inputtverdiar, feilmodar og føresetnader for analysen. Likevel viser dokumentstudien fleire døme på kvantitative analysar som er gjennomført med relevant inputtdata der usikkerheit har vore kommentert og handtert på ulike måtar, og ein skulle difor tru at det var muleg å få til også for denne analysen.

I den semi-kvantitative analysen i analyserapport UOS-10-Q-13823 er val av metode grunngeve med at kvantitativ RAM-analyse ikkje er nødvendig for prosjektet, fordi ingen nye element blir innført i systemet. På bakgrunn av dette er det ikkje grunn til å tru at oppetida eller vedlikehaldsmodellen til systemet blir endra. I følgje retningslinjene for gjennomføring av RAM-analysar i Bane NOR (2017l), støttar dette avgjersla av at kvantitativ RAM-analyse ikkje er nødvendig i dette tilfellet.

Det faktum at alle dei studerte kvalitative analysane er gjennomførte før RAMS-handboka blei gjeldande, kan tyde på at innføring av denne har gjort det enklare å utføre kvantitative RAM-analysar, og samtidig vanskelegare å rettferdiggjere bruk av kvalitative RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Det er også verdt å merke seg at ingen av dei kvantitative analysane som er studerte i denne omgang er produserte før 2013, som er same året som den semi-kvantitative analyserapporten UFB-40-Q-40222 er produsert. Resten av dei kvalitative analyserapportane er produserte før år 2013. Dette kan tyde på at det var manglande forståing for, og manglande erfaring med, gjennomføring av kvantitative RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg før år 2013, og kanskje mykje av det eigentlege problemet med gjennomføring av kvantitativ RAM-analyse låg her. På den andre sida er utvalet av RAM-analysar som er studert i denne oppgåva avgrensa, og eit større utval av analysar bør studerast før det eventuelt kan trekkast ein slik konklusjon.

3.3.7 Områder for forbedring i RAM-analysemetodikken til Bane NOR

Dokumentstudien viser at det er fleire utfordringar og forbedringsområder i RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Kort oppsummert er det, basert på dokumentstudien i oppgåva, kome fram til følgjande forslag til tiltak som kan vere med på å forbetre Bane NOR sin RAM-analysemetodikk:

- Større grad av standardisering, derunder standardiserte feilmodar og tydeleg definisjon av kva som er rekna som forseinking.
- Innføring av akseptkriterium for regularitet på lik linje med akseptkriterium for forseinking.
- Nærmare vurdering av metode for fastsetting av akseptkriterium.
- Retningslinjer for handtering av usikkerheit.
- Bruk av statistikk og erfaringsdata i større omfang enn i dag.

3.3.8 Evaluering av metode

Dokumentstudien av analyserapportar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar har gjort det muleg å samle inn erfaringar og få oversikt over praksis for gjennomføring av RAM-analysar over ei tidsperiode på fleire år, med fleire ulike prosjekt og analysegruppesamansettingar. Samtidig har metoden gjort at informasjon om gjennomføring av RAM-analysar har avgrensa seg til det som er muleg å lese ut ifrå analyserapportane. I nokre tilfelle er det påstandar i

Kapittel 3. Dokumentstudie av RAM-analyserapportar

analyserapportane som har vore vanskeleg å sjekke nærmare opp, og det er difor måtte gått utifrå at informasjonen som er oppgitt i rapportane er korrekt.

Guiden i vedlegg B, som er nytta til gjennomgang av RAM-analyserapportane, har vore med på å sikre at analyserapportane er vurdert på mest muleg lik måte, samt at essensiell informasjon ikkje er gløymt i gjennomgangen av ein rapport. Ved hjelp av den utvikla guiden er det også sikra at vurdering av innhaldet i rapportane, opp imot gjeldande krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar, har stått i fokus i dokumentstudien. Metoden gir såleis eit godt grunnlag for å kome med forslag til forbetringar for RAM-analysemetodikken til Bane NOR, basert på erfaringar frå tidlegare gjennomførte RAM-analysar.

4 Statistiske metodar

I kapittel 3 er bruk av statistikk og erfaringsdata, i større omfang enn i dag, foreslått som eit av fleire forbetringstiltak for RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Dette er det gått nærmare inn på vidare i rapporten. Som eit grunnlag for å forstå dei statistiske analysane som er presentert i kapittel 5, gir dette kapitlet eit innblikk i relevant statistisk teori. Kapitlet startar med ein kort introduksjon til omgrepet korrelasjon, for så å fortsette med å forklare regresjon, og då hovudsakleg multippel lineær regresjon. Deretter er det fokusert på metodar for testing av godheita til ein regresjonsmodell.

4.1 Korrelasjon

Korrelasjonsanalysar undersøker om det er ein lineær samanheng mellom variablar (Løvås, 2004). Styrken til ein lineær samanheng blir uttrykt ved hjelp av ein korrelasjonskoeffisient, som er ein verdi som varierer mellom -1 og +1 (Grønmo, 2004). Korrelasjonskoeffisienten til observasjonspara $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ kan reknast ut ved hjelp av Formel 4.1, og antyder kor sterk lineær samanheng det er mellom to variablar (Løvås, 2004). Til større absoluttverdien til korrelasjonskoeffisienten er, til sterkare er samanhengen. I formelen representerer \bar{y} og \bar{x} gjennomsnittet av høvesvis alle y-observasjonane og alle x-observasjonane i det innsamla datamaterialet.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

4.2 Multippel lineær regresjon

Regresjonsanalysar tek sikte på å oppdage korleis ein eller fleire uavhengige variablar påverkar andre avhengige variablar (Sen, Srivastava og SpringerLink, 1990). Ei lineær regresjonsanalyse som inneheld meir enn éin uavhengig variabel, blir kalla ei multippel regresjonsanalyse (Løvås, 2004). Uavhengige variablar er forklaringsvariablar og blir plasserte på x-aksen i eit spreingsdiagram. Den avhengige variabelen er responsvariabelen og blir plassert på y-aksen i spreingsdiagrammet, dersom ein ser på ein og ein forklaringsvariabel kvar for seg.

Forklaringsvariablar kan delast inn i kontinuerlege, kategoriske og diskrete variablar, alt etter kva type observasjonar dei representerer (Løvås, 2004). Kontinuerlege og diskrete variablar er

kvantitative variablar, mens kategoriske variablar er kvalitative variablar. Dei kontinuerlege variablane inkluderer alle tal, mens diskrete variablar inkluderer berre enkelte tal langs talskalaen, som til dømes heiltal (Løvås, 2004). Dei kategoriske variablane omfattar observasjonar som ikkje er kvantitative av natur, og observasjonane er tilordna eit sett av forskjellige grupper eller kategoriar (Multon og Coleman, 2010). Objekttype er døme på ein kategorisk variabel.

Dersom ein går utifrå at det er ein lineær samanheng mellom ein respons Y og forklaringsvariablane x_1 , x_2 og x_3 , kan denne samanhengen framstillast ved hjelp av Formel 4.2 (Løvås, 2004). Feilledd, eller residualar, er også inkludert i formelen. Dette er andre, meir tilfeldige faktorar enn forklaringsvariablane, som spelar inn på verdien til Y (Løvås, 2004). I Formel 4.2 er feilledd representert som e_i , mens koeffisientane α og β er ukjente, men konstante storleikar.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + e_i \quad (4.2)$$

Ei regresjonslinje blir nytta for å gi eit best muleg estimat til samanhengen mellom forklaringsvariablane og ein responsvariabel, og likninga til denne linja er gitt av Formel 4.3 (Løvås, 2004). Denne likninga er svært lik likninga i Formel 4.2, men "hatten" over dei ulike ledda i formelen symboliserer ein tilpassa verdi til den faktiske verdien, og feilleddet er ikkje teke med i formelen. I ei regresjonsanalyse blir dei ukjente koeffisientane i likninga til regresjonslinja estimert på bakgrunn av innsamla datamateriell. Det innsamla datamateriellet vil bestå av y -verdiar, med tilhøyrande x -verdiar, som kan plottast som punkt i eit spreingsdiagram.

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 \quad (4.3)$$

4.2.1 Minste kvadrat-metoden

Minste kvadrat-metoden blir nytta for å lage ei regresjonslinje som stemmer best muleg overeins med innsamla datamateriale, slik at avstanden mellom regresjonslinja og dei enkelte punkta si faktiske plassering blir minst muleg (Grønmo, 2004). Formel 4.4 viser korleis minste kvadrat-metoden blir nytta til å rekne ut koeffisientane $\hat{\alpha}$ og $\hat{\beta}$ for ei rett linje, når ein har det innsamla datamateriellet $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ (Løvås, 2004).

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad (4.4)$$

Formel 4.4 kan også skrivast på matriseform, og såleis utvidast til å innehalde fleire dimensjonar, noko som kan vere særleg nyttig når det er fleire forklaringsvariablar i ein regresjonsmodell (Walpole, 2016).

4.2.2 Forklaringsgrad

Bestemmelseskoeffisienten R^2 indikerer kor stor del av den totale variasjonen i ein responsvariabel som kan forklarast av ein regresjonsmodell, og blir rekna ut ved hjelp av Formel 4.5 (Walpole, 2016). Dersom verdien til R^2 er høg kan ein gå utifrå at modellen er god (Løvås, 2004). Samtidig er det verdt å merke seg at R^2 aldri vil bli redusert dersom ein legg til fleire forklaringsvariablar i ein modell, sjølv om modellen ikkje nødvendigvis blir betre (Walpole, 2016). For multiple regresjonsanalysar er difor justert R^2 eit betre mål enn R^2 på kor god ein regresjonsmodell er. Justert R^2 reknast ut ved hjelp av Formel 4.6, og tek omsyn til storleik på datasettet (n) og tal på forklaringsvariablar (k) (Walpole, 2016).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.5)$$

$$R_{justert}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / (n - k - 1)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1)} \quad (4.6)$$

4.2.3 Signifikanssannsyn

Til trass for at regresjonsanalysar baserar seg på at det er ein samanheng mellom ein avhengig variabel og ein eller fleire uavhengige variablar, vil det vere ei mulegheit for at denne samanhengen ikkje eksisterer. Ein ikkje-eksisterande samanheng mellom variablane blir representert av ei nullhypotese, og signifikanssannsynet, eller p-verdien, gir informasjon om sannsynet for å få eit resultat som er minst like ekstremt som det observerte resultatet, dersom nullhypotesen er rett (Løvås, 2004). Alternativet til nullhypotesen er hypotesen om at det er ein samanheng mellom variablane. Viss p-verdien er låg, noko den vanlegvis er rekna som dersom den har ein verdi på under 0,05, kan ein forkaste nullhypotesen utan særleg risiko for å gjere feil (Løvås, 2004).

4.2.4 Føresetnader

For å sikre at resultatane frå lineære multiple regresjonsanalysar er gyldige, må følgjande føresetnader vere tilfredsstillt: (Laerd Statistics, 2015)

1. Det må vere ein tilnærma lineær samanheng mellom den avhengige variabelen og dei uavhengige variablane.
2. Variansen til residualane må vere konstant, uavhengig av x-verdiane.
3. Residualane må vere uavhengige av kvarandre.
4. Residualane må vere normalfordelte.
5. Ingen av forklaringsvariablane må vere sterkt korrelerte med kvarandre.
6. Det skal ikkje vere betydelige uteliggjarar eller innflytelsesrike punkt i modellen.

Fleire ulike metodar kan nyttast for å undersøke om dei lista føresetnadane er tilfredsstillt i ein regresjonsmodell. Den fyrste føresetnaden kan undersøkast ved hjelp av spreingsplott og korrelasjonsanalysar (Laerd Statistics, 2015). For å undersøke om føresetnad nummer 2, 3 og 4 er tilfredsstillt kan ein teikne opp ulike typar residualplott. For desse plotta estimerast residualane ved å ta differansen mellom observert verdi og den verdien regresjonslinja gir eit uttrykk for (Løvås, 2004). Dette er vist i Formel 4.7.

$$\hat{e}_i = Y_i - (\hat{\alpha} + \hat{\beta}_i x_i) \quad (4.7)$$

Føresetnad nummer 5 kan undersøkast ved hjelp av korrelasjonsanalysar, og den siste føresetnaden kan undersøkast ved hjelp av til dømes spreingsplott, eller bruk av standardavvik for å ta bort verdiar med høgt avvik frå resten av talmaterialet (Laerd Statistics, 2015). Det er gått nærmare inn på dei ulike føresetnadane og metodar for å teste dei, samt konsekvensar av å ikkje tilfredsstillte føresetnadane, i delkapittel 5.5.1.

5 Statistiske analysar

Dette kapitlet tek for seg mulegheiter for bruk av erfaringsdata og statistikk som hjelpemiddel ved gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Hovudfokuset i kapitlet er på regresjonsanalysar, som er gjennomført for å finne ein samanheng mellom feil i jernbaneinfrastruktur og forseinking i togtrafikken. I tillegg er det gjort statistiske analysar der fordeling og sannsyn av lengde på nedetid ved feil er studert for nokre utvalte objekttypar. I kapitlet er det gått nærmare inn på hypotesar som har danna grunnlaget for analysane, korleis data er henta inn og resultatet frå analysane.

5.1 Bakgrunn

Vurdering av omfang av forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur er eit av hovudfokusområda i RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Funn frå dokumentstudien i kapittel 3 viser at i tillegg til bruk av ekspertvurderingar for å estimere forseinking, slik analysemetodikken til Bane NOR legg opp til, er det i nokre tidlegare gjennomførte RAM-analysar nytta matematiske formlar for å rekne seg fram til denne informasjonen. Desse framgangsmetodane for estimering av forseinking kan derimot vere utfordrande å nytte ved kompleks infrastruktur, der feil gjerne fører til følgjeforseinking i tillegg til primærforseinking.

Ved å nytte regresjonsanalysar til å finne ein samanheng mellom forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur og faktorar som kan forklare denne forseinkinga, er det tenkeleg at dette kan dragast nytte av ved estimering av forseinking i framtidige RAM-analysar.

Utgangspunktet for dei statistiske analysane som er gjennomført i oppgåva er ei hypotese om at det er ein positiv korrelasjon mellom nedetid ved feil i jernbaneinfrastruktur og forseinking i togtrafikken, slik at lang nedetid fører til meir forseinking enn kort nedetid. Bakgrunnen for hypotesen er at ein feil i jernbaneinfrastrukturen ofte fører til enten full stopp i togtrafikken, saktekøyning, eller bruk av alternative togvegar, noko som igjen gjerne fører til at tog blir forseinka. Til trass for utgangspunktet for dei statistiske analysane viser tidlegare forskning at det er fleire ulike faktorar som spelar inn på forseinking i togtrafikken. Dette er det gått nærmare inn på i delkapittel 5.1.1, før forklaringsvariablane som er nytta i regresjonsanalysane er presentert i delkapittel 5.1.2.

Vurdering av lengde på nedetid ved feil baserar seg også på ekspertvurderingar i RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Det er difor tenkeleg at ei oversikt over fordeling og sannsyn av lengde på nedetid ved feil for sentrale objekttypar kan fungere som eit hjelpemiddel ved estimering av lengde på nedetid i framtidige RAM-analysar.

I oppgåva er forseinking sett på både som total forseinking ved feil i infrastrukturen og som gjennomsnittleg forseinking per tog som er påverka av ein feil i infrastrukturen. I RAM-analysane er det den totale forseinkinga som er i fokus. Likevel er det også vurdert som interessant å sjå på den gjennomsnittlege forseinkinga per tog som er påverka av ein feil, for å sjå etter eventuelle samanhengar og likheitstrekk med den totale forseinkinga.

Gjennomsnittleg forseinking per tog er eit mål som også gjerne er nyttig i eit forbrukarperspektiv, då dette seier noko om kor mykje forseinking ein kan forvente seg dersom eit tog er forseinka. Dei to tilnærmingane til forseinking er analyserte med dei same forklaringsvariablane.

5.1.1 Bakgrunn for val av forklaringsvariablar

Som eit grunnlag for å avgjere nyttige forklaringsvariablar til bruk i regresjonsanalysane er det gjort ein kort litteraturgjennomgang, der det er sett på litteratur som omhandlar faktorar som kan forklare forseinking som oppstår ved feil i jernbaneinfrastruktur.

Jiang og Persson (2016) ser på forholdet mellom feil i jernbaneinfrastruktur og kor mykje forseinking som oppstår, ved hjelp av variablane banetype, togtype, togfølgetid og tal på feil i infrastrukturen. Bortsett frå dette er det funne lite litteratur som går direkte på samanhengen mellom feil i jernbaneinfrastruktur og forseinking, noko som blir støtta av Jiang og Persson (2016) som seier at denne kunnskapen er mangelfull. For å få eit betre grunnlag for val av forklaringsvariablar er det difor også sett på litteratur som omhandlar generell forseinking i togtrafikken og punktlegheitsforklarande faktorar.

I følge Olsson, *et al.* (2015) er vær og klima, kapasitetsbruk, oppførselen til reisande, utforming av tog og plattform samt trafikkstyring faktorar som går igjen i studiar som er gjort for å avdekke årsaker til forseinkingar i togtrafikken. Olsson og Haugland (2004) har gjennomført eit studie av nokre ulike faktorar som kan påverke punktlegheita til jernbanen i Noreg, og konkluderer med ein signifikant samheng mellom punktlegheit og følgjande faktorar: tal på passasjerar, passasjerar per sete, kapasitetsutnytting, togtype og kanselleringar.

I Olsson og Haugland (2004) er det også gjort ei oppsummering på forskning som andre har gjennomført innanfor emnet, og utifrå dette er lengde på togstrekning, lengde på tog, gjennomsnittstemperatur, nedbør, tal på passasjerar, togtype, effektivitet av på- og avstiging for passasjerar, stasjonar, tognummer, vekedag og veke samt kapasitetsutnytting trekt fram som punktlegheitsforklarande faktorar for togtrafikk.

5.1.2 Forklaringsvariablar

Basert på tidlegare forskning og informasjon som har vore muleg å få tak i er det valt å, i tillegg til å studere korleis nedetid påverkar forseinking som oppstår ved feil i jernbaneinfrastruktur, også sjå på følgjande forklaringsvariablar:

- Kapasitetsutnytting
- Tal på tog
- Faggruppetilhøyrigheit til objekt som har feila
- Banetilhøyrigheit til objekt som har feila
- Tidspunkt for feil

Ei strekning med høg kapasitetsutnytting har mindre avstand mellom kvart tog enn ei strekning med låg kapasitetsutnytting, noko som fører til større sannsyn for følgjeforseinkingar på strekningar med høg kapasitetsutnytting. Resultatet frå analysane er difor forventa å vise ein positiv korrelasjon mellom kapasitetsutnytting og forseinking.

Dersom det er mange tog som køyrer på ei strekning er det større sannsyn for at eit tog faktisk blir påverka av ein feil i infrastrukturen, enn dersom det er få tog på strekninga. I tillegg er det truleg også større sannsyn for å oppleve følgjeforseinkingar, og kryssing vil truleg vere meir utfordrande, på strekningar med mange tog. Det er difor forventa at resultatet frå analysane vil vise ein positiv korrelasjon mellom tal på tog på ei strekning og forseinking ved feil i infrastrukturen.

Objekta i infrastrukturen er delt inn i seks faggrupper. Dette er signal, underbygning, overbygning, høgspenning, tele og lågspenning. Det er tenkeleg at det innad i dei ulike faggruppene vil vere likheitstrekk i kva konsekvens ein feil fører til for togtrafikken, og det er difor tenkeleg at det kan vere ein samanheng mellom kva faggruppe eit objekt som feilar høyrer inn under og kor mykje forseinking feilen fører til.

Det norske jernbanenettet er delt inn i 21 forskjellige baner. Kva bane objektet som har feila høyrer til er tenkeleg at kan ha påverknad på kor mykje forseinking som vil oppstå ved feil. Grunnen til dette er blant anna at dei ulike banene har geografiske forskjellar som til dømes inneber ulikt klima og nedbørsmengder, som har vore trekt fram som forklaringsvariablar for forseinking i tidlegare forskning. I tillegg er det slik at sjølv om det kan vere ein del variasjonar også innad i dei ulike banene så er det gjerne likheitstrekk på til dømes faktorar som enkeltspor eller dobbeltspor, kurvatur og vedlikehaldsgjennomføring.

Ein feil kan skje enten i rushtida, på natta eller på eit anna tidspunkt på dagen. Rushtid er rekna som tidsromma mellom kl. 07.00-09.00 og 15.00-18.00, og er den tida på døgnet med flest både tog og passasjerar. Det er difor forventa at det i rushtida vil oppstå meir forseinking ved feil i infrastrukturen enn resten av døgnet. På den andre sida er natt rekna som den tida på døgnet då færrest tog og passasjerar nyttar seg av strekningane, og det er forventa at ein feil i tidspunktet mellom klokka 00.00 og 05.00 vil føre til mindre forseinking enn ein feil i rushtida eller på eit anna tidspunkt på dagen.

5.2 Datainnsamling

For å gjennomføre dei statistiske analysane er det henta inn informasjon om forseinking ved feil, nedetid ved feil, objekttype, faggruppetilhøyrighet, tidspunkt for feil og geografisk plassering av objektet som har feila frå dei to systema TIOS og BaneData. Informasjon frå systema er knytt saman ved hjelp av Hendelseslogg. TIOS, BaneData og Hendelseslogg er nærmare forklart i delkapittel 5.2.1 – 5.2.3.

Informasjon om kapasitetsutnytting og tal på tog på dei ulike togstrekningane er basert på statistikk frå Jernbaneverket (2015a). Totalt er jernbanenettet delt inn i 6 ulike kategoriar for kapasitetsutnytting i Jernbaneverket (2015a), og i regresjonsanalysane er det nytta eit geometrisk gjennomsnitt av grenseverdiane til kvar kategori. I Jernbaneverket (2015a) er også tal på tog delt inn i seks ulike kategoriar, og så er det i regresjonsanalysane nytta eit geometrisk gjennomsnitt av grenseverdiane til dei ulike kategoriane. Rundt dei største byane i landet er det derimot nytta eksakte tal på tog på strekningane. Dette er vurdert som spesielt hensiktsmessig for høgt trafikkerte strekningar, då kategorien med flest tog omfattar alle strekningar med over 130 tog per døgn. I høgt trafikkerte områder, som til dømes rundt Oslo Sentralstasjon, er det så mykje som 1007 tog per døgn.

5.2.1 TIOS

I TIOS blir alle togpasseringar inn og ut av jernbanestasjonar i Noreg registrert, og dersom eit tog er meir enn fire minutt forseinka, utifrå oppsett ruteplan, skal dette registrerast med ei årsakskode (Økland og Ekambaram, 2010). Det er totalt seksten ulike årsakskodar i TIOS, inndelt i dei overordna årsakskodane infrastruktur, trafikkavvikling, togselskap og utanforliggende forhold (Olsson, *et al.*, 2015). Berre forseinkingar der infrastruktur er registrert som overordna årsak er nytta i dei statistiske analysane i oppgåva. Registreringane i TIOS har informasjon om både relativ forseinking og absolutt forseinking, der den relative forseinkinga gir informasjon om kor mykje forseinking som har oppstått sidan førre stasjon, mens den absolutte forseinkinga gir informasjon om den totale forseinkinga til eit tog. Det er den absolutte forseinkinga som er nytta i dei gjennomførte statistiske analysane.

5.2.2 BaneData

BaneData er eit anleggsregister med informasjon om objekt som inngår i jernbaneinfrastrukturen, samt hendingar relatert til desse objekta, og brukast til vedlikehaldsstyring av infrastrukturen (Jernbaneverket, *et al.*, 2014). Feil i eit objekt er ei hending som registrerast i BaneData, og ei slik registrering inkluderer informasjon om når feilen skjedde, varigheita til feilen, feilretting og gjennomføring av vedlikehald. Kvart objekt er også registrert med kva delstrekning det geografisk høyrer til, og kva faggruppe det høyrer inn under.

5.2.3 Hendelseslogg for samankopling av informasjon

I Hendelseslogg skal alle avvik frå normal driftssituasjon på jernbanen registrerast (Bane NOR, 2017a). Kvar enkelt hending får tildelt eit hendingsnummer, og dette kan brukast til å kople saman informasjon frå TIOS og BaneData. I TIOS blir hendingsnummeret til ei hending i Hendelseslogg knytt til ei forseinking og ei årsak, mens i BaneData blir hendingsnummeret registrert på objektet som har feila og ført til forseinking (Olsson, *et al.*, 2015). På denne måten får ein eit meir nøyaktig bilde av årsak til forseinking, og meir relevant informasjon til bruk i ei RAM-analyse, enn dersom ein berre ser på dei overordna årsakskategoriene for forseinking som er nytta i TIOS.

5.2.4 Dataomfang

Nedetid ved feil

For analysar av lengde på nedetid ved feil i jernbaneinfrastrukturen er omfanget av data avgrensa av hendingar som er registrert som akutt korrigerande vedlikehald i BaneData, med tilhøyrande nedetid, for dei studerte objekttypene. I tillegg er det sett bort ifrå svært lange nedetider, då dei er vurdert som lite realistiske. Grensa på kva nedetider som er teke med i analysane er sett til nedetider med varigheit opp til 1000 minutt, då flesteparten av dei studerte nedetidene har lengde på godt under dette. Nedetider med lengde på over 1000 minutt har stor spreiding på kor lange dei er, og dei lengste nedetidene har varigheit på over eit år. Så lange nedetider er det lite truleg at ein typisk feil som blir studert i ei RAM-analyse vil ha. Grenseverdien for kva nedetidsregistreringar som er medrekna i analysane bidreg til å unngå unaturleg høge verdiar for sentralmåla i delkapittel 5.4, i tillegg til å unngå unødvendig høge verdiar på x-aksane i diagramma i det same delkapitlet. Det er gått nærmare inn på kor mange feiltilfelle som er studerte for dei ulike objekttypene i kapittel 5.4.

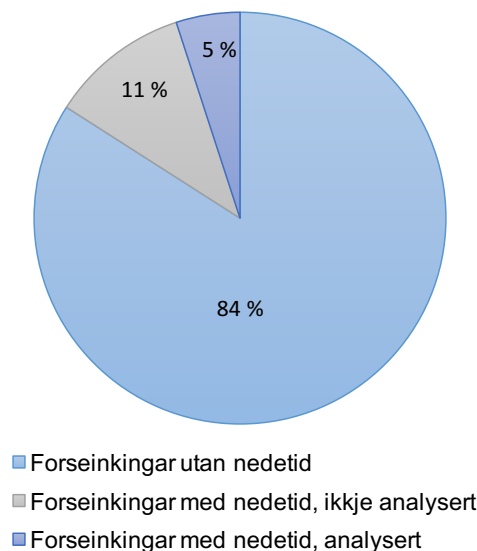
Regresjonsanalysar

Omfanget av data som er nytta for å analysere forholdet mellom forseinking og dei ulike forklaringsvariablane i delkapittel 5.1.1, er avgrensa av tal på forseinkingar i TIOS som er knytt til ei nedetid frå BaneData. I perioden som er analysert er det totalt registrert 480253 forseinkingar som følgje av infrastrukturfeil, og blant desse forseinkingane er 77634 av dei knytt til eit objekt med ei nedetid. Blant registreringane er det fleire forseinkingar og nedetider som er registrerte med ein verdi på null minutt. Ved å ta bort desse registreringane er omfanget av datamaterialet redusert til 61711 registreringar. Nokre av desse registreringane har nedetider som er vurdert som urealistisk lange. Det er difor valt å gjere ei vidare avgrensing av datamaterialet, slik at nedetider med varigheit over 300 minutt er sett bort ifrå i regresjonsanalysane. Valet av 300 minutt som grenseverdi for nedetider som er medrekna i analysane er gjort fordi det er gått ut ifrå at dei fleste feil har kortare nedetider enn dette, noko som også blir støtta av resultatet frå analysane for lengde på nedetid ved feil, som det er gått nærmare inn på i delkapittel 5.4.

Det endelege datamaterialet som er nytta i regresjonsanalysane omfattar 24080 forseinkingsregistreringar. Figur 5.1 gir ei grafisk framstilling av kor stor del av dei totale forseinkingane som er registrert i perioden som er knytt til ei nedetid, samt kor stor del av dei registrerte forseinkingane som er nytta i regresjonsanalysane. Sjølv om den delen av dei

registrerte forseinkingane som er nytta i regresjonsanalysane er låg samanlikna med det totale talet på registrerte forseinkingar, er det likevel vurdert som interessant å sjå etter ein trend i datamaterialet.

Forhold mellom registrerte og analyserte forseinkingar



Figur 5.1: Grafisk framstilling av forholdet mellom registrerte og analyserte forseinkingar.

5.3 Resultat frå analysar av nedetid ved feil

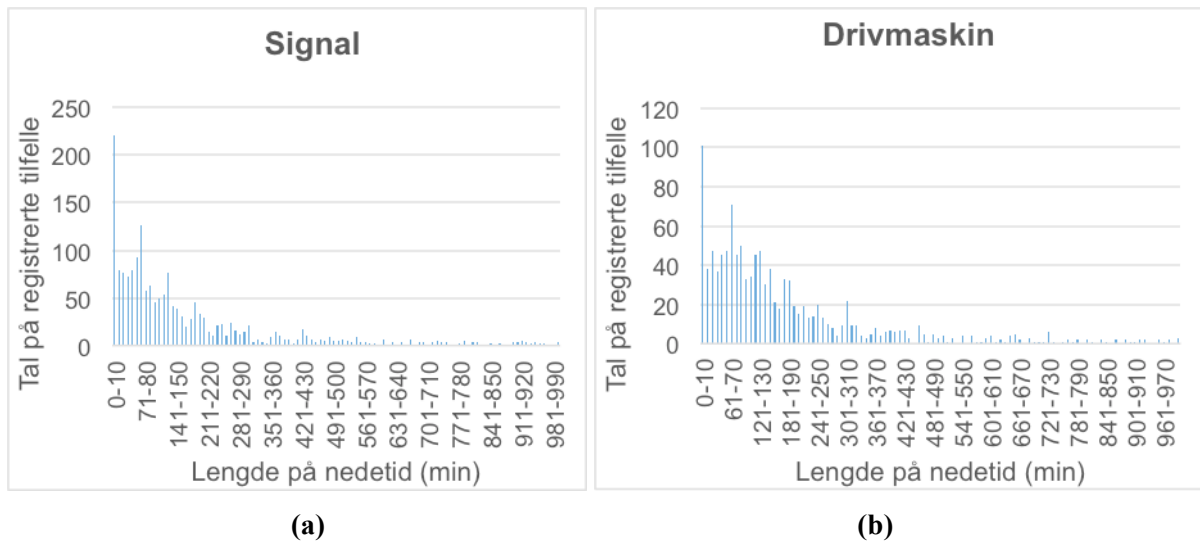
Sentralmål, histogram og Kaplan-Meier plott er nytta for å studere lengde på nedetid ved feil for nokre utvalte objekttypar. Tabell 5.1 viser ei oversikt over objekttypane som er studert med informasjon om gjennomsnittleg nedetid ved feil, median for det studerte datamaterialet samt tal på feiltilfelle som er studert. Utifrå tabellen ser ein at lengde på nedetid for dei ulike objekttypane varierer. Blant dei studerte objekttypane har signalfeil kortast både gjennomsnittleg nedetid og median, mens feil i sporgeometrien har lengst både gjennomsnittleg nedetid og median. Informasjonen i tabellen viser også at det er varierende kor mange feiltilfelle som er studerte for dei ulike objekttypane, noko som er eit naturleg resultat av at enkelte objekttypar har feila oftare enn andre i den studerte tidsperioden. Erfaringsdata frå objekttypane ATB-balise, kontaktledning og sporveksel er også studert, men for desse objekttypane har det registrerte datamaterialet vore betydeleg lågare enn for objekttypane som er lista i Tabell 5.1. Det er difor valt å ikkje gå nærmare inn på analysar av nedetid for desse objekttypane.

Tabell 5.1: Sentralmål for nedetid ved feil for utvalte objekttypar.

Objekttype	Studerte tilfelle (N)	Gjennomsnittleg nedetid (minutt)	Median (minutt)
Signal	1802	168,44	99,73
Sporfelt	1495	179,57	122,78
Drivmaskin	1162	177,63	119,51
Sporgeometri	676	212,78	175,18

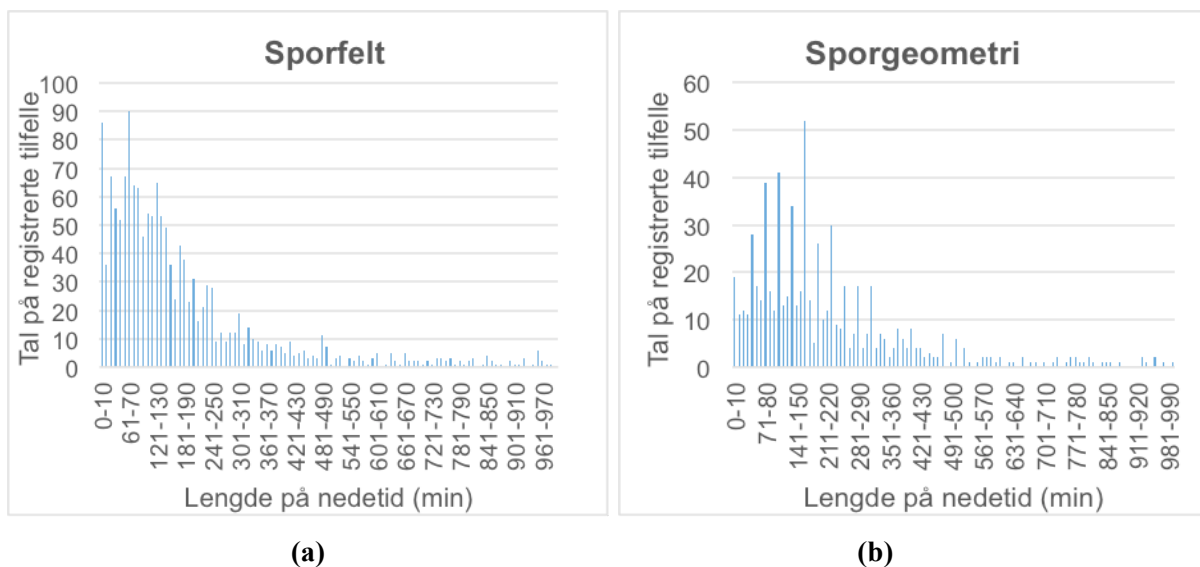
Variasjonen i nedetid ved feil for dei utvalte objekttypene er vidare studert og framstilt ved hjelp av histogram, der tal på registrerte tilfelle er vist på y-aksen, mens x-aksen representerer lengde på nedetid i minutt. Nedetidene er delt inn i grupper på ti og ti, der den fyrste gruppa utgjør nedetider opp til 10 minutt, neste gruppe nedetider opp til 20 minutt og så vidare til den siste gruppa stoppar på nedetider på 1000 minutt. Verdiane på y-aksane varierer alt etter kor mange registrerte tilfelle som har dei ulike nedetidene.

Figur 5.2 viser histogram med fordeling av nedetider ved feil for signal og drivmaskin. Frå figuren ser ein at for begge objekttypene er nedetider med varigheit på under 10 minutt den gruppa i histogramma som har flest registrerte tilfelle. Vidare ser ein at det er ein tendens til at tal på registrerte tilfelle blir mindre til lenger nedetida blir. Denne tendensen har derimot unntak, og for både signal og drivmaskin er nedetider med varigheit på 71-80 minutt den gruppa i histogramma med nest flest registrerte tilfelle. For begge objekttypene ser det ut til at det frå rundt 300 minutt er få registreringar for dei ulike gruppene i histogramma. Desse registreringane er likevel med på å drage verdiane for sentralmåla i Tabell 5.1 oppover.



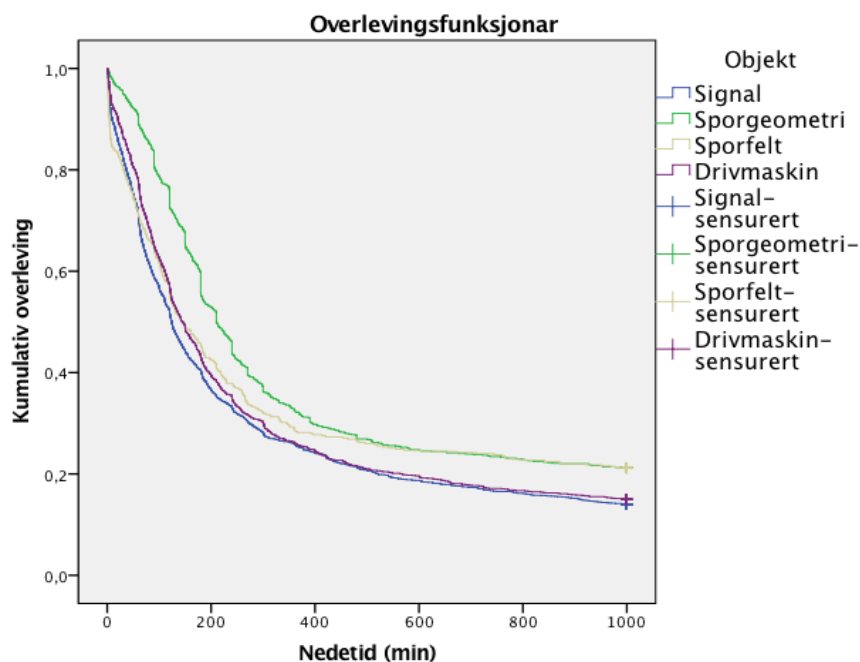
Figur 5.2: Histogram med fordeling av nedetider ved feil for (a) signal og (b) drivmaskin.

Fordeling av lengde på nedetid ved feil for sporfelt og sporgeometri er vist i Figur 5.3. For sporfelt ser ein den same tendensen som for signal og drivmaskin, der talet på feiltilfelle jamt over blir mindre til lenger nedetida blir. Til trass for denne tendensen er talet på registrerte tilfelle høgast for nedetider med varigheit mellom 61-70 minutt. For sporgeometri er det ikkje ein like tydeleg tendens til at talet på registrerte tilfelle blir mindre til lenger nedetida blir, og talet på registrerte tilfelle er høgast for nedetider med varigheit frå 161-170 minutt. Dette tyder på at feilretting for sporgeometri ofte er omfattande. Samtidig ser ein at det er registrert relativt mange feiltilfelle med nedetider heilt ifrå under 10 minutt og opp til omlag 300 minutt. Lengre nedetider enn dette er det færre registrerte tilfelle av.



Figur 5.3: Histogram med fordeling av nedetider ved feil for (a) sporfelt og (b) sporgeometri.

Figur 5.4 viser eit Kaplan-Meier plott med sannsynet for at dei studerte objekttypane ikkje er reparert etter ei viss tid. I dette plottet er registrerte feiltilfelle med nedetider på meir enn 1000 minutt inkludert som sensurerte tilfelle. Det vil seie at tilfella er inkludert i plottet på den måten at det er markert at dei framleis ikkje er reparert etter 1000 minutt. Plottet i Figur 5.4 viser at det etter null minutt er 100% sannsyn for at dei ulike objekttypane ikkje er reparert, deretter går sannsynet for at dei ulike objekttypane ikkje er reparert relativt raskt nedover, fram til det har gått omlag 400 minutt. Etter dette blir kurvane i plottet merkbart slakare, noko som tyder på at dersom det først har gått 400 minutt utan at eit objekt er reparert, så er det truleg at det vil kunne gå langt lenger tid før objektet er reparert. Fram til nærmare 400 minutt skil sporgeometri seg ut som den objekttypen som har størst sannsyn for å ikkje vere reparert, noko som tyder på at denne objekttypen har lengst reparasjonstid av dei studerte objekttypane. Signal har på den andre sida minst sannsyn for å ikkje vere reparert, noko som tyder på at denne objekttypen er den raskaste å reparere. Sannsynet for at sporfelt og drivmaskin ikkje er reparert ligg stort sett ein stad mellom sannsynet for at signal og sporfelt ikkje er reparert. Dette stemmer også overeins med det histogramma og sentralmåla tidlegare i delkapitlet viser. Frå om lag 400 minutt og vidare fram til 1000 minutt ser det ut til at sannsynet for å ikkje vere reparert er relativt likt for sporfelt og sporgeometri på den eine sida, og signal og drivmaskin på den andre sida. Etter 1000 minutt er det litt over 20% sannsyn for at objekttypane sporgeometri og sporfelt ikkje er reparert, og litt under 20% sannsyn for at objekttypane signal og drivmaskin ikkje er reparert.



Figur 5.4: Kaplan-Meier plott som viser sannsynet for at ulike objekttypar ikkje er reparert etter ei viss tid.

5.4 Resultat frå regresjonsanalysar

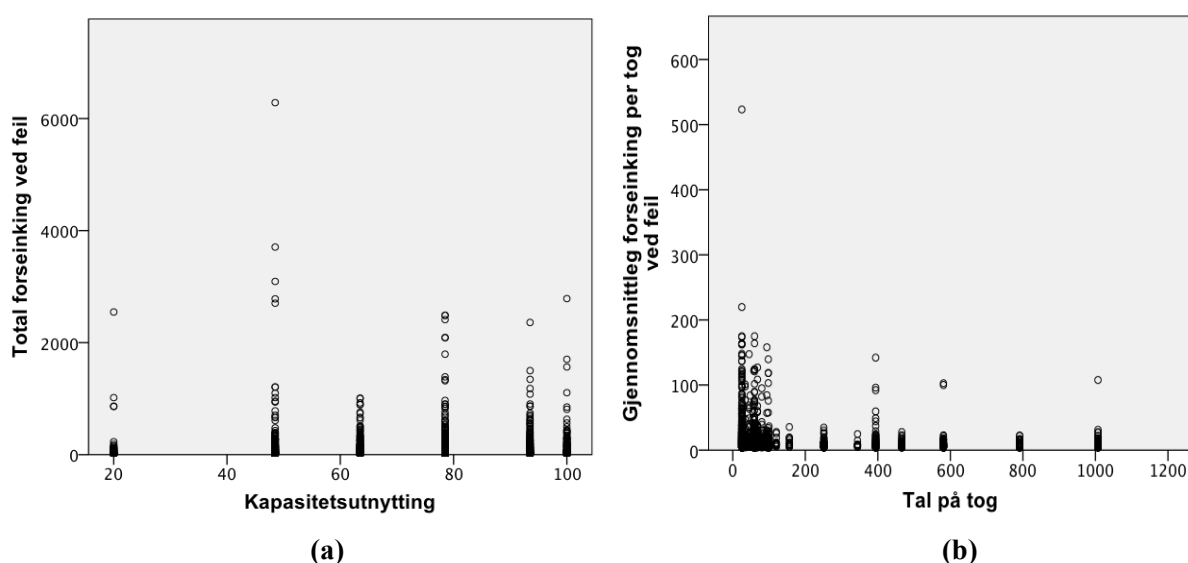
For å sjå på samanhengen mellom forseinking og dei ulike forklaringsvariablane i kapittel 5.1.2 er det gjennomført multiple regresjonsanalysar. Det er kome fram til ein regresjonsmodell for total forseinking ved feil i infrastrukturen, og ein modell for gjennomsnittleg forseinking per tog som er forseinka ved feil i infrastrukturen.

5.4.1 Kontroll av føresetnader

Ulike testar er gjort for å kontrollere om regresjonsmodellane tilfredsstillar føresetnadane for regresjon som er lista i kapittel 4.2.4. Resultatet frå dei ulike testane, og grunngeving av val som er gjort basert på desse resultatane, er presentert i dette delkapitlet.

Lineær samanheng

I startfasen av arbeidet er det gjennomført korrelasjonsanalysar og laga spreingsplott som har vist at det ikkje er ein tydeleg lineær samanheng mellom responsvariablane og forklaringsvariablane til regresjonsmodellane. Likevel er det slik at lineære modellar gjerne blir nytta ved statistisk analyse fordi det er matematisk lettvinnt, og i mange samanhengar vil ein slik modell gi ei god nok tilnærming til verkelegheita (Skog, 1998). Då spreingsplotta heller ikkje viser ein annan tydeleg samanheng, er det valt å ta utgangspunkt i at det er ein lineær samanheng mellom responsvariablane og forklaringsvariablane. Figur 5.5 viser døme på spreingsplotta som er laga for å sjå etter ein lineær samanheng mellom responsvariablane og forklaringsvariablane i regresjonsmodellane.



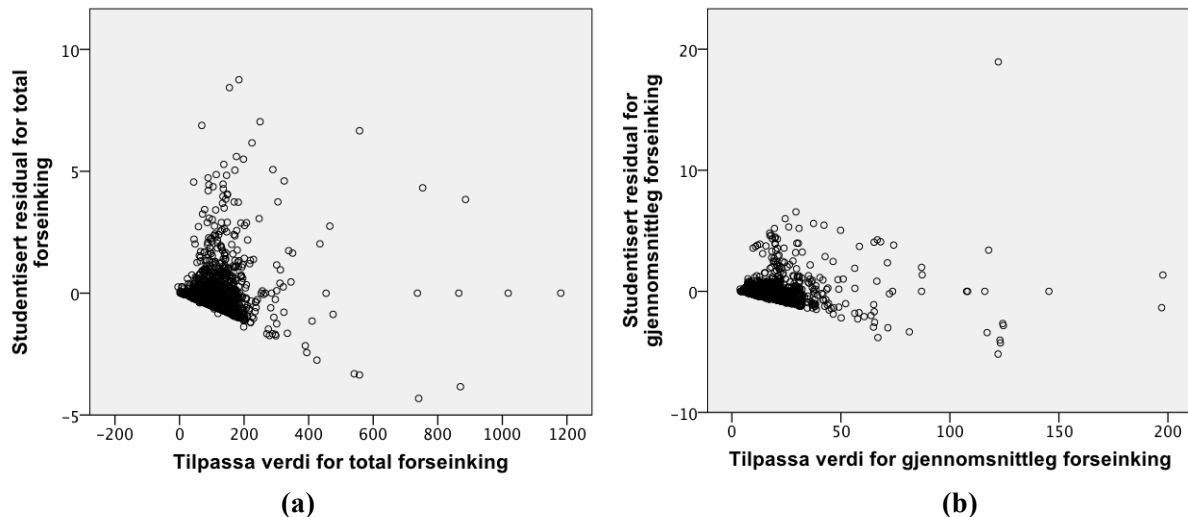
Figur 5.5: Spreingsplott for samanhengen mellom (a) kapasitetsutnytting og total forseinking ved feil og (b) tal på tog og gjennomsnittleg forseinking per tog ved feil.

Uavhengige residualar

Uavhengige residualar, eller autokorrelasjon, er eit vanleg problem når ein arbeider med tidsseriedata, som vil seie data som målar ei endring i ei tidsperiode (Skog, 1998). I denne analysen er det derimot ikkje målt endring i ei tidsperiode, men gjort ei utvalsundersøking der eit utval av det statistikken skal seie noko om er undersøkt. I slike tilfelle er det ikkje nødvendig å undersøke om det er autokorrelasjon i datamaterialet (Skog, 1998).

Konstant varians for residualane

Konstant varians for residualane, eller homoekadistet, får ein når variasjonane rundt ei regresjonslinje er like store for låge og høge verdiar av den avhengige variabelen (Skog, 1998). Dette er testa ved hjelp av residualplott og Levenes'test. I denne testen blir nullhypotesen om konstant varians testa, og for at føresetnaden skal vere tilfredsstillt må p-verdien vere på over 0,05. Regresjonsmodellane gir ikkje dette resultatet på Levene's test, og frå Figur 5.6, som viser residualplott for kontroll av homoekadistet for dei to regresjonsmodellane, ser ein også at det ikkje er konstant varians langs x-aksane for residualane.

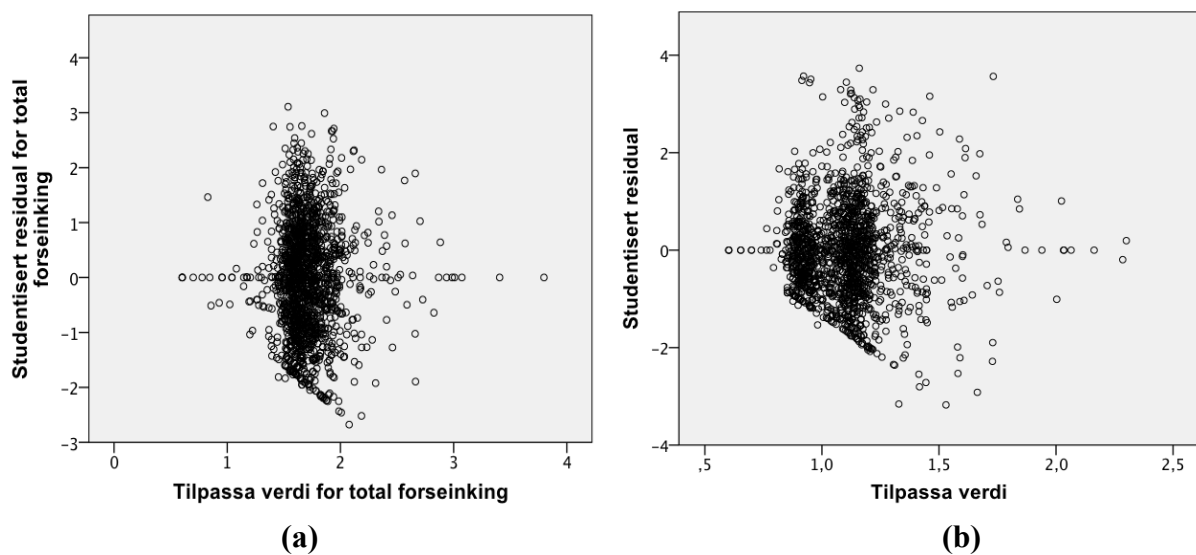


Figur 5.6: Residualplott for kontroll av homoekadistet for (a) modell for total forseinking og (b) modell for gjennomsnittleg forseinking per tog.

Dersom den opphavlege regresjonsmodellen ikkje gir homoekadistet, kan dette ofte fiksast ved hjelp av transformasjonar av ein eller fleire av variablane i regresjonsmodellen (Skog, 1998). Ved transformasjon blir den opphavlege variabelen modifisert, til dømes ved at ein tek logaritmen eller kvadratrotta av variabelen, og det blir danna ein ny variabel (Hair, *et al.*, 2010). Fleire ulike transformasjonar av variablane er testa ut for begge dei to

regresjonsmodellane, og i enkelte tilfelle har residualplotta vist at variansen for residualane har blitt likare. Likevel har ikkje transformasjonane gitt signifikante verdiar på Levene's test, og då forklaringsgrada til modellane har minka ved bruk av transformasjonar, er det valt å halde på dei opphavlege regresjonsmodellane.

Utan homoeskaditet vil estimata til koeffisientane i regresjonsmodellane likevel vere forventningsrette, som vil seie at det ikkje vil vere ein systematisk tendens til at verdiane er for høge eller for lave, men standardfeilen, som seier noko om kor mykje estimata kan kome til å avvike frå den korrekte verdien, vil bli feilaktig (Skog, 1998). Figur 5.7 viser residualplott av dei to regresjonsmodellane med logaritmisk transformasjon av responsvariabelen i kvar av modellane. Utifrå plotta ser ein at sjølv om variansen ikkje er konstant langs x-aksen, så er den meir lik for desse plotta enn for plotta i Figur 5.6, som ikkje inkluderer transformasjonar.



Figur 5.7: Residualplott for kontroll av homoeskaditet med logaritmisk transformasjon av responsvariabel for (a) modell for total forseinking og (b) modell for gjennomsnittleg forseinking per tog.

Ikkje sterkt korrelerte forklaringsvariablar

Dersom to eller fleire forklaringsvariablar er sterkt korrelerte med kvarandre oppstår multikollinearitet, som fører til problem med å forstå kva variabel som bidreg til forklart variasjon i ein regresjonsmodell (Laerd Statistics, 2015). Estimatet til koeffisientane til dei sterkt korrelerte variablane vil i slike tilfelle få ein større standardfeil enn dersom korrelasjonane er låge (Skog, 1998). Sidan begge regresjonsmodellane brukar dei same

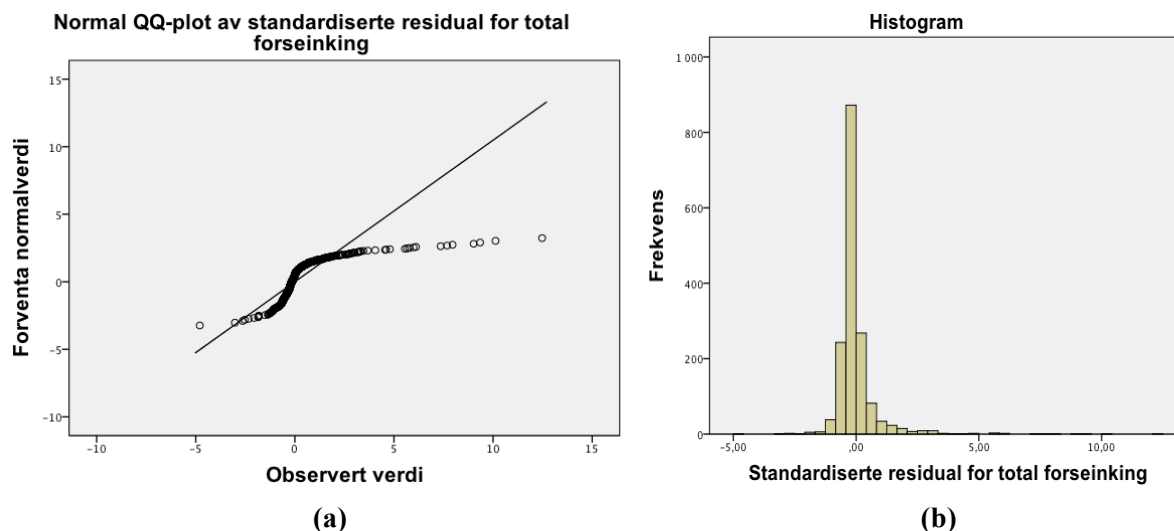
forklaringsvariablane er det laga ei felles korrelasjonsmatrise for å kontrollere om det er multikollinearitet i regresjonsmodellane. Korrelasjonsmatrisa er vist i Tabell 5.2. Matrisa viser at det ikkje er sterk korrelasjon mellom nokon av dei uavhengige variablane, noko som gjer at føresetnaden om ikkje sterkt korrelerte forklaringsvariablar er tilfredsstilt.

Tabell 5.2: Korrelasjonsmatrise for kontroll av multikollinearitet.

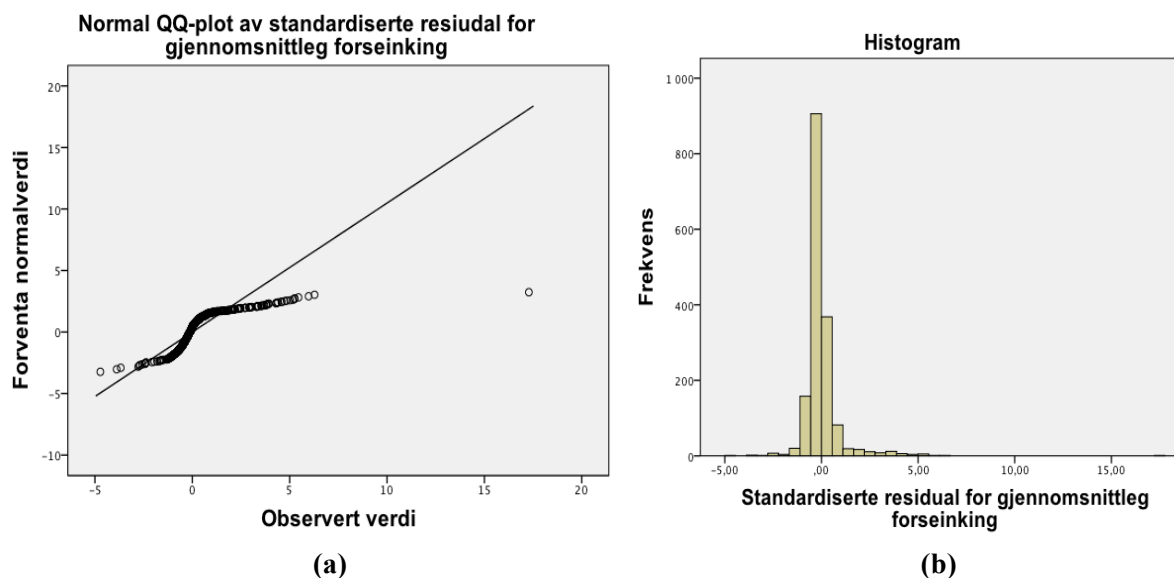
	Kapasitets- utnytting	Tal på tog	Nedetid ved feil	Faggruppe	Bane- strekning	Tidspunkt for feil
Kapasitets- utnytting	1	-0,187	0,016	-0,061	-0,288	-0,039
Tal på tog	-0,187	1	-0,217	-0,054	0,176	-0,026
Nedetid ved feil	0,016	-0,217	1	-0,047	-0,077	0,037
Objektet si faggruppe	-0,061	-0,054	-0,047	1	-0,026	-0,017
Banestrekning	-0,288	0,176	-0,077	-0,026	1	-0,015
Tidspunkt for feil	-0,039	-0,026	0,037	-0,017	-0,015	1

Normalfordelte residualar

Føresetnaden om normalfordelte residualar er testa ved hjelp av histogram og qq-plott, i tillegg til Kolmogorov-Smirnov test og Shapiro-Wilk test. Figur 5.8 og Figur 5.9 viser histogram og qq-plot av residualane til dei to regresjonsmodellane. For at føresetnaden skal vere tilfredsstilt skal histogramma sjå mest muleg normalfordelte ut, og i qq-plotta skal punkta ligge langs den rette linja som er teikna inn i diagramma. Dette er ikkje tilfelle for plotta i Figur 5.8 og Figur 5.9, og føresetnaden om normalfordelte residualar er difor ikkje tilfredsstilt. Dette blei også stadfesta av Kolmogorov-Smirnov test og Shapiro-Wilk test, som skal gi ein p-verdi på over 0,05 dersom residualane er normalfordelte. P-verdien var lågare enn 0,05 i begge testane, for begge regresjonsmodellane.



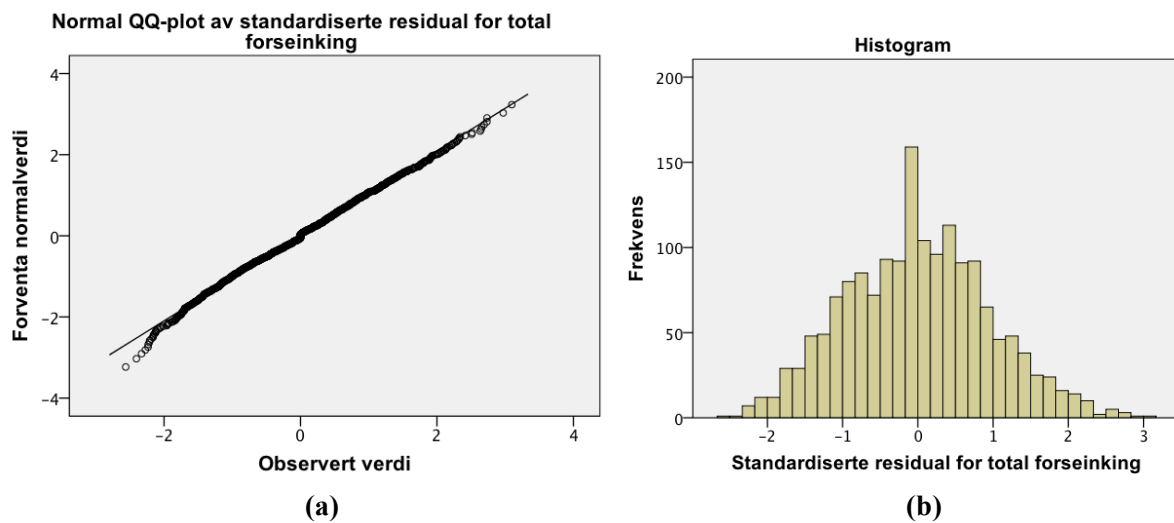
Figur 5.8: Residualplott (a) og histogram (b) for kontroll av føresetnaden om normalfordeling av residualar for regresjonsmodell for total forseinking.



Figur 5.9: Residualplott (a) og histogram (b) for kontroll av føresetnaden om normalfordeling av residualar for regresjonsmodell for gjennomsnittleg forseinking per tog.

Ulike transformasjonar av variablane i regresjonsmodellane er testa ut for å prøve å tilfredsstille føresetnaden om normalfordelte residualar. For begge modellane gir ein logaritmisk transformasjon av responsvariabelen den fordelinga som ser mest normalfordelt ut av dei testa transformasjonane. Resultatet frå transformasjonen er best for regresjonsmodellen med total forseinking, og qq-plot og histogram for denne transformasjonen er vist i Figur 5.10. Frå figuren ser ein at punkta i qq-plottet ligg ganske fint langs den rette linja, og histogrammet viser ei tilnærma normalfordeling, noko som tyder på at føresetnaden om

normalfordelte residualar er godt nok tilfredsstilt. Likevel viser resultat frå normalitetstestane ein p-verdi på under 0,05, og normalfordelinga er difor ikkje rekna som signifikant. Då forklaringsgrada i tillegg går merkbart ned ved bruk av transformasjonar, er det valt å halde på dei opphavlege regresjonsmodellane. Normalfordelte residualar er fyrst og fremst viktig for at verdien ein får ved utrekning av signifikanssannsyn skal vere gyldig, estimatet for koeffisientane vil vere forventningsrett og standardfeilen til estimatet til koeffisientane vil få eit korrekt anslag, sjølv om føresetnaden ikkje er tilfredsstilt (Skog, 1998).



Figur 5.10: Residualplott (a) og histogram (b) for kontroll av føresetnaden om normalfordeling av residualar for regresjonsmodell for total forseinking, med logaritmisk transformasjon av responsvariabel.

Uteliggarar

Uteliggarar er observasjonar som er lite sannsynlege og dei representerer difor ei "sjeldan hending" (Walpole, 2016). I ei regresjonsanalyse kan slike atypiske observasjonar ha stor påverknad på resultatet av analysen, og dei representerer både eit brot på føresetnaden om normalitet og føresetnaden om homoskedasitet (Skog, 1998). Meininga med å identifisere uteliggarar i ei regresjonsanalyse er å forsøke å eliminere nokre observasjonar for å forbetre modelltilpassinga (Yan og Su, 2009). Dersom ein kan gå utifrå at uteliggarane kjem av til dømes feilregistreringar i datamaterialet vil dette vere grunn til å ta dei bort, men om det ikkje er snakk om feil i datamaterialet kan det vere villeiande for resultatet til regresjonsanalysen å utelate dei (Skog, 1998).

Det er vanleg å nytte ± 3 standardavvik som ei grense for å avgjere om ein residual kan representere ein uteliggar eller ikkje (Laerd Statistics, 2015). Med desse grenseverdiane kan

22 av observasjonane reknast som uteliggjarar i modellen for total forseinking, mens i modellen for gjennomsnittleg forseinking kan 43 av observasjonane reknast som uteliggjarar. Utifrå det studerte datamaterialet er det vanskeleg å seie om desse uteliggjarane er feilregistreringar eller ikkje, og sidan det i togtrafikken er tenkeleg at det i enkelte tilfelle vil vere spesielle hendingar som kan gi uvanleg stor forseinking, er det valt å behalde uteliggjarane i regresjonsmodellane.

5.4.2 Modell for total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur

Regresjonsmodellen for total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur kan totalt forklare 30,8% av variasjonen i responsvariabelen. I Tabell 5.3 gir kollonne "B" verdien til koeffisientane i regresjonsmodellen, mens kollonne "Sig." viser signifikanssannsynet til dei ulike forklaringsvariablane. Kollonna "påverknad på R^2_{justert} " gir informasjon om kor mykje dei ulike variablane betyr for den totale forklaringsgrada til regresjonsmodellen, noko som er rekna ut ved hjelp av marginalbetraktning. Dette er gjort ved at ein og ein forklaringsvariabel er utelatt frå regresjonsmodellen, og tala i tabellen viser kor mykje mindre forklaringsgrada til regresjonsmodellen blir ved å utelate den aktuelle forklaringsvariabelen.

Tabell 5.3: Resultat frå regresjonsanalyse av total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur.

Responsvariabel: Total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur			
$R^2 = 0,370$ $R^2_{justert} = 0,308$			
Variabel	B	Sig.	Påverknad på $R^2_{justert}$
Konstantledd	-1169,168	0,072	
Kapasitetsutnytting	0,873	0,076	0,001
Tal på tog	0,217	0,000	0,008
Nedetid ved feil	0,247	0,009	0,003
Faggrupper	-	0,000	0,292
Faggruppe: Signal	1119,627	0,090	
Faggruppe: Overbygning	1032,054	0,145	
Faggruppe: Underbygning	1167,536	0,149	
Faggruppe: Høgspenning	1986,133	0,007	
Faggruppe: Lågspenning	1156,041	0,024	
Faggruppe: Tele	1004,006	0,010	
Faggruppe: Ukjent	0	-	
Baner	-	0,000	0,245
Bane: Sørlandsbanen	132,234	0,823	
Bane: Bergensbanen	-297,888	0,643	
Bane: Dovrebanen	1361,853	0,147	
Bane: Drammensbanen og Askerbanen	332,482	0,544	
Bane: Gardermobanen	-9,143	0,977	
Bane: Gjøvikbanen	8,851	0,987	
Bane: Flåmsbana	-124,016	0,695	
Bane: Solørbanen	-115,391	0,766	
Bane: Meråkerbanen	883,171	0,002	
Bane: Randsfjordbanen	155,671	0,742	
Bane: Bratsbergbanen	2569,120	0,000	
Bane: Ofotbanen	264,422	0,664	
Bane: Arendalsbanen	-54,834	0,870	
Bane: Kongsvingerbanen	1,091	0,998	

Responsvariabel: Total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur			
$R^2 = 0,370$ $R^2_{\text{justert}} = 0,308$			
Variabel	B	Sig.	Påverknad på R^2_{justert}
Bane: Østfoldbanen	172,351	0,750	
Bane: Østfoldbanen, østre linje	168,724	0,795	
Bane: Nordlandsbanen	1096,420	0,129	
Bane: Rørosbanen	128,644	0,802	
Bane: Raumabanen	1125,447	0,080	
Bane: Hovedbanen	-7,803	0,987	
Bane: Vestfoldbanen	0	-	
Tidspunkt	-	0,407	0,183
Tidspunkt: Rushtid	-46,080	0,951	
Tidspunkt: Anna	-34,817	0,933	
Tidspunkt: Natt	0	-	

For dei kategoriske forklaringsvariablane har éin kategori i kvar variabel ein koeffisient med verdi lik null. Dette er den kategorien det er teke utgangspunkt i ved utrekning av verdien til konstantleddet til regresjonsmodellen. Frå Tabell 5.3 ser ein, utifrå verdien til konstantleddet, at regresjonsmodellen tek utgangspunkt i ei forseinking på -1169,168 minutt når tal på tog på strekninga, kapasitetsutnytting og nedetid ved feil er null. For dei kategoriske forklaringsvariablane er denne verdien rekna ut for natt på Vestfoldbanen med feil som høyrer til ukjent faggruppe. Sjølv om det i utgangspunktet høyrer merkkelig ut med negativ forseinking vil dette talet raskt auke og bli positivt når ein legg til andre x-verdiar enn null, eller ser på andre kategoriar, i forklaringsvariablane.

Verdien til koeffisientane i Tabell 5.3 viser at per auke i prosent i kapasitetsutnytting aukar forseinkinga med 0,873 minutt, per auke i tog aukar forseinkinga med 0,217 minutt og per minutt med auke i nedetid aukar forseinkinga med 0,247 minutt. Det at forteiknet til desse forklaringsvariablane er positivt stemmer overeins med forventingane før gjennomføring av analysen. Vidare viser tabellen at alle faggruppene gir ei auke i forseinking på over 1000 minutt samanlikna med forseinkinga ein feil i ukjent faggruppe gir. Forseinkinga er størst dersom feilen høyrer inn under faggruppa høgspenning, og minst for faggruppa tele. For dei

ulike banene varierer det om omfanget av forseinking vil auke eller minke samanlikna med banen det er teke utgangspunkt i for utrekning av konstantleddet til regresjonsmodellen. Bratsbergbanen er den banen som gir mest forseinking, mens Bergensbanen gir minst forseinking. Av dei studerte forklaringsvariablane er det kanskje tidspunkt som gir eit mest uventa resultat når det kjem til verdien til koeffisientane, då desse verdiane viser at omfanget av forseinking ved feil er størst på natta og minst i rushtida.

Forklaringsvariablane tal på tog, nedetid ved feil, faggruppe og bane har p-verdiar på under 0,05 og er difor rekna som signifikante. Kapasitetsutnytting har ein p-verdi på rett over 0,05, mens tidspunkt for feil er tydeleg ikkje signifikant med ein p-verdi på 0,407. For dei kategoriske forklaringsvariablane er det i tillegg til ein felles p-verdi gitt ein p-verdi for kvar enkelt kategori i forklaringsvariabelen. P-verdiane til dei enkelte kategoriane er høgare enn den samla p-verdien til forklaringsvariabelen, men det er stor variasjon i signifikanssannsynet til dei ulike kategoriane i dei kategoriske forklaringsvariablane.

Frå kolumna i Tabell 5.3 som viser påverknaden dei ulike forklaringsvariablane har på forklaringsgrada til regresjonsmodellen ser ein at faggrupper står for den største delen av forklaringa i modellen, etterfølgt av baner og tidspunkt. Kapasitetsutnytting, tal på tog og nedetid ved feil har betydeleg mindre påverknad på forklaringsgrada til modellen.

5.4.3 Modell for gjennomsnittleg forseinking per tog ved feil i jernbaneinfrastruktur

Regresjonsmodellen for gjennomsnittleg forseinking per tog som er forseinka ved feil i jernbaneinfrastruktur kan totalt forklare 23,9% av variasjonen i responsvariabelen. Tabell 5.4 er bygd opp på same måte som Tabell 5.3, og viser dei utrekna koeffisientane til bruk i regresjonsmodellen, i tillegg til signifikanssannsyn og kor stor påverknad dei ulike forklaringsvariablane har på den totale forklaringsgrada til regresjonsmodellen.

Tabell 5.4: Resultat frå regresjonsanalyse av gjennomsnittleg forseinking per tog ved feil i jernbaneinfrastruktur.

Responsvariabel: Gj.snittleg forseinking per tog ved feil i jernbaneinfrastruktur			
$R^2 = 0,307$ $R^2_{justert} = 0,239$			
Variabel	B	Sig.	Påverknad på $R^2_{justert}$
Konstantledd	-100,154	0,099	
Kapasitetsutnytting	-0,138	0,001	0,005
Tal på tog	-0,009	0,032	0,002
Nedetid ved feil	0,009	0,248	0,000
Faggrupper	-	0,000	0,116
Faggruppe: Signal	124,010	0,027	
Faggruppe: Overbygning	154,779	0,010	
Faggruppe: Underbygning	113,862	0,097	
Faggruppe: Høgspenning	234,174	0,000	
Faggruppe: Lågspenning	110,991	0,011	
Faggruppe: Tele	9,531	0,772	
Faggruppe: Ukjent	0	-	
Baner	-	0,000	0,143
Bane: Sørlandsbanen	-89,843	0,073	
Bane: Bergensbanen	176,543	0,001	
Bane: Dovrebanen	125,503	0,115	
Bane: Drammensbanen og Askerbanen	146,700	0,002	
Bane: Gardermobanen	-4,099	0,879	
Bane: Gjøvikbanen	-2,138	0,962	
Bane: Flåmsbana	-7,856	0,770	
Bane: Solørbanen	30,375	0,356	
Bane: Meråkerbanen	87,457	0,000	
Bane: Randsfjordbanen	67,919	0,090	
Bane: Bratsbergbanen	14,185	0,666	
Bane: Ofotbanen	115,093	0,026	
Bane: Arendalsbanen	-9,735	0,732	

Responsvariabel: Gj.snittleg forseinking per tog ved feil i jernbaneinfrastruktur			
$R^2 = 0,307$ $R^2_{justert} = 0,239$			
Variabel	B	Sig.	Påverknad på $R^2_{justert}$
Bane: Kongsvingerbanen	9,135	0,806	
Bane: Østfoldbanen	113,918	0,013	
Bane: Østfoldbanen, østre linje	104,075	0,059	
Bane: Nordlandsbanen	121,707	0,047	
Bane: Rørosbanen	101,257	0,020	
Bane: Raumabanen	119,539	0,028	
Bane: Hovedbanen	106,364	0,010	
Bane: Vestfoldbanen	0	-	
Tidspunkt	-	0,015	0,083
Tidspunkt: Rushtid	9,195	0,886	
Tidspunkt: Anna	3,078	0,931	
Tidspunkt: Natt	0	-	

Tabell 5.4 viser at regresjonsmodellen tek utgangspunkt i ei forseinking på -100,154 minutt når ein går utifrå at tal på tog på strekninga, kapasitetsutnytting og nedetid ved feil er null. For dei kategoriske forklaringsvariablane er denne verdien rekna ut for natt på Vestfoldbanen med feil som høyrer til ukjent faggruppe. På same måte som modellen for total forseinking i delkapittel 5.5.2 vil den negative verdien for forseinking raskt auke og bli positivt når ein legg til andre x-verdiar enn null, eller ser på andre kategoriar, i forklaringsvariablane.

I motsetning til forventningane før gjennomføring av analysen viser Tabell 5.4 at koeffisientane til både kapasitetsutnytting og tal på tog har negative forteikn. Koeffisientane viser at per auke i prosent med kapasitetsutnytting blir forseinkinga redusert med 0,138 minutt, og per auke i tog blir forseinkinga redusert med 0,009 minutt. Koeffisienten til nedetid ved feil har, i tråd med forventningane før gjennomføring av analysen, positivt forteikn. Verdien til denne koeffisienten fortel at per auke i minutt med nedetid vil forseinkinga auke med 0,009 minutt. Forseinkingstida vil også auke dersom feilen høyrer til under ei anna faggruppe enn ”ukjent”, som det er teke utgangspunkt i for utrekning av konstantleddet.

Høgspenning er den faggruppa som gir mest auke i forseinkingstid, mens tele gir minst auke i forseinkingstid.

Frå Tabell 5.4 ser ein at nokre baner har negativt forteikn på koeffisienten, mens andre har positivt forteikn. Banene med negativt forteikn opplever mindre gjennomsnittleg forseinking ved feil enn banen det er teke utgangspunkt i ved utrekning av konstantleddet, mens banene med positivt forteikn opplever meir forseinking ved feil enn denne banen. Koeffisientane viser at Bergensbanen er den av banene som opplever størst forseinking ved feil, mens Sørlandsbanen har minst forseinking ved feil. Tabellen viser også at natta er den tida på døgnet som gir minst forseinking, mens rushtid er den tida på døgnet som gir mest forseinking. Dette stemmer overeins med forventningane til resultatet før gjennomføring av analysen.

Signifikanssannsynet til dei ulike forklaringsvariablane er varierende. Tabell 5.4 viser at alle forklaringsvariablane bortsett frå nedetid har p-verdiar under 0,05, og er såleis rekna som signifikante. Nedetid er ikkje ein signifikant forklaringsvariabel, då den har ein p-verdi på 0,248. For dei kategoriske forklaringsvariablane er det stor variasjon i signifikanssannsynet til dei ulike kategoriane.

Frå kolumna i Tabell 5.4 som viser påverknad på justert R^2 ser ein at baner har størst påverknad på den totale forklaringsgrada til regresjonsmodellen, etterfølgt av faggrupper og tidspunkt for feil. Kapasitetsutnytting og tal på tog har betydeleg lågare påverknad på forklaringsgrada til regresjonsmodellen, og nedetid ved feil har ingen påverknad på forklaringsgrada til modellen.

5.5 Bruk av funn

5.5.1 Analysar av nedetid ved feil

Dei statistiske analysane av nedetid ved feil er tenkt som eit supplement til ekspertvurderingar av verdiar for MDT i RAM-analysar. På denne måten kan ekspertane støtte seg på kva som verkar som fornuftige estimat for verdiar for MDT utifrå tidlegare erfaringsdata. Den nedre delen av x-aksen til histogramma som er laga kan til dømes gi ein peikepinn på kor lang nedetid ein kan forvente for feilmodar som er rekna som raske å reparere, mens den øvre delen av x-aksen i histogramma kan gi ein peikepinn på kor lang nedetid ein kan forvente for

feilmodar som tek lenger tid å reparere. Ved vurdering av tidsomfang for nedetid for ein feilmode må det også takast med i betraktning kor langt det er frå der feilen har oppstått til stasjoneringsstad for vedlikehaldspersonell.

5.5.2 Regresjonsanalysar

Tenkt bruk av resultatet frå regresjonsanalysane er synleggjort ved hjelp av Formel 5.1. Denne formelen kan nyttast til å estimere kor mykje forseinking i togtrafikken ein feil i jernbaneinfrastrukturen fører til dersom ein har informasjon om kapasitetsutnytting, tal på tog, nedetid ved feil, kva bane feilen skjer på, faggruppe objektet som feilar høyrer til og tidspunkt for feil.

$$F = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + F_{\text{tillegg,bane}} + F_{\text{tillegg,fag}} + F_{\text{tillegg,tid}} \quad (5.1)$$

der	F	er forseinking i minutt ved feil i jernbaneinfrastrukturen,
	$\hat{\alpha}$	er forseinking dersom alle forklaringsvariablane er null,
	x_1	er kapasitetsutnytting i prosent,
	x_2	er tal på tog,
	x_3	er nedetid ved feil i minutt,
	$F_{\text{tillegg,bane}}$	er tilleggsforseinking i minutt basert på kva bane feilen oppstår på,
	$F_{\text{tillegg,fag}}$	er tilleggsforseinking i minutt basert på kva faggruppe objektet som feilar høyrer til og
	$F_{\text{tillegg,tid}}$	er tilleggsforseinking i minutt basert på tidspunkt feilen oppstår på.

Verdiane til koeffisientane er funne i delkapittel 5.4.2 for regresjonsmodellen for total forseinking ved feil, og i delkapittel 5.4.3 for regresjonsmodellen for gjennomsnittleg forseinking per tog som er forseinka. I Formel 5.2 er verdiar frå regresjonsmodellen for total forseinking sett inn i Formel 5.1, og i Formel 5.3 er det same gjort med verdiar frå regresjonsmodellen for gjennomsnittleg forseinking per tog. Det er ikkje sett inn nokon verdi for dei kategoriske forklaringsvariablane, då koeffisienten her er avhengig av kva bane ein ser på, kva faggruppe objektet som har feila høyrer inn under og når på døgnet feilen skjer. Desse verdiane finn ein i Tabell 5.3 for regresjonsmodellen for total forseinking og i Tabell 5.4 for regresjonsmodellen for gjennomsnittleg forseinking per tog. I begge tabellane står koeffisientane i kolumna "B".

$$F_{tot} = -1169,168 + 0,873 x_1 + 0,217 x_2 + 0,247 x_3 + F_{tillegg,bane} + F_{tillegg,fag} + F_{tillegg,tid} \quad (5.2)$$

$$F_{gj.snitt} = -100,154 - 0,138 x_1 - 0,009 x_2 + 0,009 x_3 + F_{tillegg,bane} + F_{tillegg,fag} + F_{tillegg,tid} \quad (5.3)$$

I ei RAM-analyse vil bruk av Formel 5.2 kunne bidra med nødvendig informasjon for å verifisere om akseptkriterium for forseinkingstimar blir nådd. Bruk av denne formelen gir eit estimat for total forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur. Basert på denne informasjonen, og informasjon om feil per år, kan ein rekne seg fram til total forseinking per år for den aktuelle infrastrukturen. Formlane som nyttast til dette er presentert i delkapittel 2.4.5, Tabell 2.1. For å rekne ut feil per år trengst det informasjon om MTTF. Dette kan hentast ut ifrå Jernbaneverket (2016), som inneheld statistikk på feilratar for ulike objekttypar, og er nytta til utrekning av verdiar for MTTF i fleire av dei studerte RAM-analysane i kapittel 3. Etter å ha rekna ut årleg forseinking for kvar av dei lista feilmodane i ei RAM-analyse, må desse bidraga summerast for å finne den totale forseinkinga for den analyserte jernbaneinfrastrukturen.

Regresjonsmodellane kan også nyttast til å evaluere kor mykje effekt det vil ha på forseinking i togtrafikken dersom ein set inn meir ressursar på vedlikehald for å til dømes redusere uttrykkingstida ved feil, slik at nedetida ved feil blir mindre. I tillegg kan modellane nyttast til å sjå på endring i forseinking på ei strekning, ved å endre på kor mange tog som køyrer der og kor stor kapasitetsutnytting det er på strekninga.

Døme på praktisk bruk av regresjonsmodell

Ei tenkt strekning som høyrer til Gardermobanen har ei kapasitetsutnytting (x_1) på 60%, og 300 tog (x_2) køyrer på strekninga i døgnet. Det er ønskeleg å analysere kor mykje forseinking som oppstår ved feil på strekninga, dersom det skjer ein feil i faggruppa signal i rushtida. Feilen fører til ei nedetid (x_3) på 60 minutt for objektet som feilar. Formel 5.2 og koeffisientane til forklaringsvariablane i Tabell 5.3 er nytta til å rekne ut følgjande totale forseinking som feilen fører til:

Kapittel 5. Statistiske analysar

$$F_{tot} = -1169,168 + 0,873 x_1 + 0,217 x_2 + 0,247 x_3 + F_{tillegg,bane} + F_{tillegg,fag} + F_{tillegg,tid}$$

$$F_{tot} = -1169,168 + (0,873 * 60) + (0,217 * 300) + (0,247 * 60) - 9,143 + 1119,627 - 46,080$$

$$F_{tot} = 27,536 \text{ min} = 0,46 \text{ t}$$

MTTF til den aktuelle feilmoden er 300 000 timar. Ved hjelp av formel i Tabell 2.1 er feil per år rekna ut som følgjer:

$$n_{f\ddot{a}} = \frac{365 * 24}{MTTF + MDT} = \frac{365 * 24}{300\,000 + 1} = 0,029 \text{ feil/\u00e5r}$$

Vidare er den totale \u00e5rlege forseinkinga for den aktuelle feilmoden rekna ut som følgjer, ved hjelp av formel fr\u00e5 Tabell 2.1:

$$F_{tot\ddot{a}} = n_{f\ddot{a}} * F_{tot}$$

$$F_{tot\ddot{a}} = 0,029 * 0,46 = \underline{0,01 \text{ forseinkingstimar per \u00e5r}}$$

5.6 Oppsummering og diskusjon

5.6.1 Resultat

Resultatet fr\u00e5 analysane som er gjort av lengde p\u00e5 nedetid ved feil viser at det for alle dei studerte objekttypane er stor spreiring fr\u00e5 kortaste til lengste registrerte nedetid. Medverkande \u00e5rsak til dette kan vere at ein objekttype kan ha ulike feilmodar, og tidsomfanget av feilretting kan difor vere varierende. Den logistiske forseinkinga spelar ogs\u00e5 inn p\u00e5 lengde p\u00e5 nedetid. I tillegg er det tenkeleg at datamaterialet som er nytta i analysane kan innehalde feilregistreringar, som gir eit urett bilde av lengde p\u00e5 nedetid ved feil. Til trass for stor spreiring i lengde p\u00e5 nedetid for dei ulike objekttypane gir likevel analysane ein peikepinn p\u00e5 kor lang nedetid ein kan forvente ved feil, og kva som kan reknast som ”vanleg” nedetid ved feil for dei ulike objekttypane.

Dei to regresjonsmodellane det er kome fram til kan forklare ein liten del av variasjonen i forseinking som oppst\u00e5r ved feil i jernbaneinfrastruktur, men framleis er det mykje av variasjonen som ikkje kan forklarast av modellane. Det at regresjonsmodellane har ei s\u00e5pass

låg forklaringsgrad som dei har, kan skyldast ulike grunnar. Forklaringsvariablar som ikkje er inkludert i regresjonsmodellane kan vere ansvarlege for mykje av forseinkinga som oppstår ved feil i infrastrukturen, og i tillegg kan det vere at datamaterialet som er nytta ikkje er godt nok for analysane. Dette er det gått nærmare inn på i delkapittel 5.6.2 og 5.6.3.

Ikkje alle forklaringsvariablane som er nytta i regresjonsmodellane er signifikante. Dette kan skyldast at det ikkje er ein samanheng mellom responsvariabelen og dei aktuelle forklaringsvariablane, men forklaringa kan også vere at det er ein samanheng mellom variablane, men at det nytta datamaterialet ikkje er godt nok til å påvise denne samanhengen (Skog, 1998). Fleire av forklaringsvariablane i regresjonsmodellane, der koeffisienten har ein annan verdi enn forventa, har høge p-verdiar. I desse tilfella vil det vere spesielt interessant å samle inn erfaringsdata frå ei lenger periode enn det som er gjort i denne omgang, for å sjå om dette kan føre til signifikante forklaringsvariablar og koeffisientar med verdiar som stemmer overeins med forventningane.

Resultatet frå regresjonsanalysane viser at det både er forskjellar og likheitstrekk i dei to regresjonsmodellane det er kome fram til. Verdiane til koeffisientane er naturlegvis lågare i modellen for gjennomsnittleg forseinking enn i modellen for total forseinking. Vidare ser ein at dei to modellane er ulike på kva forklaringsvariablar som har koeffisientar med verdiar som svarar til forventningane før gjennomføring av analysane, og kva forklaringsvariablar som ikkje har dette. Dette gjeld både for forteiknet til dei ulike koeffisientane, og kva grupper i dei kategoriske forklaringsvariablane som gir mest og minst forseinking. Det er vanskeleg å seie kvifor verdiane til dei ulike koeffisientane blir som dei blir i dei to regresjonsmodellane, men ei tenkeleg forklaring på forskjellane som oppstår kan til dømes vere at mange tog opplever forseinking på ei strekning, men at kvar forseinking er relativ kort. På denne måten kan den totale forseinkinga bli høg, mens den gjennomsnittlege forseinkinga blir låg.

Når det kjem til korleis dei ulike faggruppene spelar inn på forseinking ser ein nokre tydelege fellestrekk i dei to regresjonsmodellane. Høgspenning skil seg ut som den faggruppa som gir mest forseinking, noko som verkar fornuftig då høgspenning er nødvendig for togframføring av elektrifiserte lokomotiv, og ved feil i denne faggruppa blir det truleg stopp i togtrafikken. På same måte skil tele seg ut som den faggruppa som gir tydeleg minst forseinking ved feil i begge modellane, og feil i denne faggruppa fører truleg oftast til saktekøyning. For dei ulike

banene er det spesielt interessant at i regresjonsmodellen for total forseinking er Bratsbergbanen den banen som gir mest forseinking, mens i regresjonsmodellen for gjennomsnittleg forseinking gir Bratsbergbanen minst forseinking av banene.

5.6.2 Val av forklaringsvariablar

Forklaringsvariablane som er nytta i regresjonsmodellane er plukka ut basert på litteratur på området, sunn fornuft og kva som har vore muleg å få tak i av informasjon på ein grei måte. Tidlegare i kapitlet er det nemnt at andre forklaringsvariablar enn dei som er nytta i regresjonsmodellane kan vere ansvarlege for ein stor del av variasjonen i responsvariablane. Det er difor tenkeleg at ein ved å inkludere fleire eller andre forklaringsvariablar enn dei som er nytta i modellane no, kunne oppnådd ei høgare forklaringsgrad. Samtidig bør det ikkje vere veldig vanskeleg å hente inn informasjon om forklaringsvariablane dersom ein regresjonsmodell skal opplevast som eit nyttig verktøy, i staden for tidkrevjande ekstraarbeid ved gjennomføring av RAM-analysar.

Mens RAM-analysemetodikken til Bane NOR legg seg på feilmodenivå for å seie noko om forseinking, legg regresjonsmodellane seg på eit meir overordna nivå ved å sjå på faggruppe som feilar. Kvar faggruppe omfattar fleire ulike objekttypar og enno fleire feilmodar. Dersom feilmode skulle vore nytta som forklaringsvariabel i regresjonsmodellane, i staden for faggruppe, ville dette blitt meir tidkrevjande, i tillegg til at datamaterialet for kvar kategori ville blitt lite. Slik registreringane blir gjort i TIOS og BaneData i dag ville det også blitt utfordrande å hente ut informasjon om feilmode, og objekttype ville i så fall vere eit betre alternativ. Det vil alternativt vere ei mulegheit å dele inn faggruppene i mindre underkategoriar, noko som kanskje er spesielt interessant for signal, som omfattar svært mange ulike typar feilmodar.

Ved bygging av ny infrastruktur kan det vere at det som skal byggast ikkje naturleg høyrer inn under nokon av dei eksisterande banene. For slike tilfelle ville det kanskje vore meir interessant å dele inn i banetypar som til dømes lokaltogbane eller regiontogbane i regresjonsmodellane. Ei slik inndeling av baner vil derimot føre til at banespesifikke faktorar, som kjem av til dømes geografisk plassering, blir utelatt frå modellane.

I RAM-analysemetodikken til Bane NOR blir det skilt på om konsekvens av feil er saktekøyning, alternativ køyreveg eller full stopp i togtrafikken. Det er tenkeleg at omfanget

av forseinking vil vere større for feil som fører til full stopp enn feil som fører til alternativ køyreveg eller saktekøyning. Dette er difor ein forklaringsvariabel som verkar fornuftig å inkludere i regresjonsmodellane, men det har ikkje vore gjort i denne omgang, då dette er informasjon som ikkje har vore tilgjengeleg for det analyserte datamaterialet.

Ein annan faktor som kan vere interessant å vurdere som forklaringsvariabel i regresjonsmodellane er om det er dobbelt- eller enkeltspor på strekninga der det er registrert feil. Dette kan ha betydning for kor enkelt det er med til dømes omkøyningar, men er ikkje gjort i denne omgang, då det krev ein del manuelt arbeid med å kartlegge kva type spor som er der dei ulike feila har oppstått.

Togtype er også ein forklaringsvariabel som truleg kunne vore interessant å inkludere i regresjonsmodellane. På grunn av måten forseinking er sett på i analysane har dette derimot ikkje vore muleg. Dette er fordi at den same nedetida gjerne kan føre til forseinking for ulike togtypar, og i analysane er denne forseinkinga slått saman, slik at det ikkje er skilt på kva type tog forseinkingane oppstår for.

I regresjonsmodellane er det sett på tidspunkt på dagen for når ein feil har skjedd. Då det gjerne er forskjell på togtrafikken i helg og på kvardagar kan det også vere interessant å studere tidspunkt for feil med omsyn til kva vekedag feilen skjer på. Dette er det muleg å hente ut informasjon om i BaneData, då dei ulike feila er registrert med dato. Vekedag er likevel ikkje inkludert som forklaringsvariabel i regresjonsmodellane i denne omgang, på grunn av avgrensa tid til gjennomføring av analysane.

5.6.3 Tilgjengeleg datamateriale

Ved hjelp av datamaterialet som har vore tilgjengeleg for gjennomføring av dei statistiske analysane har det vore muleg å sjå på trendar og samanhengar knytt til både forseinking og nedetid ved feil i jernbaneinfrastruktur. Likevel er datamaterialet mangelfult på enkelte områder, og det er grunn til å tru at bruk av eit større datamateriale vil kunne bidra til å styrke resultatet frå analysane. For best muleg kvalitet på datamaterialet bør eventuelt meir datamateriale omfatte nyare registreringar enn dei som er nytta i analysane foreløpig.

Mangelfult datamateriale kjem spesielt tydeleg fram på den store prosentdelen av

infrastrukturrelaterte forseinkingar som ikkje er knytt til eit objekt med nedetid. Utifrå det studerte datamaterialet er det vanskeleg å vite om det er tilfeldig kva forseinkingar som er knytt til ei nedetid og kva forseinkingar som ikkje er det, eller om det er ein systematikk i desse ikkje-registreringane. Systematiske ikkje-registreringar er spesielt uheldig for resultatata frå regresjonsanalysane, då ein går glipp av viktig informasjon. Er det derimot tilfeldig kva forseinkingar og nedetider som ikkje blir samankopla, vil det truleg ikkje ha fult så stor betyding for resultatet av regresjonsmodellane, då ein likevel har eit relativt stort talgrunnlag å bruke i analysane.

Delar av det innsamla datamaterialet er basert på manuelle registreringar, og det er grunn til å tru at dette kan føre til at noko informasjon ikkje blir registrert slik den i utgangspunktet er tenkt. Eit døme på dette, teke ifrå datamaterialet, er ein feil som har blitt registrert med ei feilrettingstid på 240 minutt, mens varigheita til feilen er oppgitt til å vere 4,02 minutt. Sidan 4 timar tilsvarar 240 minutt er det tenkeleg at varigheita til feilen, i dette tilfellet, kan vere tasta inn i timar i staden for minutt slik det er tenkt. Ein finn også fleire tilfelle i datamaterialet der feilen si varigheit er kortare enn tida feilrettinga tek, noko som verkar unaturleg, då feilen truleg varer til feilrettinga er ferdig. Til trass for dette er tidene som er registrert på dei ulike hendingane nytta i analysane, då det er vanskeleg å seie med sikkerheit kva tider som er feilregistreringar og kva tider som ikkje er det.

5.6.4 Metode og modellar

Metoden og modellane som er valt for gjennomføring av dei statistiske analysane er vurdert som hensiktsmessige for formålet, då dei viser mulege framgangsmetodar for estimering av sentrale innputtverdiar til RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur. Metodane gir eit grunnlag for likare vurdering av nedetider og forseinking ved feil i infrastrukturen, på tvers av prosjekt og analysegruppesamansetning, enn det dagens RAM-analysemetodikk gjer. I tillegg gjer bruk av regresjonsmodellane for estimering av forseinking at ein ikkje treng å gi innputt om forseinking per tog før feilretting, normaliseringsperiode etter feilretting og forseinking per tog ved normalisering til RAM-analysar, slik det er lagt opp til i analysemetodikken til Bane NOR. Dette gjer at bruken av ekspertvurderingar kan reduserast ved gjennomføring av RAM-analysar.

Regresjonsmodellane i oppgåva tilfredsstillar ikkje alle føresetnader for multippel lineær regresjon, og kanskje ville det vore meir fornuftig å godta lågare forklaringsgrad til fordel for

føresetnadane i regresjonsmodellane. Det er likevel tenkeleg at vidare arbeid med modellane må til før dei eventuelt kan nyttast ved gjennomføring av RAM-analysar, og ei slik vurdering må då gjerast på nytt. Ved nærmare gjennomgang av det analyserte datamaterialet kan det kanskje vere muleg å opparbeide større forståing for om registreringar som er rekna som uteliggjarar er feilregistreringar eller ikkje. Ved å ta bort eventuelle feilregistreringar frå datamaterialet er det tenkeleg at forklaringsgrada til regresjonsmodellane kan bli betre, og kanskje vil det også gjere det enklare å tilfredstille dei andre føresetnadane for multippel lineær regresjon.

Fleire av dei registrerte forseinkingane i datamaterialet som er nytta for regresjonsanalysane er knytt til den same nedetida, då det blir registrert forseinking for kvar stasjon eit tog er innom. I regresjonsanalysane er berre den høgaste av dei registrerte forseinkingane per hending for eit tognummer nytta, då det er tenkt at dette ofte representerer forseinking ved endestasjon. Likevel er det ikkje vissheit i at det er endestasjonen som alltid har den høgaste forseinkinga, då toga kan ha tatt inn forseinking før endestasjon. Dette fører til ei viss usikkerheit i resultatet frå regresjonsmodellane, men samtidig gir det å ta utgangspunkt i den høgaste registrerte forseinkinga eit konservativt mål på forseinking.

Verdiane som er brukt for kapasitetsutnytting og tal på tog i regresjonsmodellane er hovudsakleg basert på kategoriske gjennomsnittsverdiar, med enkelte unntak rundt dei store byane. Ved å hente inn og bruke faktiske verdiar for alle dei analyserte strekningane, i staden for desse kategoriske gjennomsnittsverdiane, er det tenkeleg at dette kan bidra til å auke kvaliteten på regresjonsmodellane.

Ein styrke med regresjonsmodellane er at dei tek høgde for både primærforseinking og følgjeforseinking, noko som er utfordrande å rekne på med enkle matematiske formlar. Vidare er det ein styrke med regresjonsmodellane at når dei fyrst er laga, så er dei enkle å bruke så lenge ein har nødvendig informasjon om dei ulike forklaringsvariablane. Samtidig vil det vere interessant å oppdatere regresjonsmodellane etterkvart som det kjem ny og kanskje betre erfaringsdata, og dette kan vere eit tidkrevjande arbeid som er avhengig av nokon med ei viss innsikt i statistikk for å bli gjennomført. Ei anna utfordring med bruk av regresjonsmodellane, og erfaringsdata generelt, er at ved nybygging av jernbaneinfrastruktur kan det vere nye faktorar som spelar inn som ikkje kjem fram i tidlegare erfaringsdata.

For at analysane som er gjort av nedetid ved feil skal vere meir tilpassa RAM-analysemetodikken til Bane NOR kan det vere interessant å sjå på nedetid for ulike feilmodar, i staden for objekttype. Dette er i så fall avhengig av at ein har tilstrekkeleg med data. RAM-analysemetodikken til Bane NOR skil også mellom nedetid på grunn av reparasjonstid og nedetid på grunn av logistisk forseinking. Det vil truleg difor vere ein fordel om statistiske modellar for nedetid ved feil, som skal fungere som gode hjelpemiddel ved gjennomføring av RAM-analysar, også skil på om nedetida er forårsaka av reparasjonstid eller logistisk forseinking.

Kaplan-Meier plottet, som inngår i dei statistiske analysane for lengde på nedetid ved feil, gir eit innblikk i sannsynet for at dei analyserte objekttypene ikkje er reparert etter ei viss nedetid. Ved å tilpasse sannsynsfordelingar til dei ulike kurvene i Kaplan-Meier plottet, kunne dette truleg bidrege til å gi eit betre bilde av fordelinga til reparasjonstida til dei ulike objekttypene, enn det Kaplan-Meier plottet i seg sjølv gir. Dette krev i så fall bruk av anna programvare enn SPSS, som Kaplan-Meier plottet er laga i, og på grunn av tidsavgrensing for gjennomføring av analysane har det ikkje blitt prioritert i denne omgang.

I både regresjonsanalysane og analysane for nedetid ved feil er det gjort avgrensingar for kva verdiar frå datamaterialet som er teke med. Desse avgrensingane har verka fornuftige under arbeidet med analysane, både fordi det har hjulpet til med å avgrense omfanget av analysane, og fordi det har gjort det muleg å fokusere mest muleg på det som er vurdert som realistiske verdiar å nytte i RAM-analysar. Likevel er ikkje dei nytta verdiane nokon fasit på kvar grensa for kva verdiar som blir inkludert i analysane burde gå, og val av andre verdiar for avgrensing i modellane, eller eventuelt å analysere alle registrerte verdiar, kan difor tenkast å vere like fornuftig som det som er gjort i dei gjennomførte analysane.

Ein stor del av arbeidet med å gjere klart datamaterialet til bruk i dei statistiske analysane er gjort manuelt. Dette har vore tidkrevjande og det er tenkeleg at arbeidet kunne vore forenkla med bruk av til dømes enkel programmering. Analysearbeidet er nøye gjennomført, men med så mange tusen datapunkt er det svært tidkrevjande å kvalitetssikre arbeidet som er gjort for kvar enkelt talverdi. Det kan difor ha skjedd enkelte uheldige endringar i det opphavlege datamaterialet i løpet av analyseprosessen, men det er ikkje grunn til å tru at dette i stor grad pregar resultatet frå analysane.

6 Konklusjon

Masteroppgåva ser på mulege forbetringar for RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Dette er gjort ved å svare på tre mindre delmål for oppgåva som er fastslått i delkapittel 1.2.

Det fyrste delmålet er å få oversikt over gjeldande krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg. Dette er gjort ved å studere styringsdokumenta til Bane NOR som omhandlar krav og retningslinjer for RAM-analysar, samt dokument som desse styringsdokumenta baserar seg på. Krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar er gitt i Jernbaneinfrastrukturforskriften § 3-1, prosesstandard EN 50126 (1999) og RAMS-handboka til Bane NOR. Gjeldande krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar for jernbaneinfrastruktur i Noreg er presentert i kapittel 2.

Det andre delmålet er å hente inn erfaringar om korleis tidlegare RAM-analysar for Bane NOR er gjennomført, og kvar utfordringane ved gjennomføring av analysane ligg. Erfaringsinnhenting er gjort gjennom dokumentstudie av RAM-analyserapportar frå femten tidlegare gjennomførte RAM-analysar. I gjennomgangen av analyserapportane er det nytta ein guide som er utvikla for formålet. Denne guiden er nytta for å sikre systematikk i dokumentstudien. I tillegg bidreg bruk av guiden til å sikre at analyserapportane blir vurdert opp imot gjeldande krav og retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar. Funna frå dokumentstudien er presentert i kapittel 3, og viser at praksis for gjennomføring av RAM-analysar er varierende. Til saman utgjer funna frå dei ulike analyserapportane eit grunnlag for å kome med forslag til forbetringar til RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Forbetringforslaga som er gitt i oppgåva omfattar større grad av standardisering, innføring av akseptkriterium for regularitet, nærmare vurdering av metode for fastsetting av akseptkriterium, bruk av statistikk og erfaringsdata i større omfang enn i dag samt retningslinjer for handtering av usikkerheit. Implementering av forbetringforslaga vil kunne gjere bruk av RAM-analysemetodikken til Bane NOR enklare, skape eit likare grunnlag for gjennomføring av analysane på tvers av prosjekt og analysegruppesamansetting samt betre kvaliteten på resultatet frå analysane.

Kompleksiteten i jernbaneinfrastruktur gjer bruk av ekspertvurderingar og enkle matematiske formlar for estimering av talverdiar til RAM-analysar utfordrande. Det tredje delmålet i

Kapittel 6. Konklusjon

masteroppgåva er difor å få innblikk i om, og i så fall korleis, meir omfattande bruk av statistiske metodar kan nyttast til å støtte kvantifisering i RAM-analysar. Dette er hovudsakleg gjort ved hjelp av multiple regresjonsanalysar for estimering av forseinking ved feil i jernbaneinfrastruktur. I tillegg er det gjennomført analysar av sannsyn og fordeling av nedetid ved feil for nokre utvalte objekttypar. Resultatet frå desse analysane er presentert i kapittel 5. Felles for dei gjennomførte statistiske analysane er at dei viser mulege framgangsmetodar for estimering av sentrale verdiar til bruk i RAM-analysar. Likevel er vidare arbeid nødvendig for at dei statistiske analysane skal kunne fungere som god støtte ved kvantifisering i RAM-analysar.

Analysane for nedetid ved feil er gjennomført på eit enkelt nivå. For at desse analysane skal ha ein større nytteverdi ved gjennomføring av RAM-analysar, vil det vere nødvendig med analysing av eit større datamateriale og få informasjon om fleire objekttypar, eller eventuelt feilmodar. Frå regresjonsanalysane er det kome fram til to regresjonsmodellar som kan nyttast til å estimere total forseinking og gjennomsnittleg forseinking per forseinka tog ved feil i jernbaneinfrastruktur. Modellane tek høgde for følgjeforseinking og kan redusere bruken av ekspertvurderingar i RAM-analysar. Føresetnaden for å kunne bruke desse regresjonsmodellane er at ein må ha informasjon om nedetid ved feil, tal på tog som køyrer på strekninga, kapasitetsutnytting på strekninga, tidspunkt for feil, faggruppe objektet som har feila høyrer inn under og kva bane strekninga som analyserast høyrer til. Forklaringsgrada til regresjonsmodellane er derimot relativ låg og fleire av føresetnadane for multiple lineære regresjonsanalysar er ikkje tilfredsstilt.

I arbeidet med dei statistiske analysane kjem det fram at Bane NOR har store forbettringspotensiale når det kjem til registrering av data, og derunder også samankopling av forseinkingar på grunn av infrastrukturfeil og kva objekt som har ført til denne forseinkinga. Dette er truleg med på å redusere kvaliteten på dei gjennomførte analysane, og fokus på forbetringar av datamaterialet vil vere nødvendig for å kunne gjennomføre gode statistiske analysar i framtida.

6.1 Vidare arbeid

Masteroppgåva gir fleire forslag til forbetringar for RAM-analysemetodikken til Bane NOR. For å kunne ta i bruk desse forbettringsforslaga ved gjennomføring av RAM-analysar er vidare arbeid nødvendig. Forslag til vidare arbeid innanfor temaet er:

- Gå i djupna på dei ulike forslaga til forbetringar for RAM-analysemetodikken til Bane NOR. Vurdere om, og i så fall korleis, desse forbettringsforslaga kan implementerast i analysemetodikken på ein fornuftig måte.
- Grundig gjennomgang av kva som finns av informasjon i BaneData og TIOS som kan brukast i RAM-analysar. Undersøke om det kan gjerast endringar i kva og korleis ting blir registrert, for å enklare kunne drage nytte av erfaringsdata i RAM-analysar.
- Etterkvart som nyare erfaringsdata blir registrert i systema til Bane NOR er det interessant å inkludere dette i statistiske analysar. Dette gjeld både for analysane for nedetid ved feil og for regresjonsmodellane, for å sjå om meir og nyare erfaringsdata kan betre kvaliteten på dei statistiske modellane.
- Gjennomføre meir omfattande analysar av nedetid ved feil. Til dømes kan det gjennomførast regresjonsanalysar, der blant anna plassering til objektet som feilar blir brukt som forklaringsvariabel. På denne måten kan variasjonen som kjem i lengde på nedetid på grunn av MLD bli tydelegare.
- Inkludering av fleire eller andre forklaringsvariablar i regresjonsmodellane. I oppgåva er fleire mulege forklaringsvariablar som ikkje er nytta i regresjonsmodellane nemnt, og det er tenkeleg at vidare arbeid kan omfatte å inkludere nokre av desse forklaringsvariablane i regresjonsmodellane.
- Sjå på muleg samankopling av regresjonsmodell og matematiske formlar for estimering av forseinking, der ein kan drage nytte av fordelane begge metodane gir. Det er tenkeleg at dette kan omfatte ein metode der forseinking først blir rekna ut med matematiske formlar som tek høgde for om konsekvensen av feil er saktekøyring, bruk

Kapittel 6. Konklusjon

av alternativ køyreveg eller stopp. Vidare kan det leggest til koeffisientar frå ein regresjonsmodell som tek høgde for tilleggsforseinking forårsaka av andre variasjonar.

Vedlegg A: Forkortingar

Dei fleste forkortingane som er nytta i rapporten har opphav frå engelske ord. Under er forkortingane i rapporten lista med den norske tydinga først, og deretter den engelske tydinga i dei tilfelle der dette er relevant.

Forkorting	Norsk	Engelsk
FMEA	Feilmode- og effektanalyse	Failure mode and effect analysis
MDT	Gjennomsnittleg nedetid	Mean down time
MLD	Gjennomsnittleg logistisk forseinking	Mean logistic delay
MRT	Gjennomsnittleg reparasjonstid	Mean repair time
MTTF	Gjennomsnittleg tid til feil	Mean time to failure
MTTR	Gjennomsnittleg tid til reparert	Mean time to repair
RAMS	Pålitelegheit, tilgjengelegheit, vedlikehaldbarheit og sikkerheit	Reliability, availability, maintainability and safety
RCM	Pålitelegheitsbasert vedlikehald	Reliability centered maintenance
SPSS	Statistisk pakke for samfunnsvitskap	Statistical package for the social sciences
STM	Særskilt overføringseining	Specific transmission module
TIOS	Trafikkinformasjons- og oppfølgingsystem	
UPB	Utreie, planlegge og bygge	

Vedlegg B: Guide for gjennomføring av dokumentstudie

Denne guiden er utvikla for å vere eit hjelpemiddel ved gjennomføring av dokumentstudie av RAM-analyserapportar for Bane NOR. Guiden inneheld ei rekke spørsmål som skal svarast på, og spørsmåla er avhengige av om RAM-analysen som blir studert er kvantitativ eller kvalitativ.

For kvantitative RAM-analysar tek guiden utgangspunkt i Bane NOR si vegleiing for gjennomføring av RAM-analysar, Bane NOR (2017). Spørsmåla i guiden omfattar trinna som Bane NOR (2017) legg opp til at skal gjennomførast i ein RAM-analyseprosess, og gjer det såleis muleg å samanlikne dei studerte analysane med gjeldande retningslinjer for gjennomføring av RAM-analysar i Bane NOR. I tillegg omfattar guiden eit spørsmål om framgangsmetode for innsamling av nødvendig innputtdata til RAM-analysen. Til slutt er det mulegheit for å kome med generelle kommentarar til analysen som blir studert. Då vil det vere naturleg å nemne ting som er vurdert som viktige å trekke fram frå analysen, men som ikkje passar inn i dei andre spørsmåla i guiden.

Ved studie av analyserapportar frå kvalitative RAM-analysar er det interessant å samle informasjon om kvifor analysane er gjort kvalitativt i staden for kvantitativt. I tillegg er det interessant å sjå kva informasjon dei kvalitative analysane gir, slik at dette kan samanliknast med informasjonen dei kvantitative analysane gir.

Studie av kvantitative RAM-analysar:

1. Er nødvendig omfang av analysen vurdert i tråd med gjeldande retningslinjer?
2. Er nødvendig informasjon om overordna konsept og trafikale krav innhenta?

Trafikale krav omfattar her:

- Ein framtidig ruteplan/rutemodell som definerer:
 - Frekvens av ulike typar tog i løpet av eit døgnet
 - Trafikktype
 - Driftstid for dei ulike togtypane og tider mellom toggang som normalt vil kunne brukast til førebyggjande og korrigerande vedlikehald
 - Forventa tal på årlege togtimar på strekninga
- Storleik på toga som skal køyre på strekninga

Vedlegg B. Guide for gjennomføring av dokumentstudie

- Aksellastar
 - Fart på strekninga
3. Er overordna modell for førebyggjande vedlikehald etablert og validert? (kan vedlikehaldsmodellen gjennomførast innanfor tildelte trafikale krav?)
 4. Er det etablert overordna RAM-krav?
Overordna RAM-krav omfattar:
 - Trafikale krav, derunder ein framtidig rutemodell
 - Krav til maksimalt tal på årlege forseinkingstimar
 - Ein overordna vedlikehaldsmodell
 5. Er overordna systemdefinisjon etablert?
 6. Er det gjennomført overordna RAM-analyse og validert om RAM-krav vil bli nådd?
 7. Er det etablert systemdefinisjon i detaljplan?
 8. Er det etablert detaljert RAM-analyse i detaljplan og validert om RAM-krav vil bli nådd?
 9. Er det etablert detaljerte RAM-krav?
Detaljerte RAM-krav omfattar:
 - Endelege krav til tilgjengelegheit for system, delsystem og komponentar på strekninga
 - Endelege krav til reparasjon og utrykkingstider i forbindelse med feilretting
 10. Korleis er nødvendig innputt til modellen henta inn?
 11. Andre kommentarar til analysen:

Studie av kvalitative RAM-analysar:

1. Er det gjennomført signifikansvurdering som tilseier at analysen kan utførast kvalitativt?
2. Dersom svaret på spørsmål 1 er nei, kvifor er analysen utført kvalitativt og ikkje kvantitativt?
3. Kva informasjon gir analysen?

Bibliografi

Bane NOR (2017a) *Føring av hendelseslogg*. Tilgjengeleg frå:

http://orv.jbv.no/orv/doku.php?id=avvikshandtering:instruks_for_foring_av_hendelseslogg

(Henta: 09.03 2017).

Bane NOR (2017b) Instruks for etablering av RAM-krav *STY-603226, Rev.: 003*.

Bane NOR (2017c) Vedlegg til STY-603134 Mal for RAM-analyse *STY-603613, Rev.: 000*.

Bane NOR (2017d) Mal for systemdefinisjon *STY-603107, Rev.: 006*.

Bane NOR (2017e) RAMS - introduksjon og oversikt EN 50126, med RAMS-begrepshandbok *STY-603102, Rev.: 004*.

Bane NOR (2017f) Mal for signifikansvurdering av behov for RAM-analyse *STY-603580, Rev.: 002*.

Bane NOR (2017g) RAMS-styring i Bane NOR *STY-603144, Rev.: 005*.

Bane NOR (2017h) RAMS-politikk og strategi *STY-603144, Rev.: 005*.

Bane NOR (2017i) Prosesskart for RAMS i UPB-prosessen *STY-603099, Rev.: 005*.

Bane NOR (2017j) *Togenes punktlighet og regularitet*. Tilgjengeleg frå:

<http://www.banenor.no/Nyheter/Togenes-punktligheit-og-regularitet/> (Henta: 23.02 2017).

Bane NOR (2017k) *Teknisk regelverk*. Tilgjengeleg frå: <https://trv.jbv.no/wiki/Forside> (Henta: 26.06 2017).

Bane NOR (2017l) Veiledning for gjennomføring av RAM-analyser *STY-603581, Rev.: 003*.

Bane NOR (u.å.) *Avvik og hendelser (Synergi)*. Tilgjengeleg frå:

<http://www.banenor.no/kundeportal/trafikkavvikling/avvik-og-hendelser-synergi/> (Henta: 26.06 2017).

Bibliografi

EN 13306 (2010) Vedlikehold : Vedlikeholdsterminologi = Maintenance : Maintenance terminology (b. NS-EN 13306:2010). Lysaker: Standard Norge.

EN 50126 (1999) Railway applications - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Cenelec, Brussels.

Grønmo, S. (2004) *Samfunnsvitenskapelige metoder*. Bergen: Fagbokforl.

Hair, J. F., *et al.* (2010) *Multivariate data analysis : a global perspective*. 7th ed., Global ed. utg. Upper Saddle River, N.J: Pearson.

Hansen, I. A. og Pachel, J. (2008) Railway timetable & traffic: analysis, modelling, simulation.(PUBLICATIONS), *Railway Gazette International*, 164(2), s. 110.

Høyland, A. og Rausand, M. (2009) *System Reliability Theory : Models and Statistical Methods*. Hoboken: Wiley.

Jernbaneinfrastrukturforskriften (2011) *Forskrift om nasjonale tekniske krav m.m. for jernbaneinfrastruktur på det nasjonale jernbanenettet*. Tilgjengeleg frå: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2011-04-11-388 - KAPITTEL_3 (Henta: 06.03.2017).

Jernbaneverket (2011a) Håndbok for vedlikehold *STY-601058, Rev.: 000*. Tilgjengeleg frå: <http://www.banenor.no/globalassets/documents/sty-dokumenter/kompetansekrav-signalvag/601058-000.pdf> (Henta: 03.03.2017).

Jernbaneverket (2011b) Guide to Generic Bottom-up RAM Model *Signalling System Generic Requirements Specification, ERT-00-Q-00121_03E_001*.

Jernbaneverket (2011c) Deriving RAM Targets from JBV's Top Level Requirements, Top-down *Signalling System Generic Requirements Specification, ERT-00-Q-00120_03E_001*.

Jernbaneverket, *et al.* (2014) Vedlikeholdsetterslep *Vedlegg 2: Definisjoner, begrepsapparat og metoder som benyttes for å anslå vedlikeholdsetterslepet*. Tilgjengeleg frå:

<http://www.ntp.dep.no/S%C3%B8k/attachment/702947/binary/988573?ts=14918abfd08>
(Henta: 13.03.2017).

Jernbaneverket (2015a) Jernbanestatistikk. Tilgjengeleg frå:
<https://www.jernbanedirektoratet.no/globalassets/documenter/jernbaneverket-statistikk-2015.pdf> (Henta: 24.04.2017).

Jernbaneverket (2015b) Konseptdokument for IC-strekningene. Tilgjengeleg frå:
<http://www.banenor.no/contentassets/0480f88268f74111a7b08a702b3138cb/konseptdokument-for-ic-strekningene.pdf> (Henta: 15.02.17).

Jernbaneverket (2015c) RAM-analyse på Jernbanesystem *Muligheter og utfordringer*.
Tilgjengeleg frå: <http://esra.no/wp-content/uploads/2015/04/4-Tuven-Jernbaneverket.pdf>
(Henta: 10.03.2017).

Jernbaneverket (2016) *Feilrater*. Tilgjengeleg frå:
<https://dl.dropboxusercontent.com/u/10560328/JBV/help.html> (Henta: 20.02.2017).

Jiang, S. og Persson, C. (2016) Malfunction in Railway System and Its Effect on Arrival Delay, i Kumar, U., *et al.* (red.) *Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety: An Industry Perspective*. Cham: Springer International Publishing, s. 243-252.

Laerd Statistics (2015) Multiple regression using SPSS Statistics *Statistical tutorials and software guides*. <https://statistics.laerd.com/>. (Henta: 22.05.2017).

Løvås, G. G. (2004) *Statistikk for universiteter og høyskoler*. 2. utg. utg. Oslo: Universitetsforl.

Mattsson, L.-G. (2007) Railway Capacity and Train Delay Relationships, i Murray, A. T. og Grubestic, T. H. (red.) *Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, s. 129-150.

Multon og Coleman, K. J. D. S. M. (2010) Categorical Variable, i Salkind, N. J. (red.) *Encyclopedia of Research Design*. SAGE Publications, s. 123-124.

Bibliografi

Olsson, N., *et al.* (2015) *Punktlighet i jernbanen - hvert sekund teller*. SINTEF akademisk forlag.

Olsson, N. O. E. og Haugland, H. (2004) Influencing factors on train punctuality—results from some Norwegian studies, *Transport Policy*, 11(4), s. 387-397. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.07.001>.

Pistolas, C. og Vernon, G. (2016) Decision making for railway operations using RAM analysis *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*. CRC Press, s. 2712-2718.

Rausand, M. (2013) *Risk Assessment : Theory, Methods, and Applications*. Hoboken: Wiley.

Rausand, M. (2014) *Reliability of Safety-Critical Systems : Theory and Applications*. Hoboken: Wiley.

Sen, A., Srivastava, M. og SpringerLink (1990) *Regression Analysis Theory, Methods, and Applications*. Springer New York.

Skog, O. (1998) *Å forklare sosiale fenomener : en regresjonsbasert tilnærming*. Oslo: Ad notam Gyldendal.

Sæverud, K.-M. Ø. (2016) *Modellering av tilgjengelegheit for jernbaneinfrastruktur*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).

Tjora, A. H. (2012) *Kvalitative forskningsmetoder i praksis*. 2. utg. utg. Oslo: Gyldendal akademisk.

Walpole, R. E. (2016) *Probability & statistics for engineers and scientists*. 9th ed. utg. Harlow: Pearson Education.

Yan, X. og Su, X. (2009) *Linear Regression Analysis : Theory and Computing*. Singapore: World Scientific Publishing Company.

Økland, A. og Ekambaram, A. (2010) *Beregning av punktlighet og pålitelighet for godstransport på jernbane - PUSAM teorigrunnlag*. SINTEF Teknologi og samfunn.

Tilgjengeleg frå:

[https://www.sintef.no/contentassets/ec528130f46c4271b41fdc69236a51fc/d1_1_1_punktlighe
t.pdf](https://www.sintef.no/contentassets/ec528130f46c4271b41fdc69236a51fc/d1_1_1_punktlighe_t.pdf) (Henta: 12.03.2017).