



Fakultet for ingeniørvitenskap
og teknologi
Institutt for produksjons-
og kvalitetsteknikk

Pålitelighetsanalyse for GSM-R

Gaute Elvenes

**Master i organisasjon og ledelse, spesialisering i
sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold**

Våren 2013

MASTEROPPGAVE

2012 – 2013

for

Gaute Elvenes

**PÅLITELIGHETSANALYSE GSM-R: GLOBALT SYSTEM FOR
MOBILNETT - JERNBANE****(Reliability GSM-R: Global System for Mobile Communications – Railway)**

GSM-R er et lukket mobilnett (digitalt radiosystem), utviklet for bruk ved jernbaner i Europa. I Norge ble dette nettet tatt i bruk i perioden fra 2005 til 2007. Det operative senter for nettet i Norge er lagt til Marienborg i Trondheim. Det overordnende ansvaret for GSM-R-systemet ligger hos Jernbaneverket og skal sørge for at GSM-R nettet til enhver tid møter de avtalte krav med hensyn på kvalitet og tilgjengelighet. Jernbaneverket skal dessuten godkjenne togoperatørens del av systemet som omfatter teknisk utstyr, programvare og menneskene som skal bruke systemet (opplæring med mer). Det er Statens jernbanetilsyn som godkjenner installasjon og anvendelse av utstyret. GSM-R er sentralt i utviklingen av de felles europeiske signalsystem for tog (European Rail Traffic Management System, ERTMS). I denne oppgaven skal kandidaten spesielt:

1. Foreta en litteraturstudie med hensyn på å finne ut hvilke metoder for pålitelighetsanalyse som har vært benyttet for analyse av GSM-R og lignende systemer.
2. Foreslå et sett med metoder for pålitelighetsanalyser som er relevant for analyse av GSM-R. Diskutere styrker og svakheter ved disse metodene, samt hvordan metodene mest hensiktsmessig kan benyttes for slike analyser.
3. Diskutere hvilke pålitelighetsdata som er påkrevd for slike analyser og vise hvilke kilder til data som er tilgjengelige.
4. Velge ut ett eller flere delsystemer ved en GSM-R implementering og foreta en pålitelighetsanalyse. I analysen skal ulike metoder testes ut, og relevante pålitelighetsdata skal fremskaffes.
5. Vurdere ulike drifts- og vedlikeholdsstrategier med basis i pålitelighetsmodellene som er utviklet og testet i eksempelstudiene.

Oppgaveløsningen skal basere seg på eventuelle standarder og praktiske retningslinjer som foreligger og anbefales. Dette skal skje i nært samarbeid med veiledere og fagansvarlig. For øvrig skal det være aktivt samspill med veileder.

Det skal utarbeides en prosjektplan som skal inneholde følgende:

- En analyse av oppgavens problemstillinger.
- En kort beskrivelse av evt. case som skal benyttes.
- En oversikt over sentrale tema som skal belyses samt en beskrivelse av de arbeidsoppgaver som skal gjennomføres for løsning av oppgaven. Denne beskrivelsen skal munne ut i en klar definisjon av arbeidsoppgavenes innhold og omfang.
- En redegjørelse for metodevalg.
- En oversikt over relevant litteratur som tenkes brukt i oppgaven.
- En tidsplan for fremdriften av prosjektet. Planen skal utformes som et Gantt-skjema med angivelse av de enkelte arbeidsoppgavenes terminer, samt med angivelse av milepæler i arbeidet.
- En beskrivelse av hvordan veiledning skal foregå.

Prosjektplanen skal ha et omfang på ca. 5 sider og skal utarbeides i samråd med veileder. Den skal være godkjent av veileder innen **15. mars 2012** etter utlevering.

Prosjektplanen er en del av oppgavebesvarelsen og skal vedlegges denne. Det samme gjelder senere fremdrifts- og avviksrapporter. Ved bedømmelsen av arbeidet legges det vekt på at gjennomføringen er godt dokumentert.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Materiell som er utviklet i forbindelse med oppgaven, så som programvare eller fysisk utstyr er en del av besvarelsen. Dokumentasjon for korrekt bruk av dette skal så langt som mulig også vedlegges besvarelsen.

Hvis kandidaten under arbeidet med oppgaven støter på vanskeligheter, som ikke var forutsett ved oppgavens utforming, og som eventuelt vil kunne kreve endringer i eller utelatelse av enkelte spørsmål fra oppgaven, skal dette straks tas opp med veileder.

Opgaveteksten skal vedlegges besvarelsen og plasseres umiddelbart etter tittelsiden.

Besvarelsen skal innleveres i 1 elektronisk eksemplar (pdf-format) og 5 eksemplar (innbundet).
Frist for innlevering er **1. februar 2013**.

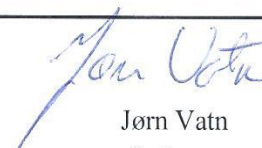
Ansvarlig faglærer/veileder ved NTNU: Jørn Vatn
Telefon: 73 59 71 09
Mobiltelefon: 414 73 730
E-post: jorn.vatn@ntnu.no

**INSTITUTT FOR PRODUKSJONS-
OG KVALITETSTEKNIKK**



Per Schjølberg

førsteamanuensis/instituttleder



Jørn Vatn
faglærer

Forord

Denne oppgaven representerer avslutningen på mitt Masterprogram i organisasjon og ledelse med fordypning innenfor Sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold ved NTNU Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for produksjons og kvalitetsteknikk. Dette var et studieløp som startet våren 2010, og som har utviklet seg i en spennende retning både for meg og bedriften jeg jobber i. Selv om driften av et GSM-R nett til tider er langt unna de bransjer som det har vært hentet eksempler fra i undervisningen, har det vært interessant å kunne bidra med erfaring fra en annen sektor. I tillegg er mye av det som det undervises i, overførbart til ivaretagelse av sikkerheten ved drift og vedlikehold av jernbanen.

Kombinasjon av studie og arbeid har også gitt en unik mulighet til å prøve ut lærdommen i praksis, samtidig som jeg har kunnet dra nytte av min lange arbeidserfaring i studiet.

Tema for masteroppgaven ble valgt ut fra et ønske om å se om de metoder og verktøyer som ble presentert under utdanningen ved NTNU Videre er direkte overførbart til driften av et mobilnett. Dette ut fra en intensjon om at driften av Jernbaneverkets GSM-R nett skal foregå på en så optimal måte som mulig, samtidig som sikkerheten er ivaretatt. For Jernbaneverket kan det kan være betydelig beløp å spare på å utføre riktig vedlikehold til riktig tid. Samtidig er det meget viktig at driftsorganisasjonen sørger for at tilgjengelighetskravene til nettet blir overholdt.

Etter avtale med faglærer/veileder Jørn Vatn er prosjektplan, fremdrifts- og avviksrapporter ikke vedlagt denne besvarelsen.

Melhus, januar 2013

Gaute Elvenes

Annerkjennelse

Arbeidet med masteroppgaven har vært omfattende, og jeg må spesielt takke ansatte ved Jernbaneverket Bane Nett Drift & Vedlikehold, som har måtte svare på mange til tider intrikate spørsmål og ikke minst har måtte fremskaffe statistikkgrunnlag fra de forskjellige systemene. De har også måtte finne seg i å være prøvekluter når teori fra undervisningen skulle utprøves i praksis.

Jeg må også takke min faglærer og veileder Jørn Vatn ved NTNU for dyktig og inspirerende veiledning.

Til slutt må jeg takke min kjære familie som til tider synes at jeg har konsentrert meg mer om mitt studie enn om dem. Lover å komme sterkt tilbake når oppgaven er levert.

G.E.

Sammendrag og konklusjon

I denne oppgaven har påliteligheten til GSM-R blitt vurdert opp mot gjeldene krav på 99,985 % og kravet på 99,975 % som nettet er bygget etter. Det er utført en studie på hva som ligger til grunn for kravet, både via forskrifter og interne regler i Jernbaneverket. GSM-R sin betydning for verdien for forventet antall omkommende (Potential Loss of Life, PLL), er belyst gjennom analyse av styrende dokumenter. Det er vist i oppgaven hvordan forskjellige analysemetoder kan benyttes for å beregne GSM-R nettets pålitelighet, og eventuelle styrker og svakheter med disse metodene er belyst. For videre detaljanalyse og forslag til optimalisering av enkelte nettelementer er det benyttet Markovanalyser.

Analysen viser at kravet til 99,975 % tilgjengelighet fremkommer første gang i kontrakten for bygging av GSM-R nettet. Det har ikke vært mulig å finne den underliggende argumentasjon for hvorfor dette nivået ble valgt. Jernbaneverket har selv i ettertid vurdert om det skal innføre SIL 1 krav for GSM-R, men fraråder dette ut fra relativt liten gevinst på innføringen. I min analyse har jeg kommet frem til at deler av nettet kan tilfredsstille et SIL 1 krav, men det ligger en betydelig utfordring i å oppnå tilstrekkelig pålitelighet i radio og transmisjonsnettet.

Et annet grunnleggende spørsmål i denne oppgaven er om innføringen av GSM-R er tatt inn i grunnlaget for PLL verdien til Jernbaneverket. I mine undersøkelser finner jeg at dette ikke er utført og det vil heller ikke vær naturlig da PLL bygger på historiske verdier, og ikke hva man antar kan bli oppnådd. JBV har et sterkt fokus på sikkerheten innenfor jernbanen, og har en nullvisjon når det gjelder antall drepte i forbindelse med jernbanen. I arbeidet med gjennomføring av denne visjonen inngår GSM-R som ett av flere elementer som på sikt skal føre til færre drepte. GSM-R er ikke definert som en barriere i forbindelse med fremføringen av tog, men er et viktig barriereelement både før og etter en uønsket hendelse. GSM-R kan helt klar bidra til å redusere omfanget på en uønsket hendelse, ved å tilby en rask og sikker kommunikasjon mellom tog og togleder.

I oppgaven er påliteligheten til GSM-R nettet analysert ved hjelp av blokkdiagram og feiltre. I denne oppgaven er det benyttet et dataprogram for å utføre beregningen i feiltreet, mens beregningene for blokkdiagrammet er utført for hånd. Dette har medført at jeg har lagt inn flere elementer i feiltreanalysen enn i blokkdiagrammet. Som følge av dette kommer de to beregningsmetodene frem til litt forskjellige svar. For analyse av strømforsyning til en basestasjon er det benyttet Markovanalyse, som gir en mulighet til å analysere systemer med flere feilmoduser og en kompleks oppbygging. Oppgaven viser også en metode for estimering av batteribankens aldringsparameter, og hvilke optimaliseringstiltak for strømforsyningen til en BTS som kan gjennomføres med grunnlagt i Markovanalysen.

Oppgaven viser at både designkravet på 99,975 % og kravet fra virksomhetsplan på 99,985 % er oppfylt for GSM-R under visse forutsetninger. For oppfylning av begge disse kravene må togleder har tilgang til redundant toglederterminal.

Summary and Conclusions

In this thesis the reliability demand for the GSM-R network has been assessed against the current demand for 99,985% availability, and the 99,975 % demand, which the network has been designed for. There has been a study why this level was selected, both through a study of regulations, and internal principles at Jernbaneverket. Evaluation of what effects GSM-R has on the value for potential loss of life (PLL) has been carried out by a study of internal regulation. In this thesis several different methods have been used for calculating the reliability for the network. For a further detailed analyses and optimization the Markov analysis has been used.

The analysis shows that the demand for 99,975 % availability first has been shown in the contract for building of the GSM-R network. It has not been possible to find the source why this level was selected. Jernbaneverket has later evaluated if there should be a SIL 1 demand for the GSM-R, but doesn't advise this because there's very little to gain from this change. In my analysis I have found, that some parts of the network can meet the SIL 1 demand. The Radio and Transmission network don't meet the SIL 1 demand without some changes in the design.

Another fundamental question in the thesis has been if the introduction of GSM-R has been calculated into the PLL value for Jernbaneverket. In my study have I found, that this has not been done. It will neither be naturally as long as the PLL value is based on historical values, and not on what the organization think they can achieve. Jernbaneverket has a strong focus on the safety for the railway operations, and has a zero vision for people injured or killed in connection with railway operations. In the work with fulfilling this vision, the GSM-R is just one element among other. GSM-R is not defined as a safety barrier for train operations, but an important safety element before and after an undesirable incident. GSM-R can clearly contribute to reduce the consequence of an undesirable incident, by providing a fast and reliable communications between the train driver and the train dispatcher.

In this thesis the reliability of the GSM-R network has been calculated with the help of block diagram and fault tree. For the calculation in the fault tree there has been used a computer program, while the block diagram has been calculated by hand. Because of the support from the computer program, the fault tree has been more detailed than the block diagram. As a result of this the methods gives a slightly different result. For the analysis of the power supply for a Base Station, there has been used Markov analysis, which gives the opportunities to analysis systems with several fault-modes and a complex construction. The thesis also demonstrates methods to calculate aging parameters, and optimization action which can be carried out on the power supply for a Base Station by the help of Markov analysis.

The thesis shows that the demand for 99,975 % availability from the design of the network, and also the demand for 99,985 % availability from the activity plan are fulfilled under certain conditions. In both cases the train dispatcher need to have access to at redundant dispatcher telephone.

Innholdsfortegnelse

Forord	vii
Annerkjennelse	ix
Sammendrag og konklusjon.....	xi
Summary and Conclusions.....	xiii
Innholdsfortegnelse	xv
1. Introduksjon.....	1
1.1. Bakgrunn	1
1.1.1. Problemformulering.....	1
1.1.2. Litteratursøk.....	2
1.1.3. Hva gjenstår å gjennomføre	2
1.2. Mål.....	3
1.3. Begrensinger.....	3
1.4. Tilnærming	4
1.5. Struktur på rapporten.....	4
2. Krav til tilgjengelighet for GSM-R nettet.....	5
2.1. Kort oversikt over funksjonaliteten i GSM-R nettet.....	5
2.2. Nasjonale og Jernbaneverkets krav til GSM-R infrastrukturen.....	6
2.4. GSM-R som barriereelement	11
2.5. Effekten ved innføring av GSM-R i forhold til PLL	13
2.6. GSM-R påvirkning på PLL	16
2.7. SIL og GSM-R nettet	19
3. Pålitelighetsanalyse av GSM-R.....	21
3.1. Metoder for pålitelighetsanalyse	21
3.1.1. Systemer	21
3.1.2. Funksjonsanalyse av systemer og FMECA.....	22
3.1.3. Pålitelighetsblokkdiagram	22
3.1.4. Feiltreanalyser	23
3.1.5. Markovanalyse.....	23
3.2. Pålitelighetsdata	24
3.3. Betydningen software har for påliteligheten til GSM-R systemet.....	26
3.4. Delsystemanalyse	27
3.4.1. Analyse av modell for kommunikasjon mellom BTS – Togledersentral	28
3.4.2. Blokkdiagram BTS – Togledersentral.....	28
3.4.3. Blokkdiagram radio-nettverk og transmisjon.....	29

3.4.4.	Analyse av blokkdiagram for kommunikasjon fra MS via en BTS til BSC	31
3.4.5.	Analyse av blokkdiagram for kommunikasjon fra MS via en BTS til BSC	31
3.4.6.	Feiltre-analyse for kommunikasjon fra en BTS til BSC.....	33
3.4.7.	Blokkdiagram sentrale systemer	33
3.4.8.	Feiltre-analyse sentrale GSM-R systemer.....	34
3.4.9.	Blokkdiagram for Togledertelefonisystem.....	35
3.4.10.	Feiltre-analyse Togledertelefonisystemet	36
3.4.11.	Systemets totale tilgjengelighet	36
3.4.12.	Teknisk tilgjengelighet til en BTS.....	38
3.5.	Analyse av erfaring fra drift av GSM-R nettet	40
3.5.	Analyse av den strukturelle betydning av komponenter.....	42
3.6.	Analyse av strømforsyning til BTS.....	44
3.6.1.	Analyse av antall forventede defekte batteribanker pr. år	48
3.6.2.	Optimal byttefrekvens på batteribank ut fra levealder.....	51
3.6.3.	Leveransetiden på batteribanker sin betydning for påliteligheten.....	53
3.6.4.	Batterier med lengre levetid sin innvirkning på strømforsyningens tilgjengelighet.....	54
3.7.	Effekten av dublert GSM-R kjernenett	55
4.	Oppsummering og anbefalinger for videre arbeid.....	57
4.1.	Resultatmål A: Tilgjengelighet på 99,975 % og PLL verdi.....	57
4.2.	Resultatmål B: Metoder for pålitelighetsberegning.....	57
4.3.	Resultatmål C: Analyse av typisk senario i GSM-R.....	58
4.4.	Resultatmål D: Tilgjengelighet på 99,985 % og SIL 1 krav.....	59
4.5.	Resultatmål E: Effekten av vedlikeholdsoptimalisering	59
4.6.	Diskusjon.....	60
4.7.	Anbefalinger for videre arbeid	63
5.	Forkortelser brukt i denne oppgaven.....	64
	Bibliografi	65
	Vedlegg A MTBF grunnlagsdata fra leverandører.....	68
	Vedlegg B Modeller for beregning av tilgjengelighet i GSM-R nettet.	70
	BTS – Togledersentral.....	70
	Kringkastingsmelding mellom Togledersentral til flere BTS-er	70
	BTS – Lokal trafikkleder (TXP).....	71
	BTS – BTS.....	71
	Togleder – Togleder	72
	Vedlegg C Feiltre for Radio og Transmisjonsnett	73
	Vedlegg D Feiltre for sentrale systemer.....	76
	Vedlegg E Feiltre for Frequentis systemet.....	77

1. Introduksjon

Forventningene til moderne telekommunikasjonssystemer er så høye, at det i praksis stilles krav om tilgjengelighet 24 timer i døgnet 365 dager i året. Dette stiller strenge krav til tilgjengelighet og pålitelighet til systemene, både ovenfor produsentene, leverandørene og ikke minst egen driftsorganisasjon. I tillegg må det innføres prosesser som ivaretar etterlevelse av kravene i den daglige driften. Spesielt gjelder dette ved endringer hvor man må sørge for at det opprinnelige sikkerhetsnivået også er ivaretatt etter endring.

1.1. Bakgrunn

Innenfor jernbanesektoren er det et krav at det skal være tilgjengelig medium for kommunikasjon mellom tog og togledelse. Dette for å ivareta nødvendig kommunikasjon i forbindelse med fremføring av tog, og kommunikasjonsbehov som oppstår ved nødtilfeller.

Global System for Mobile Communications (GSM) for Rail (GSM-R) er utarbeidet som en standard for bruk innenfor jernbanesektoren og startet som det EU finansierte prosjektet MOBILE RADIO FOR RAILWAY NETWORKS IN EUROPE (MORANE), på nittitallet. Spesifikasjonene ble fastsatt av European Integrated Radio Enhanced Network (EIRENE), og endelig utkast til standard ble levert fra 2000. Basert på arbeidet fra MORANE og EIRENE utformet UIC i 1997 et Memorandum of Understanding (MOU) som forpliktet jernbaneselskapene som hadde underskrevet dette, til ikke å lengre utvikle analoge radiosystemer, men rett fokuset mot utviklingen av GSM-R. Utviklingen av GSM-R har foregått i tett samarbeid mellom industrien og jernbanesektoren i Europa, slik at det skulle være mulig å oppnå en rask implementering av systemene i de forskjellige jernbaneselskapene.

Norge startet byggingen av GSM-R i 2003, og den første strekningen Bodø – Rognan ble satt i drift i sommeren 2004. Deretter fortsatte utbyggingen i flere faser, og nettet som dekker hele jernbanen i Norge ble satt i drift i 2007. I forbindelse med utbyggingen ble det også opprettet en egen driftsorganisasjon for GSM-R som er lokalisert til Operasjonssenter Marienborg (OPM) i Trondheim. OPM har ansvar for 24/7/365 overvåkning og drift av GSM-R nettet. I tillegg er også kundeservice for GSM-R lagt til OPM. OPM er organisert under Jernbaneverket Bane Nett som har ansvaret for all telekommunikasjon i Jernbaneverket (JBV).

1.1.1. Problemformulering

GSM-R er et stort og komplekst system som stadig er under komplementering og oppgradering. Det er derfor av stor betydning for tilgjengeligheten i nettet at JBV har kontroll på endringer, og hvilken betydning disse kan ha for påliteligheten til nettet. JBV må derfor ha prosesser som ivaretar at endringer i nettet ikke fører til reduksjon i det etablerte sikkerhetsnivået.

Tilgjengeligheten til tjenestene i GSM-R nettet er i kontrakten satt til 99,975 %. Men er det mulig å finne ut hvorfor dette nivået er valgt og hvilken modell som ligger til grunn for dette valget? I forbindelse med virksomhetsplanleggingen i JBV i 2010 ble kravet til GSM-R endret til 99,985 %. Dette uten at det er foretatt endringer i nettet som skulle tilsi en bedre tilgjengelighet. Er GSM-R nettet bygget så robust at det uten endringer kan ivareta en slik styrking av kravet, eller må nettet forsterkes på en eller annen måte for å ivareta det nye kravet?

GSM-R nettet er et svært komplisert nett med mange avhengigheter mellom de enkelte delsystemene. Feilutviklingen i de enkelte elementene kan være forskjellige fra delsystem til delsystem. Denne oppgaven vil se på hvilke metoder som kan benyttes til å verifiserer tilgjengeligheten i nettet. Hvilken metode er best egnet ved analyse av GSM-R systemet, og hva er styrken og svakheten til de forskjellige metodene?

1.1.2. Litteratursøk

For å skaffe grunnlag for analysene og vurderingene som er foretatt i denne masteroppgaven, er det utført et omfattende litteratursøk. Hensikten med søket har vært å kartlegge hvilken litteratur som er tilgjengelig innenfor analyser av GSM-R nettverk. Både med hensyn til tilgjengelighet og pålitelighet. Søket er utført via søkesider som er tilgjengelig på NTNU, internett og internt i JBV. Det ble søkt med kombinasjoner av følgende søkeord både på norsk og engelsk. GSM-R, GSM, tilgjengelighet, pålitelighet, analyse, rapport, konsekvens, blokkdiagram, feiltre, Markov, RAMS, RAM, UIC, ERA, MORANE, studie.

Det er gjennom søket ikke funnet at det er utført noen analyser av GSM-R nettverk med samme fremgangsmåte som denne oppgaven benytter. Dette hindrer ikke at det kan være utarbeidet analyser av samme format, men disse er ikke publisert.

Nå er ikke metoder for beregning av pålitelighet til elektronikk og telekommunikasjonsutstyr noe nytt. Sikkerheten innenfor jernbanesektoren er basert på en nøye kontroll av påliteligheten til utstyr som ivaretar sikkerheten i forbindelse med fremføring av tog. Men jeg kan ikke finne noen rapporter som er offentlig tilgjengelig, som beskriver de samme metodene benyttet på GSM-R.

1.1.3. Hva gjenstår å gjennomføre

I beregningene som er foretatt i denne oppgavene er ikke systemet for radiolinje analysert i detalj. Det er brukt verdier fra Systemkontrakten (Jernbaneverket, 2003) som grunnlag. Det ville være av stor interesse for Jernbaneverket, om også dette systemet ble nærmere analysert. Dette ut fra at det relativt ofte i driften av nettet er problemer med enten radiolinjeutstyret eller kommunikasjon over det. En forbedret tilgjengelighet på dette utstyret vil ha en direkte innvirkning på tilgjengeligheten til GSM-R.

1.2. Mål

Effekt mål:

Formålet med denne oppgaven er å finne ut om et så omfattende og komplisert nett som GSM-R lar seg analysere på en enkel og effektiv måte, med teori og metoder fra fagene som det undervises i ved NTNU Videre med spesialisering i Sikkerhet, Pålitelighet og Vedlikehold.

Resultat mål:

- A. Redegjøre for hva som ligger til grunn for tilgjengelighetskravet på 99,975 %, og vurdere om dette valget har hatt betydning for PLL verdien til Jernbaneverket.
- B. Redegjøre for hvilke metoder som kan benyttes ved pålitelighetsberegning av et GSM-R nett.
- C. Gjennomføre en analyse med valgt metoder for et typisk scenario i GSM-R nettet.
- D. Avgjøre om GSM-R nettet møter det pålagte tilgjengelighetskravet på 99,985 % ut fra valgt analysemodell og metoder.
- E. Vurdere effekten av ulike optimaliseringsmetoder med utgangspunkt i pålitelighetsmodell som er testet i punkt C.

1.3. Begrensinger

Det forutsettes at den som leser denne oppgaven kjenner til prinsippene og teorien bak pålitelighetsanalyser og risikoanalyser. Det er derfor ikke tatt med et eget avsnitt om grunnleggende teori, men derimot fokusert på praktisk anvendelse.

GSM-R systemet er svært komplekst i sin oppbygging og har en infrastruktur som er lokalisert med sentrale systemer i Trondheim, og desentraliserte systemer som er plassert langs jernbanen. Dette medfører en komplisert kommunikasjonsløsning som kan variere alt etter hvor i Norge man befinner seg. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i en modell som dekker de forskjellige sentrale systemer, og de mest vanlige formene for transmisjon. Denne modellen er ikke direkte overførbar til et geografisk punkt på jernbanen, men er dekkende for de feilmoder som kan oppstå.

Jernbaneverket er inne i en prosess der det skjer en fornyelse av GSM-R. Denne oppgaven tar utgangspunkt i nettet som eksisterer i 2012, men tar inn enkelte elementer som er under implementasjon i nettet, der hvor dette er relevant for analysen. I modellen som er analysert er det foretatt avgrensinger og forenklinger. Dette for å forenkle analysen og for å kompensere for problemer med å fremskaffe relevante pålitelighetsdata for hver enkel komponent i systemet. Hvilke avgrensninger og forenklinger som er foretatt, er opplistet sammen med aktuell beregning.

I tillegg gjøres det en analyse av hvilken betydning feil i software kan bety for påliteligheten til GSM-R systemet.

1.4. Tilnærming

De fem delmålene vil bli analysert etter følgende metode.

- A. For å finne grunnlaget for gjeldene tilgjengelighetskravet vil det bli gjennomført et søk i gjeldene lover og regler både internt i Jernbaneanverket og eksternt. I tillegg vil det bli søkt i arkivene til Jernbaneanverket etter styrende dokumenter i forbindelse med byggingen av nettet. Så fremt det fortsatt er mulig vil det bli gjennomført samtaler med personer som var involvert i planleggingen og byggingen av GSM-R nettet.
- B. For å redegjøre for hvilke metoder som kan benyttes ved pålitelighetsberegning av GSM-R vil jeg benytte meg av tilgjengelig litteratur og gi en kort oppsummering av metodene.
- C. Ved analysen av et typisk scenario i GSM-R nettet vil metodene som er beskrevet i punkt B bli benyttet på en relevant situasjon i nettet. Forskjellige metoder for beregning av tilgjengelighet vil bli benyttet, og det vil bli sett på hvordan man kan benytte metodene til optimalisering av nettet.
- D. For å avgjøre om GSM-R nettet møter de pålagte tilgjengelighetskrav vil resultatene fra punkt C sammenstilles mot kravene funnet i punkt A, samt kravet fra virksomhetsplanen på 99,985 %.
- E. Benytte forskjellige metoder for vedlikeholdsoptimalisering for å se hvilken effekt dette kan gi på påliteligheten til et av elementene i GSM-R nettet.

1.5. Struktur på rapporten

Denne Masteroppgaven er bygget opp på følgende måte.

Kapittel 2 gir en kort introduksjon til GSM-R og hvordan nettet fungerer. Deretter gis det en oversikt over hvilke krav som stilles til tilgjengeligheten i GSM-R nett. Før jeg ser nærmere på GSM-R som en barriere. Til slutt ser jeg på hva GSM-R og et eventuelt SIL 1 krav kan bety for PLL-verdien til Jernbaneanverket.

Kapittel 3 gir en oversikt over metoder for pålitelighetsanalyser, og en oversikt over hvilke pålitelighetsdata som er tilgjengelig for GSM-R. Deretter gjennomføres en pålitelighetsanalyse ved hjelp av de beskrevne metodene. Til slutt gjøres det en analyse av hvordan vedlikeholds optimalisering kan påvirke påliteligheten.

Kapittel 4 gir oppsummering av funn og hvordan disse er relatert til hovedmålene i oppgaven. Til slutt gis det en anbefaling for videre arbeid.

2. Krav til tilgjengelighet for GSM-R nettet

GSM-R er et sentralt og viktig element for Jernbaneliknet, og det stilles høye forventninger til tilgjengeligheten i GSM-R nettet, både av brukerne og av Jernbaneliknet selv. Men hvilke regulatoriske krav stilles det til nettet og hvordan er dette fulgt opp av Jernbaneliknet? Er det slik at et fungerende GSM-R nett vil føre til en reduksjon i Potensial Life Lost (PLL) verdien for Jernbaneliknet? Disse to spørsmålene vil bli besvart i dette kapitlet.

2.1. Kort oversikt over funksjonaliteten i GSM-R nettet

GSM-R nettet er bygget for å tilby kommunikasjon mellom togleder og togfører. GSM-R skal tilby dekning i og ved jernbanesporet, herunder også i alle tunneller. Systemet er levert av Nokia Siemens Network (NSN) og består av tre hoveddeler, radiosystem, kjernenett og togledertelefonisystem. Grensesnittet mellom de enkelte delsystemene er etablert over standard grensesnitt. Dette åpner for muligheten til å benytte utstyr fra forskjellige leverandører om ønskelig.

Radionettet består av basestasjoner (BTS) som er plassert langs sporet og sørger for GSM-R dekning til tog, og andre som arbeider ved sporet. En BTS vil også gi signal inn til repeateranlegget som sørger for radiodekning i en tunell. Er tunellen over 500 meter har repeateranlegget innmating fra BTS-er i begge ender av tunellen. En BTS er koblet opp mot en basestasjonskontroller (BSC). Kommunikasjon mellom BTS og BSC er realisert ved hjelp av forskjellige typer kommunikasjon. Den mest vanlige er radiolinje (RL) eller via fiberbasert kommunikasjon (NGN). Hovedoppgaven til BSC er å kontrollere radiotrafikken på de BTS-ene som er tilkoblet. De BSC-ene som benyttes i nettet i dag, har tilstrekkelig kapasitet til at alle 503 BTS-er i GSM-R nettet kan være tilkoblet en BSC. Mellom BSC og Mobil Switching Center (MSC) er det koblet en Transcoder unit (TRAU) som utfører en komprimering av talekanalene fra MSC til BSC for å redusere behovet for transmisjon. TRAU står plassert sammen med MSC på sentral lokasjon.

Hovedkomponenten i kjernenettet er MSC og Home Location Register (HLR). MSC står for oppsett, ruting, kontroll og nedkobling av samtaler i nettet. I tillegg håndterer MSC tilleggstjenester, taksering og utgjør grensesnittet mot andre telenett. Tilgang til HLR er avgjørende for funksjonaliteten i nettet da denne kontrollerer all informasjon om alle abonnenter i nettet. I tillegg holder HLR oversikt over hvor den enkelte abonnent befinner seg, og hvilke tjenester den enkelte abonnent har tilgang til. Som en funksjon i HLR er det et autentiseringssenter (AuC) som genererer koder for kryptering, og godkjenner tilgang til nettet.

Et annet vesentlig element innenfor GSM-R er den Intelligente Node (IN) som fortar konvertering mellom funksjonelle nummer og mobilnummer. Funksjonelle nummer legger til rette for at togleder kan ringe tognummer, og derfor ikke trenger å kjenne til hvilket mobilnummer som er i det aktuelle togsettet. I GSM-R tar man alltid opptak av alle samtaler, og disse lagres i en tidsavgrenset periode. Dette gjøres ved

hjelp av et Voice Recording (VR) system som er tilkoblet alle relevante grensesnitt på MSC.

Kjernenettet består i tillegg av en rekke systemer som muliggjør drift og overvåking av nettet. Men som hver for seg ikke er kritisk for funksjonaliteten til GSM-R

Togledertelefonisystemet består av en sentral del som er plassert sammen med MSC og desentraliserte elementer som er plassert ute ved de enkelte togledersentralene. Den sentrale delen er grensesnittet mot MSC, og fordeler inngående og utgående trafikk til riktig togledersentral. Den desentraliserte enheten ruter innkommende og utgående trafikk, til riktig toglederterminal på aktuell togledersentral.

I GSM-R nettet er det lagt stor vekt på redundans, enten ved dublering av systemer eller ved hjelp av innebygget redundans i systemene. Mellom alle elementer i nettet finnes det alltid minimum to transmisjonsveier, og alt sentralt utsyr skal være tilkoblet to separate strømforsyninger. Kommunikasjon mellom sentrale elementer, og eksterne elementer har alltid to separate veier. Det er lagt stor vekt i designet på at det ikke skal finnes enkeltpunkter som alene skal kunne føre til utfall av tjenester.

Bruksmessig er det lite som skiller et GSM-R nett fra et vanlig GSM nett. Forskjellen ligger i hvordan nettet behandler et Nødanrop (REC). Ved REC kan dette utløses fra togfører eller togleder. Tiden for å sette opp anropet er meget kort, og skal ikke overskride to sekunder, fra anropet er initiert til det er etablert taleforbindelse til den mottakende part. Dette er betydelig raskere enn ved oppsett av en vanlig samtale, som tar rundt tjue sekunder. I tillegg har REC prioritert slik at andre samtaler blir koblet ned hvis det ikke skulle være tilstrekkelig kapasitet i radionettet. Hvis den som skal motta anropet er opptatt i en annen samtale, vil denne bli koblet ned hvis den pågående samtalen har lavere prioritet enn innkommende REC. Ved utløst REC vil også alle andre tog som er innfor det samme REC-området, automatisk bli koblet inn i samme REC. Dette for å forhindre at andre tog eventuelt skal kjøre inn i den nødsituasjon som har oppstått. I en REC er det kun togleder som har mulighet til å prate hele tiden, alle andre må dele på en talekanal. Dette styres ved at den radioen som ønsker å sende blir tildelt tillatelse fra nettet, andre må dermed vente, men kan fortsatt høre samtalen som pågår.

2.2. Nasjonale og Jernbaneverkets krav til GSM-R infrastrukturen

Det er en rekke regulatoriske krav angående tilgjengelighet og funksjonalitet i GSM-R nettet. I Tabell 2-1 er de eksplisitte kravene angitt med henvisning til hvor man finner disse.

Jernbaneinfrastrukturforskriften (Samferdseldirektoratet, 2011) stiller en rekke krav til kommunikasjon mellom tog og togleder. Alle disse kravene er i dag ivaretatt ved hjelp av GSM-R og rutiner som beskriver opptreden ved avvik på GSM-R systemet. Både Eirene (UIC Project EIRENE, 2006) og Teknisk regelverk (Jernbaneverket, 2012) stiller kvantitative krav til GSM-R nettet. Det er kun kravene til bygging i Teknisk regelverk (Jernbaneverket, 2012) av GSM-R som stiller krav om tilgjengelighet på 99,975 %, kravet til tilgjengelighet i drift er betydelig lavere og ligger på 99,7 %. Men det er grunn til å anta at dette er

et krav som gjelder analoge radiosystemer, og at Teknisk regelverk (Jernbaneverket, 2012) ikke er oppdatert med GSM-R krav. I tillegg settes det retningslinjer for bruk av systemet og hvordan man skal opptre ved spesielle hendelser, eller når man ikke har dekning fra GSM-R. I praksis er dette gjennomført ved at tog ikke kan forlate utgangsstasjon hvis GSM-R er ute av drift. Dette på grunn av behovet for å registrerer toget med funksjonelt nummer i systemet før avgang. Hvis dekning fra GSM-R mistes etter avgang fra utgangsstasjonen, kan toget fortsette i 40 km/h til endestasjon, eller inntil dekning fra GSM-R oppnås igjen. Dette burde bety at det var forskjellige krav til tilgjengelighet for en utgangsstasjon kontra fri linje. Noe som igjen kunne medføre forskjellige krav til rettetid og teknisk oppbygging av systemet, men dette er ikke nedfelt som et krav i Teknisk regelverk (Jernbaneverket, 2012). I designet for GSM-R nettet er dette kravet tatt hensyn til ved at alle utgangsstasjoner er under dekning av to BTS-er, men disse har samme krav til rettetid som resten av nettet.

I Tabell 2-1 er kravene som er relatert til GSM-R listet opp med referanse til hvor de er funnet. Kravene er deretter vurdert ut fra om det er funksjon-, kvalitet- eller tilgjengelighetskrav. Funksjonskrav er krav iht. til virkemåte og bruksområde for GSM-R nettet. Kvalitetskrav er krav til nettets ytelse. Med tilgjengelighetskrav forstås krav om at GSM-R skal være klart til bruk ved behov.

9 av kravene er relatert til funksjon, 2 til kvalitet og 3 til tilgjengelighet. Krav 9 i Tabell 2-1 er litt spesielt, men beskriver kravet til tilgjengelighet for mobilabonnenter som er innenfor det geografiske området som nettet er designet for å dekke. Krav 13 stiller krav til fire vanlige måleparameterer for mobilnett. Dette er hvor mange mislykkede forsøk på å sette opp samtaler som aksepteres, hvor mye sperr i nettet som aksepteres, hvor mange overføringer fra en BTS til en annen BTS som tillates at mislykkes, og hvor mye sperr på signaleringskanalen til en som BTS aksepteres.

Tabell 2-1 Oversikt over regulatoriske krav til GSM-R

Krav nr.	Kravformulering	Referanse	Funksjons-krav	Kvalitets-krav	Tilgjengelighets-krav
1	§3-10 Trafikkstyringssentral Trafikkstyring skal skje fra en trafikkstyringssentral. Trafikkstyringssentralen skal ha et velegnet utstyr for å drive trafikkstyring, herunder for å kunne kommunisere med togbetjeningen.	Jernbaneinfrastruktur-forskriften (Samferdseldirektoratet, 2011)	Ja		
2	§3-11 Kommunikasjonssystem Jernbaneinfrastruktur skal være utbygd med kommunikasjonssystem (togradio) til bruk i togframføringen. På all jernbaneinfrastruktur skal det være et system for nødkommunikasjon, slik at det til enhver tid er gjensidig mulighet for rask kontakt mellom fører og trafikkstyringssentralen. Kommunikasjon i forbindelse med trafikkstyringen skal lagres sikkert og i tilstrekkelig tid i forhold til behovet ved eventuell undersøkelse av jernbaneulykker, alvorlige jernbanehendelser og jernbanehendelser.	Jernbaneinfrastruktur-forskriften (Samferdseldirektoratet, 2011)	Ja		
3	§ 7-24. Feil på togets togradio Infrastrukturforvalter skal fastsette nærmere bestemmelser om i hvilke tilfeller toget kan kjøre videre, dersom det oppstår feil på togets togradio etter at toget har kjørt fra første stasjon angitt i ruten.	Togfremførings-forskriften (Statens Jernbanetilsyn, FOR-2008-02-29-240)	Ja		
4	§ 6-5. Før kjøring av tog 1. Før kjøring av tog fra det stedet der toget er klaggjort, skal føreren minst kontrollere at: togets nummer er registrert i togradiosystemet	Togfremførings-forskriften (Statens Jernbanetilsyn, FOR-2008-02-29-240)	Ja		
5	§ 5-10. Nødsituasjon Hvis togleder eller tog-ekspeditør mottar varsel om nødsituasjon, skal det sendes ut nødansrop i togradioen for den aktuelle strekningen. I tillegg skal det vurderes om det er nødvendig å koble ut kontaktledningsanlegget.	Togfremførings-forskriften (Statens Jernbanetilsyn, FOR-2008-02-29-240)	Ja		

Krav nr.	Kravformulering	Referanse	Funksjons-krav	Kvalitets-krav	Tilgjengelighets-krav
6	<p>§ 6-10. Nødanrop</p> <p>1. Hvis det oppstår en nødsituasjon der andre tog må varsles umiddelbart, skal fører sende nødanrop i togradioen.</p> <p>2. Alle førere som mottar nødanrop i togradio skal straks redusere togets hastighet til sikthastighet.</p> <p>3. Fører skal motta tillatelse fra togleder før toget kan gjenoppta normal kjørehastighet.</p>	Togfremførings-forskriften (Statens Jernbanetilsyn, FOR-2008-02-29-240)	Ja		
7	<p>§ 6-12. Spesielle bestemmelser om hastighet</p> <p>1. Hastighet for tog er begrenset til 40 km/t:</p> <p>e når føreren og vedkommende som betjener toget fra et annet førerrom, ikke kan kommunisere ved bruk av togradio eller annet kommunikasjonssystem.</p>	Togfremførings-forskriften (Statens Jernbanetilsyn, FOR-2008-02-29-240)	Ja		
8	4.2.2.10. Nødkommunikasjon Radiokommunikasjon i form av GSM-R mellom toget og kontrollsentret skal finnes i hver tunnel. Det er ikke behov for ytterligere kommunikasjonssystemer som nødtelefoner.	TSI-sikkerhet i jernbanetunneler (Statens jernbanetilsyn , FOR-2008-07-04-790)	Ja		
9	3.2.2 The level of coverage should be at least 95% of the time over 95% of the designated coverage area for a radio installed in a vehicle with an external antenna.	Eirene Functional Requirements Specification (UIC Project EIRENE, 2006)		95 %	95 %
10	<p>2 GENERELT</p> <p>a) Vedlikehold skal gjennomføres i henhold til anleggenes systemkrav, og slik at den garanterte tilgjengelighet opprettholdes for de forskjellige anlegg.</p> <p>b) Tilgjengeligheten for telefon- og datakommunikasjonssystem for togframføring bør minimum være 99,7 % pr. toglederområde målt over et år.</p>	<p>“Tele/Vedlikehold/ Telefon- og datakommunikasjons-system for togframføring”</p> <p>Teknisk regelverk for JBV (Jernbaneverket, 2012)</p>	Ja		

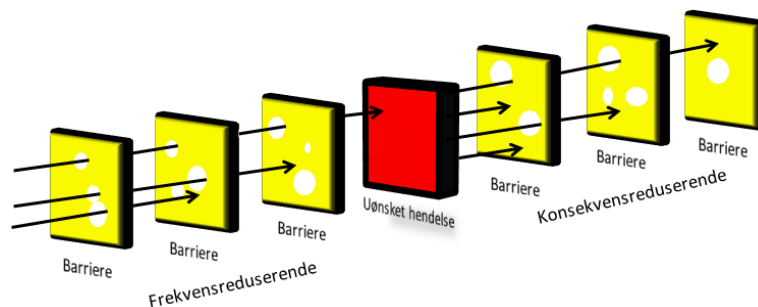
Krav nr.	Kravformulering	Referanse	Funksjons-krav	Kvalitets-krav	Tilgjengelighets-krav
11	<p>2 GENERELT</p> <p>a) Radiosambandsnettets skal til enhver tid tilfredsstillende de vilkår konsesjonsmyndigheten (PT) har fastsatt. Utstyret skal holdes i slik driftsteknikks stand at alle krav som stilles i konsesjonsvilkårene blir oppfylt. Dette gjelder alle faste-, mobile- og bærbare radiostasjoner i alle radionett som er nevnt i avsnitt 1.</p> <p>b) Tilgjengeligheten for alle analoge radiosystemer skal minimum være 99,7 % pr. toglederområde målt over et år. For GSM-R gjelder krav definert i Dokument 560. 1. Forutsetningen for å oppnå angitt tilgjengelighet er at radiosystemet styres over abonnentlinjer med minimum 99,95% tilgjengelighet.</p>	<p>“Tele/Vedlikehold/Radioanlegg”</p> <p>Teknisk regelverk for JBV</p> <p>(Jernbaneverket, 2012)</p>			<p>Radiosystem</p> <p>99,7 %.</p> <p>Abonnentlinjer</p> <p>99,95 %.</p>
12	<p>4.2.1 GSM-R</p> <p>Krav til tilgjengelighet for GSM-R, se avsnitt 4.1.1</p> <p>a) Oppetid skal være høyere enn 99,975 %.</p>	<p>4 PÅLITELIGHET, TILGJENGELIGHET OG SIKKERHET (RAMS)”</p> <p>“Tele/Prosjektering og bygging/Radioanlegg”</p> <p>Teknisk regelverk for JBV</p> <p>(Jernbaneverket, 2012)</p>			GSM-R 99,975 %
13	<p>4.1.1 GSM-R</p> <p>a) Antall mislykkede oppkall skal ikke overstige 1 % av det totale antall.</p> <p>b) Overbelastning av radionettet skal ikke overstige 1 %.</p> <p>c) Antall vellykkede handover skal utgjøre minst 99 % av det totale antall.</p> <p>d) Antall blokkeringer i trafikkanaler skal ikke overstige 1 % av det totale antall samtaler.</p>	<p>Avsnitt 4.1.1</p> <p>Teknisk regelverk for JBV</p> <p>(Jernbaneverket, 2012)</p>		<p>Call setup failure rate <1%.</p> <p>Congestion < 1%.</p> <p>Handover failure rate <1%.</p> <p>TCCH congestion <1%</p>	
14	<p>I Systemkontrakten Exhibit E (Jernbaneverket, 2003) angis 5 forskjellige metoder for hvordan tilgjengelighet i GSM-R systemet skal beregnes. Disse metodene er angitt i, og en fullstendig oversikt over disse finnes i Vedlegg C Modeller for beregning av tilgjengelighet i GSM-R nettet.</p>	<p>Systemkontrakten Exhibit E punkt 6.1.1.1.3 til 6.1.1.1.7</p> <p>(Jernbaneverket, 2003)</p>			GSM-R 99,975 %

2.4. GSM-R som barriereelement

De fleste risikovurderinger vil komme frem til en eller flere uønskede hendelser. Uønskede hendelser omtales som hendelser som er irreversible og kan føre til skader på mennesker, miljø eller materielle verdier, hvis det ikke settes inn tiltak for å stoppe utviklingen av den uønskede hendelsen (Rausand, et al., 2009). Hva som er den uønskede hendelsen vil være bestemt av hva risikoanalysen omfatter. Hvis analysen f.eks. omfatter et sikringsanlegg kan topphendelsen være at hovedfunksjon til sikringsanlegget svikter, og tillater at to møtende tog kommer inn på samme linje

For å forhindre at den uønskede hendelsen inntreffer eller redusere konsekvensen av den, er det vanlig å bygge opp barrierer. For ytterligere å redusere sannsynligheten for en uønsket hendelse er det normalt å ha flere barrierer etter hverandre. Dette kan illustreres som vist i Figur 2-1. De forskjellige barrierene kan være av fysiske, tekniske eller av administrative art, og kan deles inn i to hovedgrupper.

Konsekvensreducerende som har til oppgave å redusere omfanget av den uønskede hendelsen, disse barrierene kalles ofte reaktive barrierer. Den andre hovedgruppen er de frekvensreducerende som har til oppgave å hindre at uønsket hendelse inntreffer, også benevnt proaktive barriere.



Figur 2-1 Barrièremodell

I Jernbaneverket vil frekvensreducerende barrierer i forbindelse med togframføring være. Signalanlegg som gir visuelt signal til togfører om toget har klarsignal til å kjøre på linjen. Fjernstyring av sporveksler som gjør det mulig å regulere om toget kan kjøre ut på linje. Både signal og fjernstyringen er koblet til et sikringsanlegg som har til oppgave å hindre at det gis kjørsignal på, eller at det legges sporvei til ei linje som alt er i bruk. Automatic Train Control (ATC) er et system som registrerer om toget kjører mot rødt lys, eller hurtige enn aktuell fartsgrense, for deretter å aktivere bremsene på toget for enten å stoppe toget eller redusere hastigheten. I tillegg finner man operative rutiner som beskriver hvordan tog skal fremføres i normal driftssituasjon og ved avvik fra denne. Man kan også ha barrierer etter at den uønskede hendelsen har inntruffet. Disse vil være konsentrert om å redusere konsekvensen av den uønskede hendelsen. Dette kan for eksempel være brannvegger som har til oppgave å hindre spredning av en brann. Innenfor jernbanesektoren kan man se på hvordan bremsene i et tog styres. Når toget står i ro er bremsene aktiv, og toget holdes i ro. Når toget skal kjøre er det trykkluft som løfter bremseklossene vekk fra bremsekivene. Hvis det oppstår lekkasje på systemet for trykkluft, vil denne lekkasjen føre til at bremsene aktiveres og

toget stopper. Ved at bremsesystemet er bygget opp på denne måten, unngår man at en uønsket lekkasje kan føre til en farlig tilstand i form av at toget ikke har bremsekraft.

Ser man på definisjonene av barriere, barriereelement og barrierefunksjon fra Petroleumstilsynet (PTIL) finner man følgende:

Barriere: Tekniske, operasjonelle og organisatoriske elementer som enkeltvis eller til sammen skal redusere muligheten for at konkrete feil, fare- og ulykkessituasjoner inntreffer, eller som begrenser eller forhindrer skader/ulemper (PTIL, 2012).

Barriereelement: Tekniske, operasjonelle eller organisatoriske tiltak eller løsninger som inngår i realiseringen av en barrierefunksjon (PTIL, 2012).

Barrierefunksjon: Oppgaven eller rollen til en barriere. Eksempler på barrierefunksjoner er: forhindre lekkasje, forhindre antenning, redusere brannbelastning, sikre forsvarlig evakuering, forhindre hørselsskade (PTIL, 2012).

Ser man på hvordan barrierer omtales over er ikke GSM-R en barriere. Dette ut fra at GSM-R ikke fysisk kan hindre at en uønsket situasjon oppstår, eller automatisk redusere konsekvensen av en uønsket situasjon. Derimot er GSM-R svært viktig både før, og etter en uønsket hendelse, ved at brukerne får tilgang til en rask og sikker kommunikasjon.

2.5. Effekten ved innføring av GSM-R i forhold til PLL

Rapporten GSM-R i Jernbaneverket, effekt av investering med fokus på sikkerhet (Jernbaneverket, 2001) henviser til to vedlegg, Bilag 1: Endringsanalyse ved innføring av GSM-R, HolteProsjekt. Og bilag 2: Analyse av mobile radio og telefonsystemer, JBV. Disse vedleggene har det ikke vært mulig å få tak i, men kunne være av interesse ut fra tittelen på dokumentene. I selve rapporten kapittel 6.2 Sikkerhetsmessige virkning av GSM-R (Jernbaneverket, 2001) er det satt opp en tabell som viser hvilken effekt innføring av GSM-R vil ha på de 8 definerte topphendelsene.

Tabell 2-2 Fordeling av PLL i forhold til topphendelse (Jernbaneverket, 2001)

Topphendelse	% av kalkulert risiko (PLL)*	GSM-R landsomfattende utbygging	
		Før - situasjon	Etter - situasjon
Avsporing	11	Svært liten betydning. Varsling av ras eller annet som kan forårsake avsporing.	Stor betydning for varsling av andre tog på linjen og redningsmannskaper.
Sammenstøt tog – tog	14	Stor betydning på stasjoner ifm. kryssing m/deteksjonssystem (akustisk alarm). Stor betydning ved tog i ukontrollert drift. **	Stor betydning for varsling av andre tog på linjen og redningsmannskaper.
Sammenstøt tog – objekt	8	Liten betydning. Tog kan bli varslet og unngår sammenstøt.	Stor betydning for varsling av andre tog på linjen og redningsmannskap.
Brann	3		Stor betydning for varsling av andre tog på linjen og redningsmannskap.
Personer skadet i tog	0		Stor betydning for varsling av redningsmannskap.
Passasjerer skadet på plattform	3	Liten betydning.	Stor betydning for varsling av redningsmannskap.
Personer skadet ved planovergang (PLO)	39		Stor betydning for varsling av andre tog på linjen og redningsmannskap.
Personer skadet i spor	22	Svært liten betydning.	Stor betydning for varsling av andre tog på linjen og redningsmannskap.

* Kalkulert risiko i strekningsanalysene, uttrykket i PLL

** Teksten er endret i forhold til originalt dokument, uten at innholdets mening er endret.

Konklusjon i denne rapporten (Jernbaneverket, 2001) er at et fullt utbygd og implementert GSM-R vil forbedre sikkerheten ut fra følgende:

- GSM-R øker sikkerheten i betydelig grad på strekninger som i dag ikke har togradio. Dette gjelder i stor grad en “etter-situasjon” ved en topphendelse i noe mindre grad i en “før-situasjon” (Jernbaneverket, 2001)
- GSM-R gir høyre sikkerhet enn dagens togradio. (Jernbaneverket, 2001)

- Innføring av GSM-R gir betydelig økonomisk gevinst i form av lavere drifts- og vedlikeholdskostnader for Jernbaneverkets og trafikktøvers radioanlegg. (Jernbaneverket , 2001)
- GSM-R kan generelt være en kommunikasjonsbærer for kontroll og styring av tekniske anlegg i Jernbaneverket som har betydning for sikkerheten. I tillegg vil trafikktøverene ha stor nytte av systemet til tjenester om bord på togene. (Jernbaneverket , 2001)

I rapporten om vurdering av gevinsten ved et SIL 1-sertifisert GSM-R system” (Jernbaneverket, 2011) er effekt av å innføre SIL 1 nivå for GSM-R vurdert. Denne rapporten går spesifikt inn på hvilken effekt SIL 1 vil gi for PLL, kontra dagens løsning. Rapporten bygger på en analyse av topphendelser, og hvilke barrierer man har for hver enkelt av disse. Det vurderes hvilken effekt GSM-R vil ha ved de enkelte driftsformer før en ulykke. Gjennomgående i denne analysen er at GSM-R ikke er en barriere i seg selv, men svært viktig ved varsling for å unngå at hendelse inntreffer. GSM-R er også svært viktig bidrag til at konsekvensene av en allerede inntruffet hendelse reduseres. Dette skulle indikere at GSM-R har en påvirkning på PLL. Analysegruppen har utført en kvantitativ analyse av forhold hvor GSM-R kan ha en innvirkning på sikkerheten. Effekt av GSM-R nødansrop ved de ulike topphendelser og driftsformer er gitt i tabellen under:

Tabell 2-3 GSM-R betydning for utfall av topphendelser (Jernbaneverket, 2011)

Topphendelse	Driftsform		
	Enkeltspor med CTC	Enkeltspor uten CTC	Dobbeltspor
Avsporing	Ingen	Ingen	Kan varsle motgående tog
Sammenstøt tog – tog	Kan avverges	Kan avverges	Kan avverges
Sammenstøt tog – objekt	Ingen	Ingen	Ulykke kan avverges ved avsporing
Person skadet i og ved spor	Ingen	Ingen	Ingen
Brann	Ingen	Ingen	Kan gi tryggere evakuering
Person skadet ved planovergang	Kan varsles ved krysning	Kan varsles ved krysning	Ingen
Passasjer skadet på plattform	Ingen	Ingen	Ingen

Av tabellen ser vi at det kun ved topphendelsen “Sammenstøt tog – tog” og “Person skadet ved planovergang” at GSM-R kan ha en effekt ved enkeltsporet drift med og uten sentral togkontroll (CTC). Ved dobbeltsporet drift kan GSM-R ha større innvirkning.

Følgende er lagt til grunn for vurderingen av “Sammenstøt tog – tog”:

- Fører må kjøre uaktsomt mot rødt lys. Dette skjer 0-2 ganger pr. år. Analysegruppen anslår konservativt totalt 2 hendelser pr. år, herunder 1,8 hendelser på strekning med CTC og 0,2 hendelser på strekning uten CTC (Jernbaneverket, 2011).
- På strekninger med CTC må det være feil på automatisk togkontroll (ATC), eller ATC må være avslått. Sannsynligheten for at ATC er avslått er mindre enn 1 %. ATC systemet er SIL 4 sertifisert, og har dermed en feilrate på mindre enn en feil pr. 10^{-8} time. I beregningen anslår analysegruppen derfor at en uaktsom kjøring mot rødt lys kan passere en av 100 ganger på strekninger med CTC (Jernbaneverket, 2011).
- Ingen ATC på strekning uten CTC (Jernbaneverket, 2011).
- Sporveksel må være oppkjørbar (Jernbaneverket, 2011).

Dersom disse forutsetningene er til stede kan togleder/txp varsles med GSM-R nødinterop, og en uønsket hendelse kan avverges. Ut fra beregningen i rapporten gir dette mulighet til gevinst i PLL på $5.0 \cdot 10^{-5}$ ved innføring av SIL 1 nivå for GSM-R.

I beregningen for topphendelsen "Person skadet ved planovergang" er følgende forutsetning lagt til grunn for beregningen.

- Dersom det er et kryssningsspor ved planovergangen kan et ventende tog se om et kjøretøy står fast på planovergangen (Jernbaneverket, 2011).
- Det antas to hendelser pr. år der et kjøretøy blir sittende fast på en planovergang (Jernbaneverket, 2011).
- Videre antas det at 0,01 av disse hendelsene blir observert av noen som kan varsle med GSM-R nødinterop (Jernbaneverket, 2011).
- Av disse vil det være rundt 50% sjanse for at ulykken kan avverges (Jernbaneverket, 2011).

Beregningen i denne rapporten er utført ved at PLL verdien for hver av hendelsene i Tabell 2-3 er beregnet ut fra dagen pålitelighetskrav i GSM-R på 99,975 % og deretter med et SIL 1 pålitelighetskrav på 99,9999 %. Deretter har man multiplisert differansen med forventet antall døde pr. ulykke, som dermed også angir gevinsten i PLL ved innføring av SIL 1 for GSM-R.

Oppsummert gir dette følgende gevinst for de enkelte hendelsene i Tabell 2-3:

Tabell 2-4 PLL gevinst ved innføring av SIL 1 (Jernbaneverket, 2011)

Avsporing	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Sammenstøt tog-tog på strekninger:	
Med CTC	$4,3 \cdot 10^{-6}$
Uten CTC	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Løpske tog	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Brann	$6,2 \cdot 10^{-7}$
Personer skadet på planovergang	$5,0 \cdot 10^{-7}$

Dette gir en samlet gevinst i PLL på $1,06 \cdot 10^{-4}$ pr. år. Som igjen tilsvarer ett liv spart pr. 10 000 år (Jernbaneverket, 2011) ved innføring av SIL 1 krav kontra dagens pålitelighetskrav til GSM-R.

2.6. GSM-R påvirkning på PLL

Ut fra konklusjon i rapporten hvor gevinsten ved et SIL 1-sertifisert GSM-R system (Jernbaneverket, 2011) blir vurdert slås det fast at en økning av tilgjengeligheten til GSM-R bare vil gi en marginal forbedring av PLL. Ut fra mine undersøkelser av dokumenter i forbindelse med planleggingen av GSM-R finner jeg ikke at det har vært vurdert at innføringen vil medføre en reduksjon i PLL. Dette kan ha sammenheng med at tallene for PLL ble utarbeidet og lagt inn i Styringssystemet til Jernbaneverket (Jernbaneverket, 2001), samtidig som planleggingen av GSM-R var i gang. Dermed kan forventet reduksjon som følge av GSM-R allerede være tatt inn i PLL, men jeg finner ingen klare bevis for dette. Dette ville heller ikke være normalt at man innarbeider en fremtidig forventet reduksjon i PLL, da beregningen av denne parameteren bygger på historisk tallmateriale.

Er det realistisk at GSM-R kan føre til en reduksjon i PLL? Når dette spørsmålet har vært diskutert med personer som jobber med sikkerhet innenfor JBV, og spesielt innenfor GSM-R, møter jeg liten forståelse for dette spørsmålet. Den ene grunnet er GSM-R er et nytt system for JBV, men funksjonen som tilbys gjennom systemet har tidligere vært tilgjengelig gjennom analoge radiosystemer. GSM-R tilbyr derimot bedre funksjonalitet, dekning og pålitelighet enn de gamle systemene, men JBV har tydeligvis ikke beregnet hvilken effekt denne forbedringen kan gi. Den andre grunnen er at PLL er basert på historisk statistikk, og ikke en predikasjon på hva man tror forskjellige tiltak vil føre til av reduksjon i fremtiden. Grunnlag for Jernbaneverkets riskokoakseptkriterier (Jernbaneverket, 2011) er en del av Sikkerhetshåndboken (Jernbaneverket, 2008) til JBV. Beregningen av PLL er basert på beregninger utført på data fra 2001 og eldre. Sikkerhetshåndboken (Jernbaneverket, 2008) sier ikke noe om hvor ofte denne analysen skal oppdateres.

Dette betyr ikke at JBV ikke jobber med en kontinuerlig forbedring av sikkerheten. JBV har som visjon at det skal være 0 skadde eller drepte i forbindelse med jernbanen i Norge. Arbeidet som på sikt vil føre til en

redusert PLL foregår på mange plan i organisasjonen, gjennom bedring av sikkerhetskultur og sikkerhetsstyringen. I tillegg arbeides det med en sikrere infrastruktur hvor GSM-R inngår som et av elementene. Eksempel på andre tiltak innenfor infrastrukturen er tiltak mot ras og utglidninger av masse i spor, samt bedre sikring eller fjerning av planoverganger (Jernbaneverket, 2012).

Hvis man går inn på web siden til Statisk Sentralbyrå, og velger Jernbaneverket Statres (Statistisk Sentralbyrå, 2012) finner man følgende statistikk for Jernbaneverket:

Tabell 2-5 Nøkkeltall for Jernbaneverket i perioden 2009 - 2011 (Statistisk Sentralbyrå, 2012)

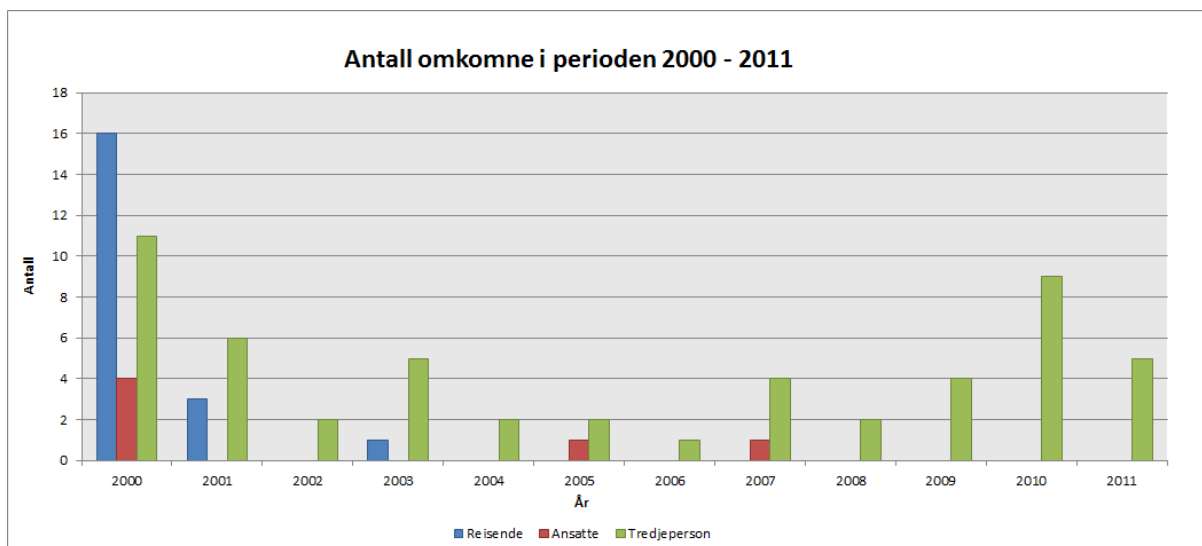
	2009	2010	2011
Elektrifisert bane (prosent)	62	60	61
Andel dobbeltspor (prosent)	6	6	6
Planoverganger pr. kilometer bane	0,9	0,9	0,9
Oppetid (prosent)	98,6	98,4	98,5
Punktlighet, godstog (prosent)	78,0	72,0	76,0
Signalfeil med driftsforstyrrelser pr. kilometer bane	0,4	0,4	0,4
Drepte	3	9	6
Gjennomsnitt drepte siste 20 år	6,55	6,35	6,2
Alvorlig skadde	4	4	5
Påkjørte dyr	1 794	2 294	2 050
Påkjørt elg	856	936	964

Deretter kan man gå nærmere inn på antall drepte, og finner for perioden 2005 til 2011 følgende data for gjennomsnittlig antall drepte siste 20 år.

Tabell 2-6 Fordeling drepte i perioden 2005 - 2011 (Statistisk Sentralbyrå, 2012)

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Gjennomsnitt drepte siste 20 år	8,15	7,25	7,2	6,9	6,55	6,35	6,2
Drepte	3	1	3	1	3	9	6
Alvorlig skadde	2	3	3	1	4	4	5

I Sikkerhetsrapport 2011 fra SJT (Statens Jernbanetilsyn, 2012) finner man en oversikt over antall drepte i forbindelse med hendelser på det nasjonale jernbanenettet. Her ser man at det er en nedgang i antall drepte reisende, mens det er økning i drepte på grunn av påkjørsler på planoverganger, personpåkørsler og Sjursøya ulykken i 2010.



Figur 2-2 Antall omkommende ved det nasjonale jernbanenettet i perioden 2000 - 2011 (Statistisk Sentralbyrå, 2012)

Av denne ser man at gjennomsnitt drepte de siste 20 årene er stadig fallende. Jernbaneverket har kontinuerlig fokus på forbedringen av sikkerhet i forbindelse med driften av jernbanen. I dette arbeidet med inngår GSM-R som ett element, men også andre forbedringer i infrastrukturen og generelt fokus på sikkerhet og oppfølging av denne har bidratt til nedgangen. Gjennomsnittlig drepte de 20 siste årene er 6,2 i følge årsrapporten for 2011 (Jernbaneverket, 2012) fra JBV. JBV har som mål at denne verdien skal senkes med 4,5 % pr. år. Alle de drepte i 2011 var personer som ikke direkte er tilknyttet driften av jernbanen eller var reisende, men personer som av forskjellige grunner befant seg i nærheten av jernbanesporet. I følge årsrapporten (Jernbaneverket, 2012) vurderer JBV fortløpende forebyggende tiltak i forhold til å oppnå en fremtidig reduksjon i antall ulykker.

Det er i statistisk sammenheng for tidlig til å kunne si noe om at GSM-R har hatt noen påvirkning på PLL verdien. GSM-R er ikke en barriere og kan ikke med sin funksjon alene hindre en ulykke i å oppstå, men vil være et viktig hjelpemiddel for varsling når hendelse er i ferd med å inntreffe. Innføringen av GSM-R vil bidra i de forebyggende barrierene, ved å tilby et rask og pålitelig kommunikasjonsmedium mellom togfører og togleder. Slik at togfører eller togleder har mulighet til å varsle at en uønsket hendelse er i ferd med å oppstå. For eksempel hvis et tog kjører forbi et signal som viser stopp, har togleder en enkel metode for hurtig å få tak i riktig togfører. Noe som igjen vil bidra til at en mulig ulykke avverges. En annen hendelse kan være at togleder blir varslet om en bil som står fast på en planovergang. Togleder kan da hurtig varsle aktuelle tog i området slik at en ulykke kan avverges.

Hendelser som beskrevet over hvor bruken av GSM-R bidrar til å hindre en ulykke, vil på sikt bidra til en nedgang i antall drepte i forbindelse med jernbanen.

I tillegg har GSM-R stor betydning for konsekvensreduksjon etter at en ulykke har inntruffet. Dette ved å hindre at ulykken eskalerer ved at flere blir involvert, og at en raskere kan tilkalle hjelpepersonell.

Eksempler på dette kan være avsporing hvor man raskere kan varsle andre tog på linjen slik at de ikke

kjører inn i ulykken som allerede har oppstått. Samtidig kan man raskere få varslet hjelpepersonell om lokasjon og omfang. Noe som igjen kan bety raskere evakuering av skadde fra ulykkesstedet.

2.7. SIL og GSM-R nettet

Selv om det er konkludert i JBV at man ikke ønsker SIL klassifisering av GSM-R nettet, er det fortsatt mulig å foreta noen betraktninger rundt dette temaet. Det viktigste spørsmålet er hvorfor skulle man ønske en SIL klassifisering av GSM-R nettet. Driftsorganisasjonen ved Operasjonssentralen i Trondheim er i dag sertifisert etter ISO 27001 som dekker krav i forbindelse med ivaretagelse av informasjonssikkerheten. Denne standarden stiller ingen formelle krav til ivaretagelse av teknisk sikkerhet, men krav som omhandler rutiner og prosesser. Krav til teknisk tilgjengelighet er i JBV dekket gjennom bruk av RAMS som bygger på CENELEC standardene EN50126, EN50128 og EN50129 som utgjør en jernbanespesifikk tilpassing av IEC61508. Dette er en generisk standard for instrumenterte sikkerhetssystemer (SIS).

SIS deles inn i to hovedtyper alt etter måten de fungerer på. Low demand systemer som står normalt passive og aktiveres kun hvis det oppstår et behov. I motsetning til High demand systemer som er i kontinuerlig bruk, eller aktiveres mer enn en gang i året. GSM-R må i denne sammenheng defineres som et High demand system. Sannsynligheten for at et SIS vil utføre den tiltenkte sikkerhetsfunksjonen under alle forhold, og innenfor en bestemt tidsperiode betegnes med Safety Integrity Level (SIL). SIL er et diskret nivå av 4 mulige, som spesifiserer integritetsnivået på sikkerheten til sikkerhetsfunksjon som SIS skal utføre. SIL4 er det høyeste nivået og SIL 1 er det laveste nivået.

Tabell 2-7 Oversikt over SIL nivåer for Low Demand og High Demand systemer (OLF, 2004)

SIL	Low Demand.	High Demand eller kontinuerlig bruk.
	Frekvens på behov for aktivering av SIS er lavere enn 1 gang pr. år og ikke større enn to ganger av den frekvensen systemet er testet for. (Gjennomsnittlig sannsynlighet for manglede evne til å utføre sin tiltenkte sikkerhetsfunksjon ved behov, PFD)	Frekvens på behov for aktivering av SIS er større enn 1 gang pr. år eller større enn to ganger frekvens av det systemet er testet for. (Sannsynlighet for en farlig feil pr. time, PFH)
4	$\geq 10^{-5}$ til $\leq 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ til $\leq 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-4}$ til $\leq 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ til $\leq 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-3}$ til $\leq 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ til $\leq 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-2}$ til $\leq 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ til $\leq 10^{-5}$

Safe Failure Fraction (SFF) angir den delen av den totale feilraten, som gir en sikker feil (S) eller farlig detektert feil (DD). Hensikten med denne parameteren er at operatøren skal iverksette tiltak på feil som kan påvirke sikkerheten (DD og S feil), slik at SIS fortsatt kan betraktes som et sikkerhetssystem.

Standarden IEC 61508 setter spesifikke krav til SIL ved design av et high demand system. I tabellen under vises det til Hardware feiltoleranse. Dette er en parameter som angir hvor stor andel hardwarefeil som kan aksepteres før systemet mister sin sikkerhetsfunksjon. Hvis hardware feiltoleranse er N vil N+1 feil føre til tap av sikkerhetsfunksjonen.

Tabell 2-8 SIL nivå for et High Demand systemet ut fra Safe Failure Fraction (OLF, 2004)

SFF	Hardware feiltoleranse		
	0	1	2
< 60 %	N/A	SIL 1	SIL 2
60 % - 90 %	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90 % - 99 %	SIL 2	SIL 3	SIL 4
≥ 99 %	SIL 3	SIL 4	SIL 4

For GSM-R kan man regne med at en hardware feiltoleranse på 0, ut fra at mange av systemene kun har intern redundans, og ikke utstyrsredundans på forskjellig lokasjon. I tillegg kan man regne med en SFF på 60 % - 90 %, ut fra at en stor del utstyret i GSM-R nettet er under kontinuerlig overvåkning. Dette gir i følge Tabell 2-8 et SIL 1 krav for GSM-R nettet. Hvis vi ser på REC som en funksjon som aktiveres relativt sjelden, og bare ved behov ser man av Tabell 2-7 at selv et SIL 1 nivå tillater at et oppsett av REC feiler i området fra 1/10 til 1/100 gang. Bare dette burde motivere JBV til å høyne påliteligheten for GSM-R nettet opp til et SIL 1 nivå eller høyere.

3. Pålitelighetsanalyse av GSM-R

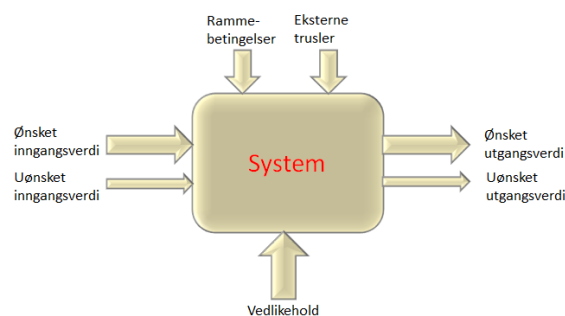
Store deler av GSM-R nettet er bygd opp av komponenter som det kan være vanskelig å beregne noen form for aldring på. Elektriske komponenter følger en eksponensialfordeling hvor en brukt enhet teoretisk sett er like god som ny enhet under de samme gitte forhold. Når en komponent svikter elektrisk, er normalt denne feilutviklingen så hurtig at den ikke er mulig å avdekke ved forebyggende vedlikehold.

3.1. Metoder for pålitelighetsanalyse

Ved analyse av den type systemer som denne oppgaven dekker kan flere metoder for pålitelighetsanalyse benyttes. Slik som feiltreanalyse, pålitelighets blokkdiagram og FMECA. Hvilke metode man velger, eller kombinasjon av flere, er avhengig av systemets oppbygging, relasjoner og hva som er hovedfokuset til analysen.

3.1.1. Systemer

Et system kan også beskrives som en prosess med en definert inngangsverdi og en definert utgangsverdi. Denne prosessen påvirkes av forskjellige interne og eksterne faktorer, som vist i figuren under.



Figur 3-1 Teknisk system med grensesnitt (Rausand, et al., 2004)

Påliteligheten til systemet vil være avhengig av grensesnittene til omgivelsene for systemet. Ved analyse av påliteligheten til systemet avgrenses denne analysen til å gjelde selve systemet og grensesnittene til det. Avgjørende for funksjonen til systemet er hvilke eksterne faktorer det blir utsatt for. Rammebetingelser er faktorer som påvirker systemets operasjon gjennom begrensinger innenfor akseptert risiko og miljøpåvirkning. Eksterne trusler er faktorer som kan påvirke systemet på en negativ måte, og kan komme fra f.eks. oversvømmelser, strømbrudd, sabotasje, virus angrep osv. Vedlikehold utgjør en viktig del av rammebetingelsen for funksjonaliteten til systemet, men vedlikehold kan også være en trussel hvis det utføres på en ikke egnet måte. Ønsket inngangsverdi er de råvarer som systemet benytter til å utføre sin tiltenkte funksjon. Uønsket inngangsverdi er faktorer som kan føre til uønskede forhold i systemet.

Eksempelvis fremmedlegemer i en veskestrøm til en pumpe. Ønsket utgangsverdi er et resultat av den påkrevde funksjon til systemet. Uønskede utgangsverdier er elementer som ikke er ønsket fra prosessen som f.eks. forurensning eller faktorer som gir negativ påvirkninger på mennesket.

En analyse av et system kan utføres på to måter, enten med strukturelt fokus eller med funksjonelt fokus. Ved et strukturelt fokus er man opptatt av den fysiske strukturen til systemet, inkludert undersystemer. Ved funksjonell fokus er man opptatt av de forskjellige funksjonene til systemet og hvordan disse funksjonene oppnås.

3.1.2. Funksjonsanalyse av systemer og FMECA

For å skaffe seg en oversikt over mulige feil er det viktig at man kjenner til funksjonaliteten til systemet som helhet, og til de enkelte delsystemene. Analysen gjennomføres med den hensikt å skaffe seg en oversikt over følgende (Rausand, et al., 2004):

- Alle funksjonene til systemet.
- Funksjoner som er påkrevd ved de enkelte modus for systemet.
- Hvordan systemet og de enkelte funksjonene til systemet er realisert.
- Relasjoner mellom de enkelte funksjonene i systemet.
- Grensesnitt mot andre systemer eller omgivelser.

GSM-R er et komplekst system som består av en rekke delsystemer hvor feil på enkelt komponenter kan gi alvorlige feil, hvis det ikke er iverksatt tiltak for å motvirke feilen. Failure mode, effects og criticality analysis (FMECA) er derfor godt egnet til analyse av komplekse systemer. Denne analyseformen gir mulighet til å studere feilmodier separat uten eventuelle påvirkning fra andre feil i systemet. En svakhet med FMECA metoden er at den passer dårlig til analyser av systemer med en høy grad av redundans, og analysen tar i liten grad for seg muligheten for fellesfeil. GSM-R nettet er i stor grad basert på systemer med innebygget redundans, og redundans som oppstår gjennom kombinasjon av enheter. FMECA metoden vil derfor ikke bli benyttet som analyseverktøy i denne oppgaven. Derimot er noe av grunnlagsdataene, som benyttes for et av delsystemene hentet fra en FMECA analyse (Nokia Siemens Networks, 2009) som er gjennomført av NSN.

3.1.3. Pålitelighetsblokkdiagram

Den enkleste måten å analysere komplekse systemer på, er å benytte blokkdiagram. Man har mulighet til å starte på et overordnet nivå for deretter å øke oppløsningen på de elementene man ønsker å analysere nærmere. Et blokkdiagram viser den logiske funksjon som enheten må oppfylle for å ivareta systemets funksjonalitet. Hvis systemet har mer enn en funksjon må dette analyseres separat, noe som kan gjøre

analyse via blokkdiagram relativt omfattende. Pålitelighetsblokkdiagram er best egnet for systemer med ikke reparerbare komponenter, og hvor rekkefølgen på feil ikke har noen betydning. I analyser av systemer hvor enheter blir reparert, og rekkefølgen på feil har betydning er Markovanalyse mer egnet. Ved en strukturell analyse er det tilstrekkelig å begrense seg til to moduser, normal funksjon eller feil. Et system er antatt å bestå av n komponenter som alle vil kunne inneha en av disse to modusene. Dersom vi kjenner strukturfunksjonen ($\Phi(x)$) til systemet og status til komponenten, kan vi matematisk avgjøre om systemet fungerer eller ikke, ved å sette verdier inn i uttrykket. I tillegg kan vi også beregne systempåliteligheten

$$p_S = h(p) = \Pr(\Phi(x) = 1) \text{ (Rausand, et al., 2004)}$$

ved å sette inn komponentpåliteligheten inn i uttrykket for strukturfunksjonen.

I denne oppgaven vil pålitelighetsblokkdiagram bli benyttet for beregning av Q_0 for transmisjonssystemet, de resterende delsystemene blir beregnet ved hjelp av feiltre.

3.1.4. Feiltreanalyser

Feiltre er et diagram bygget opp ved hjelp av logiske porter som beskriver relasjonene mellom potensielle kritiske feilårsaker og topphendelse. Fordelene med denne analysemetoden er at den gir et klart bilde av hvilke kombinasjoner av hendelser som kan føre til topphendelsen, samtidig som analysen er relativt enkel å gjennomføre. Ulempen er at analysen bare gir en virker/virker ikke status av feilkombinasjoner, på samme måte som et pålitelighetsblokkdiagram. Analysen tar ikke hensyn til systemer med komponenter som påvirkes av aldring. Det er også mulig å modellere inn effekten av fellesfeil i feiltreet. Sluttproduktet fra en feiltreanalyse er en liste med mulige kombinasjoner av basishendelser som gir topphendelsen, dette omtales normalt som de minimale kuttmengdene. En minimal kuttmengde er det minste utvalg av basishendelser som må inntreffe samtidig for at topphendelsen skal inntreffe. Ut fra disse kan man beregne sannsynligheten for at topphendelsen skal inntreffe.

3.1.5. Markovanalyse

De metodene for analyse som er beskrevet tidligere i kapitlet forutsetter at komponentene er i en av to kjente tilstander. I Markovanalyser tillater man at systemet kan ha flere forskjellige moduser som omfatter faser fra full funksjonalitet til svikt. Markovanalysen benyttes primært for å bestemme karakteristikken for pålitelighet til systemet, og passer best til små systemer med en kompleks strategi for vedlikehold eller operasjon. Modellen kan også benyttes på større systemer, men kan da resultere i meget omfattende likninger som skal løses. Primært søker man da å bryte systemet ned i mindre delsystemer for videre analyse. Ved Markovanalysen er man spesielt interessert i å estimere den gjennomsnittlige tiden system

befinner seg i hver tilstand, med henblikk på en senere analyse av driftskostnader og sannsynlighet for feil. Man ønsker også å se på hvor ofte systemet befinner seg i de enkelte tilstandene for å kunne beregne størrelsen på lager av reservedeler og tilgang på vedlikeholds personell. I tillegg ønsker man å finne sannsynligheten for at systemet kommer i en bestemt tilstand. I dette tilfellet er man spesielt interessert i de tilstandene som er kritisk for systemet.

En vanlig fremgangsmåte i Markovanalyse er følgende: (Vatn, 2007)

- Tegne en skisse over systemet for letter å se sammenhenger og funksjonalitet.
- Definere de enkelte tilstandene til systemet.
- Grupper sammen tilstander som er samsvarende for å redusere dimensjon på matrisen.
- Sett opp Markovdiagrammet med overgangsratene.
- Gjennomføre en kvantitativ analyse av systemet.
- Sammenfatting av resultatet og presentasjon av dette.

I denne oppgaven vil Markovanalyse bli benyttet på analyse av strømforsyningen til en BTS. Denne strømforsyningen har en foreskrevet kapasitet på 8 timer, men vil på grunn av aldri få redusert kapasitet over tid.

3.2. Pålitelighetsdata

For å kunne si noe om påliteligheten til GSM-R systemet trenger man tilgang til data som sier noe om hvor ofte en komponent eller et delsystem svikter. Normalt finner man slike data i en generisk pålitelighetsdatabase hvor flere aktører bidrar med erfaringsdata, slik at man oppnår et tilstrekkelig stort utvalg til at dataene blir pålitelig. Et eksempel på dette er et samarbeid mellom flere oljeselskaper som har til hensikt å samle inn og dele på pålitelighetsdata. Informasjon samles i felles database OREDA (Offshore REliability DAta), og gis senere ut som håndbøker. Innenfor gruppen av land som har implementert GSM-R finnes det ingen slik felles database. Det finnes heller ingen konkrete planer for å opprette en slik. Dette ut fra forskjellige behov og prioriteringer i de enkelte landene.

Innenfor driften av GSM-R har man i liten grad valgt å utnytte den muligheten som ligger i at de selv kan registrere denne type data. Det er i dag to systemer i JBV som kan gi denne type informasjon på lang sikt, hvis det legges til rette for dette.

Det ene systemet er Banedata som bygger på IBM Maximo. Ved oppstart av GSM-R i 2004 var det lange diskusjoner om hvilket system som skulle benyttes for å registrere feildata, og man valgt til slutt ikke å benytte Banedata til dette. Dette ut fra flere tungtveiende grunner. Primært ønsket man en database som understøtter overvåkingen med konfigurasjonsdata og relasjoner, slik at man raskest mulig kan si noe om effekten av en feil som oppstår. Banedata har på den måten som den benyttes i JBV ikke mulighet til å

bygge opp dette tjenestetreet automatisk. Den andre tungveiene grunnen er at overvåkningsystemene til GSM-R og Banedata befinner seg i to separate datanett som det ikke er mulig å utveksle automatisk informasjon mellom. Det har dermed ikke vært lagt ned et stort arbeid fra GSM-R sin side i Banedata, bortsett fra at man har sørget for at det har blitt gjennomført en analyse for pålitelighetsbasert vedlikehold (RCM) av GSM-R. De objektene fra RCM analysen som er identifisert som objekter som det skal utføres forebyggende vedlikehold på, er registrert i Banedata.

Den andre muligheten man har for registrering av pålitelighetsdata er Configuration Management Database (CMDB), som benyttes sammen med systemene for overvåkning av GSM-R. I utgangspunktet var CMDB tenkt som en database som skulle holde oversikt over alle utbyttbare komponenter i GSM-R nettet. Denne kontrollen skulle gjennomføres gjennom registrering av serienumrene på enhetene ved installasjon, og oppdatering ved senere bytte av aktuell enhet. Allerede tidlig etter oppstart ble denne intensjon forlatt på grunn av ressursmangel til det videre arbeidet med strukturen i CMDB. Ved overgangen fra HP Service Desk til HP Service Manager skiftet man samtidig verktøy fra CMDB til UCMDDB. Forskjellen mellom disse to er at UCMDDB er en relasjonsdatabase som holder oversikt over relasjonene mellom de enkelte databasene som til sammen utgjør CMDB. Hovedfunksjonen til overvåkingen ved OPM, er raskest mulig å avgjøre om de enkelte tjenestene innenfor GSM-R er tilgjengelig eller ikke. Arbeidet med UCMDDB har dermed vært konsentrert om oppbyggingen av relasjonene mellom de enkelte komponentene, og hvordan de til sammen danner tjenester. Det har ikke vært fokus på å fremskaffe et grunnlag for pålitelighetsdata. På tross av dette rapporterer man fortløpende tilgjengeligheten til GSM-R. Dette gjøres ut fra en kalkulasjon av hvor stort del av den totale banestrekning den enkelte BTS dekker. Denne dekningen er fremkommet ved måling av den enkelte BTS dekningsområde. Ved utfall av en eller flere BTS-er kan man dermed kalkulere hvor stor del av nettet som er uten GSM-R dekning. Denne rapporten sier noen om tilgjengeligheten på GSM-R tjeneste, og ikke noe om teknisk oppetid. Den tekniske oppetiden vil være lavere da det er mange utfall som ikke fører til tap av GSM-R tjenesten som følge av systemets redundans.

Innenfor GSM-R er man dermed avhengig av å innhente pålitelighetsdata fra leverandørene av utstyret. Pålitelighetsdataene som er levert til JBV fra NSN i forbindelse med leveransen av GSM-R er basert på estimerte verdier for påliteligheten til utstyret. NSN er en stor leverandør av slik type utstyr på verdensbasis, og innehar mange supportavtaler som innebærer hardware support. Det burde dermed være mulig å levere erfaringsdata til bruk ved pålitelighetsanalyser. I forbindelsen med kontraktsforhandlingen med NSN om nytt geografisk redundant kjernenett for GSM-R ble det stil et krav om at leverandøren skulle legge frem erfaring basert pålitelighetsdata. Fortsatt er RAMS analysen (Nokia Siemens Networks, 2012) basert på beregnet MTTF. NSN påstår at de har problemer med å fremskaffe disse erfaringsdataene da alle operatører har realisert sine nett på forskjellige måter, og data vil dermed ikke være direkte overførbart til andre nett. Det er ikke dermed sagt at grunnlagsdataene fra NSN er dårlig,

men det hadde vært av interesse å sammenligne disse med erfarte data. Dette for å se om det er en vesentlig forskjell mellom dem.

3.3. Betydningen software har for påliteligheten til GSM-R systemet

Påliteligheten til GSM-R system er basert på utstyrets fysiske/elektroniske pålitelighet, og påliteligheten til softwaren i systemet. Den menneskelige påvirkning på systemets pålitelighet er minimal når man ser det fra et teknisk ståsted. I denne analysen velger jeg å se bort fra redusert tilgjengelighet som følge av feil bruk av systemet eller feil konfigurasjon. Derimot kan feil som oppstår i forbindelse med vedlikehold medføre redusert levetid på komponenten, eller redusert tilgjengelighet på systemet. Når man skal beregne systemets tilgjengelighet, er det vanskelig å forutse stabiliteten til softwaren. Alle enheter i systemet gjennomgår jevnlig software oppgradering for å følge support kravet fra leverandøren. Normalt kan man ligge 1 eller 2 software versjoner bak hovedversjon før man må oppgradere. Hvis man har eldre software vil det ikke være mulig å få støtte til feilretting når feil oppstår på systemet. Denne kontinuerlige oppdateringen av software introduserer en mulighet for skjulte feil. Før ny software legges inn i nettelementet testes denne grundig av både leverandør og operatør. Man øver i testlab både på innlegging og tilbakerulling av softwaren, og utfører tester av funksjonalitet i nettet. Etter godkjent test legges softwaren inn på nettelementet i det operative nettet, og tester av funksjonaliteten utføres. Det vil alltid være en sannsynlighet for at det er feil i softwaren som kan påvirke funksjonaliteten til systemet, som over tid vil gi feilraten λ_{sw} . For GSM-R har det ikke vært kategorisering av denne type feil, og dermed ingen registreringer. Det er likevel flere kjente tilfeller hvor en skjult softwarefeil har ført til utilgjengelighet på GSM-R. Hvordan man skal beregne feilraten ut fra disse tilfellene kan gjøres på flere måter. En modell er å se på feilraten for hver enkel komponent, en annen er å se på delsystemet og en tredje å se på hele GSM-R samlet. JBV har ikke tilstrekkelig detaljert oversikt over antall enkeltkomponenter med software i for GSM-R nettet, til at man kan beregne feilraten pr. komponent. Derimot er det mulig å fastsette en feilrate for SW feil, ut fra antall delsystemer og dermed hele systemet.

Før man ser på de enkelte feilsituasjoner som kan regnes som softwarefeil, er det viktig å poengtere at etter første gang feilen har opptrådd i systemet og den underliggende årsaken er kjent regnes dette som en kjent feil. Feilen teller dermed ikke med i statistikken flere ganger, selv om samme feilsituasjon skulle oppstå igjen. I GSM-R har det vært fem kjente tilfeller hvor softwarefeil har ført til at systemet har mistet sin funksjonalitet.

Tabell 3-1 Oversikt over hendelser som kan kategoriseres som SW feil

Feil nr	Feilårsak	Konsekvens
1	Oppgradering av MSC med i utgangspunktet ufarlige oppdateringer, medfører at MSC omstarter.	Hele GSM-R systemet nede i 2 timer.
2	Feilkonfigurasjon i rutingregler for datanettet fører til vitale data linker går ned.	Intelligent Node ute av drift i 2 timer.
3	Softwarefeil i BSC medfører at samband til BTS ikke benytter redundans ved feil i transmisjon.	Deler av radionettet ute av drift i 2 timer.
4	Software feil på samtaleopptaker (VR) hindrer den i å ta opp samtaler	Lengre periode uten opptak av samtaler
5	Software feil på Togleddertelefonisystemet hindre systemet i å gjør en omlegging til backupserver	Kortere periode uten fungerende togladdertelefoni

For å beregne feilraten tar jeg utgangspunktet at systemet ble satt i drift 1.6.2004 og frem til 1.12.12.

Regner med følgende delsystemer som kritisk for funksjonaliteten; Radio, Radiolinje, Transmisjon, BSC, TRAU, HLR, MSC, IN, VR, UPS (sentralt) og Togleddertelefonisystem.

$$\hat{\lambda}_{sw} = \frac{\text{antall feil}}{\text{antall systemer} * \text{antall år i drift} * 8760} = \frac{5}{11 * 8,5 * 8760} = 6,1 * 10^{-6} h^{-1}$$

Dette viser at feil i softwaren er en faktor som må regnes med når man til slutt skal beregne systemets totale tilgjengelighet.

Hvorfor har GSM-R nettet så mange utfordringer med softwaren på systemene? GSM-R er et system som kontinuerlig er i endring med utvidelser og tillegg av nye funksjoner. Det er normalt å oppgradere hvert nettelement en til to ganger i året med ny software. Dette for å utbedre kjente feil eller for å tilføre nye funksjonalitet. Det er klart at denne høye raten av endringer vil bringe med seg en usikkerhet angående stabiliteten til softwaren. Alle endringer av software testes nøye både av leverandør, og av JBV før innlegging i GSM-R nettet. Men det er feilsituasjoner som det ikke er mulig å fremprovosere i testmiljøet. Dette kan komme av at man i testmiljøet ikke har den samme oppbyggingen som i det operative nettet. Det kan også være kombinasjoner av hendelser i nettet som skaper situasjoner som softwaren ikke er forberedt på å løse og dermed feiler.

3.4. Delsystemanalyse

Delsystemanalysen vil bli gjennomført ved at man gjør en nærmere analyse av et spesifikt scenario innenfor GSM-R. Analysen er delt opp i tre deler hvor systemet for radio og transmisjon vil bli analysert ved hjelp av både blokkdiagram og feiltre. Dette for å belyse forskjellen mellom disse to analysemetodene. Sentrale systemer og togladdertelefonisystemet vil bare bli analysert ved hjelp av feiltre. For å forbedre forståelsen

av systemet blir det presentert et overordnet blokkdiagram før feiltreanalysen gjennomføres. Til slutt vil strømforsyningen til en BTS bli nærmere analysert ved hjelp av Markovanalyse.

3.4.1. Analyse av modell for kommunikasjon mellom BTS – Togledersentral

For å begrense omfanget av denne oppgaven velger jeg å se nærmere på en av de 5 modellene for tilgjengelighet i GSM-R nettet (se vedlegg B), som er beskrevet i Systemkontrakten Exhibit E (Jernbaneverket, 2003). Modellen for kommunikasjon mellom BTS – Togledersentral er den som oftest benyttes ved kommunikasjon i GSM-R nettet og som dekker alle delsystemene.

I min analyse har jeg tatt med faktorer som ikke er beskrevet som en forutsetning i systemkontrakten. Disse endringene har jeg foretatt for at analysen mer skal gjenspeile de faktiske forhold som GSM-R er driftet under. Disse endringene er som følger:

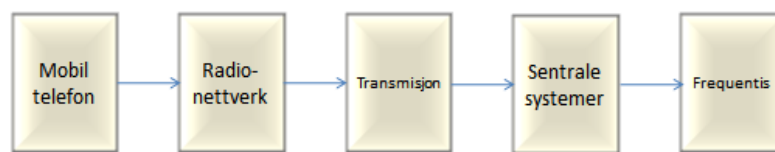
- Kommunikasjon til en BTS er realisert gjennom 10 RL hopp og ikke 5 som beskrevet i kontrakten.
- Bortfall av strømforsyning til BTS.
- Bortfall av strømforsyning på de sentrale systemer.
- Bortfall av strømforsyning på togledertelefonisystemet.
- Redundans på enkelte av delsystemene.
- Effekten som SW feil har på tilgjengeligheten i systemet.

3.4.2. Blokkdiagram BTS – Togledersentral

Systemet for kommunikasjon mellom mobilabonnet (MS) og togleder kan settes opp i et blokkdiagram med følgende begrensninger:

- Muligheten for feil på MS tas ikke med, dette fordi ansvaret for terminalen ligger hos den enkelte bruker og ikke JBV. Dette påvirker ikke systemets pålitelighet, men vil ha en innvirkning på den brukeropplevde tilgjengeligheten.
- Muligheten for dårlig dekning grunnet vegetasjon eller andre forhold tas ikke med. Dette ut fra at dette er forhold som endrer seg konstant. Dette påvirker ikke systemets pålitelighet, men vil ha en innvirkning på den brukeropplevde tilgjengeligheten.
- BSC og TRAU er plassert i samme lokasjon som MSC/HRL, dette tilsvarer også designet som JBV er i ferd med å innføre i GSM-R nettet. Opprinnelig var det 6 + 0 desentraliserte BSC-er. I fremtiden vil det være 1+1 BSC-er i en sentralisert konfigurasjon.
- Beregningen tar hensyn til pålitelighetsdata for EBSC og ikke CBSC som systemkontrakten tar utgangspunkt i.
- Internkabling antas å ha en tilgjengelighet på 100 %, og tas dermed ikke med i blokkdiagrammet.

- Tilgjengeligheten på Radiolinje (RL) utstyr er definert i kontrakten, og det er dermed ikke oppgitt data fra leverandør på dette. Det er heller ikke tatt med sannsynligheten for tap av strømforsyning på disse da det ikke er noen tilgjengelig informasjon om hvordan tilgjengeligheten på RL er beregnet i kontrakten.
- Modellen beskriver at dekning i tunnel også skal tas med i beregningen. Dette er utelatt på grunn av systemets kompleksitet.
- Toglederterminalsystemet omtales heretter som Fequentis, som samsvarer med produsenten av utstyret.



Figur 3-2 Blokkdiagram for kommunikasjon mellom MS og Toglederterminal

Systemet er delt opp i 5 deler hvor de fire siste delene danner grunnlag for den videre analysen. Systemet er totalt sett for kompleks til at det er mulig å behandle det i en analyse, og vil derfor bli behandlet som tre delsystemer som til sammen vil gi den totale tilgjengeligheten for systemet.

Analysen av dette delsystemet vil bli gjennomført, både ved hjelp av pålitelighetsblokkdiagram og ved hjelp av feiltree. Dette for å belyse forskjellene som ligger i bruken av disse to metodene.

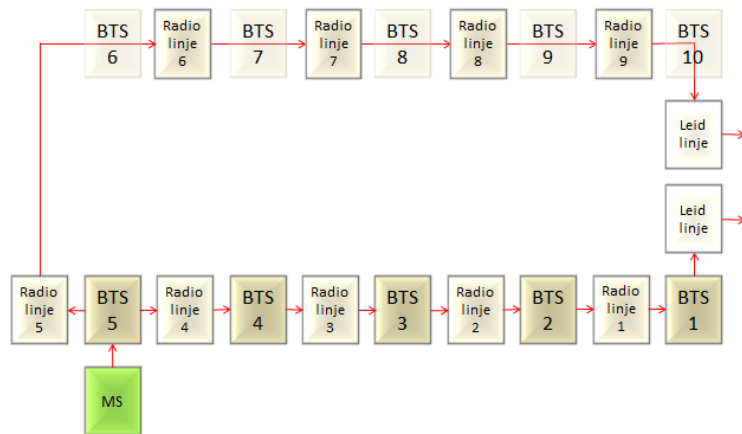
3.4.3. Blokkdiagram radio-nettverk og transmisjon

Systemene for radionettverk og transmisjon henger nøye sammen og vil bli behandlet som et system i den videre analysen. Følgende antakelser og begrensinger ligger til grunn for analysen:

- Designet som er i bruk i JBV avviker fra designet i kontrakten. I kontrakten er det beskrevet 5 BTS-er i en transmisjons-ring. I designet som JBV benytter er det 2*5 BTS-er på en transmisjons-ring. 5 på hver 2Mb, noe som betyr at hvert transmisjonspunkt bærer 2 * 2Mb. En som skal benyttes på transmisjonspunktet og en som er gjennomkoblet. I den videre analysen benyttes det designet som er i nettverket i dag, og ikke det som er beskrevet i kontrakten.
- Designet for transmisjon som er beskrevet i blokkdiagrammet med kombinasjon av Radiolinje og leide linjer er det mest vanlige i GSM-R nettet. Det finnes andre versjoner av dette transmisjonsdesignet, men disse er ikke vurdert.

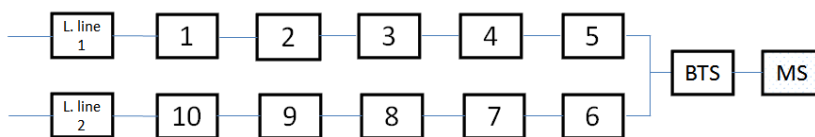
- Det forutsettes at en BTS som feiler, ikke påvirker transmisjon til de nærliggende transmisjonsnodene.
- Det forutsettes at alle lokasjoner har batterikapasitet tilsvarende 8h.
- Mobilabonntenen (MS) inngår ikke i denne analysen, den er kun vist for å øke forståelsen av figuren.

En oversikt over en vanlig transmisjonsløsning i GSM-R nettet til JBV fremstilles da på følgende måte.

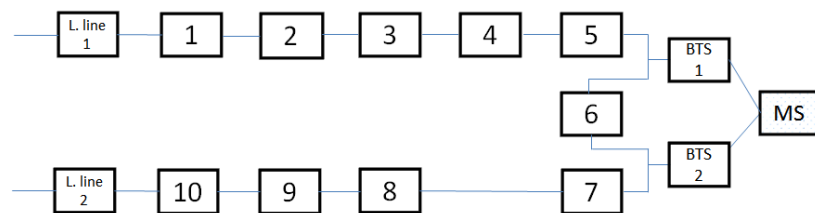


Figur 3-3 Oversikt over transmisjon fra BTS 5 til BSC

I denne analysen beregnes tilgjengeligheten for MS når den er under dekning av en eller to BTS-er. Blokkdiagrammene under viser begge scenarioene.



Figur 3-4 Blokkdiagram for transmisjon når MS er under dekning av 1 BTS.



Figur 3-5 Blokkdiagram for transmisjon når MS er under dekning av 2 BTS-er

3.4.4. Analyse av blokkdiagram for kommunikasjon fra MS via en BTS til BSC

For å forenkle beregningen betegnes de to transmisjonsveien L.Line 1 og radiolinje 1 -5 som X1, og L.Line 2 og radiolinje 2 – 6 som X2. Det kan da sette opp følgende uttrykk.

$$\Phi(x) = (1 - (1 - X_1)(1 - X_2)) * X_{BTS}$$

$$\Phi(x) = (1 - (1 - X_2 - X_1 + X_1X_2)) * X_{BTS}$$

$$\Phi(x) = (X_2 + X_1 - X_1X_2) * X_{BTS}$$

Systempåliteligheten er dag gitt ved:

$$p_S = h(p) = \Pr(\Phi(x) = 1) \text{ (Rausand, et al., 2004)}$$

$$p_S = (p_2 + p_1 - p_1p_2) * p_{BTS}$$

Hvor

$$p_1 = p_{\text{Leid linje 1}} * p_{\text{Radiolinje 1}} * p_{\text{Radiolinje 2}} * p_{\text{Radiolinje 3}} * p_{\text{Radiolinje 4}} * p_{\text{Radiolinje 5}} = 0,993508395$$

$$p_2 = p_{\text{Leid linje 2}} * p_{\text{Radiolinje 6}} * p_{\text{Radiolinje 7}} * p_{\text{Radiolinje 8}} * p_{\text{Radiolinje 9}} * p_{\text{Radiolinje 10}} = 0,993508395$$

Innsatt i likningen over gir dette:

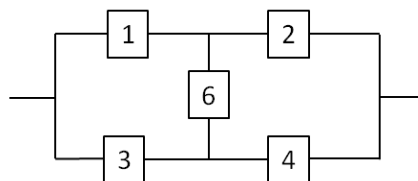
$$p_S = 0,99992$$

Som gir $Q_0 = 8,2 * 10^{-5}$

På grunn av at enhetene i systemet repareres fortløpende med en forventet reparasjonstid på 8 timer, vil beregningen av MTTF måtte gjøres via feiltreanalyse og beregninger i Cara fault tree (Exprosoft).

3.4.5. Analyse av blokkdiagram for kommunikasjon fra MS via en BTS til BSC

Blokkdiagrammet i Figur 3-5 er noe mer komplekst å analysere enn når MS er under dekningen av bare en BTS. Hver enkelt BTS kan få transmisjon to veier, enten gjennom kjeden L-linje 1 og radiolinje 1 til 5 eller via L-linje 2 og radiolinje 10 til 7. Alt etter hvilken av veiene som blir brukt, vil alltid en av BTS-ene være avhengig av komponent 6. Figur 3-5 kan dermed forenkles ved å benevne transmisjonsveien L-linje 1 og 1 -5 som X1, L-linje 2 og 10 – 7 som X3, 6 som X6, BTS 1 som X2 og BTS 2 som X4. Systemet kan da fremstilles på følgende måte.



Figur 3-6 Blokkstruktur av systemet med Radiolinje nummer 6

For å finne strukturfunksjonen må man benytte regelen for pivotal dekomposisjon som fastslår følgende for et blokkdiagram (Rausand, et al., 2004):

$$\Phi(x) = x_i \Phi(x | x_i = 1) + (1 - x_i) \Phi(x | x_i = 0) \quad (\text{Rausand, et al., 2004})$$

Analysert ut fra komponent 6, og forutsatt at denne alltid fungerer får man følgende:

$$\Phi(x | x_6 = 1) = [1 - (1 - x_1)(1 - x_3)] * [1 - (1 - x_2)(1 - x_4)]$$

Forutsatt at komponent 6 aldri fungerer får man følgende:

$$\Phi(x | x_6 = 0) = [1 - (1 - x_1 x_2)(1 - x_3 x_4)]$$

Total vil dette gi:

$$\Phi(x) = x_6 \Phi(x | x_6 = 1) + (1 - x_6) \Phi(x | x_6 = 0)$$

$$\Phi(x) = x_6 [1 - (1 - x_1)(1 - x_3)] * [1 - (1 - x_2)(1 - x_4)] + (1 - x_6) * [1 - (1 - x_1 x_2)(1 - x_3 x_4)]$$

Som gir følgende strukturfunksjon

$$\Phi(x) = x_2 x_3 x_6 - x_2 x_3 x_4 x_6 + x_1 x_4 x_6 - x_1 x_2 x_4 x_6 - x_1 x_3 x_4 x_6 - x_1 x_2 x_3 x_6 + 2x_1 x_2 x_3 x_4 x_6 + x_3 x_4 + x_1 x_2 - x_1 x_2 x_3 x_4$$

Systempåliteligheten er dag gitt ved:

$$p_S = h(p) = \Pr(\Phi(x) = 1) \quad (\text{Rausand, et al., 2004})$$

$$p_S = p_2 p x_3 p_6 - p_2 p_3 p_4 p_6 + p_1 p_4 p_6 - p_1 p_2 p_4 p_6 - p_1 p_3 p_4 p_6 - p_1 p_2 p_3 p_6 + 2p_1 p_2 p_3 p_4 p_6 + p_3 p_4 + p_1 p_2 - p_1 p_2 p_3 p_4$$

Hvor:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{\text{Leid linje 1}} * p_{\text{Radiolinje 1}} * p_{\text{Radiolinje 2}} * p_{\text{Radiolinje 3}} * p_{\text{Radiolinje 4}} * p_{\text{Radiolinje 5}} &= 0,993508395 \\ p_2 &= p_{\text{BTS}} &= 0,99996 \\ p_3 &= p_{\text{Leid linje 2}} * p_{\text{Radiolinje 7}} * p_{\text{Radiolinje 8}} * p_{\text{Radiolinje 9}} * p_{\text{Radiolinje 10}} &= 0,993806537 \\ p_4 &= p_{\text{BTS}} &= 0,99996 \\ p_6 &= p_{\text{Radiolinje 6}} &= 0,9997 \end{aligned}$$

Innsatt i likningen over gir dette

$$p_S = 0,99996$$

Som gir $Q_0 = 3,8 \cdot 10^{-5}$

På grunn av at enhetene i systemet repareres fortløpende med en forventet reparasjonstid på 8 timer, vil beregningen av MTTF måtte gjøres via feiltre og beregninger i Cara fault tree (Exprosoft).

3.4.6. Feiltre-analyse for kommunikasjon fra en BTS til BSC.

For å sammenligne beregningen fra pålitelighetsblokkdiagrammet opp mot resultatene fra en feiltreanalyse, utføres det en feiltreanalyse av tilgjengeligheten for MS med topphendelsen "Tap av dekning". Det benyttes pålitelighetsdata som oppgitt i Vedlegg A. Komplette feiltre finnes i Vedlegg C. Ut fra beregningen i Cara fault tree (Exprosoft) finner man følgende verdier for påliteligheten til systemet, gitt betingelser som beskrevet i tabellen under.

Tabell 3-2 Resultat av analyse for transmisjon

Analyse nummer	Betingelser	Qo(t)	MTBF	λ (=1/MTBF)	Pålitelighet (=1- Qo(t))
E1	MS under dekning av enkel BTS	$3,7 \cdot 10^{-5}$	17925	$5,6 \cdot 10^{-5}$	0,999963
E2	MS under dekning av to BTS-er	$1,8 \cdot 10^{-6}$	18699	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,999998

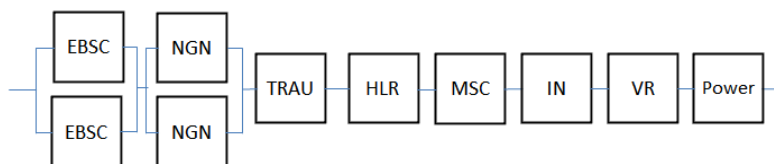
3.4.7. Blokkdiagram sentrale systemer

I denne delen av analysen gjennomgås de deler av systemet som inngår i det sentrale systemet. EBSC og TRAU inngår strengt tatt ikke i det som er definert som sentrale systemer, men tas med her da de fysisk er plassert på samme sted som de resterende delene av sentrale systemer.

Følgende antakelser og begrensninger ligger til grunn for analysen:

- De sentrale systemer er svært komplekse og består av en rekke delsystemer. I denne analysen er det kun tatt med de elementene som er påkrevet for at kommunikasjon mellom BTS og Togleder skal fungere. Tilgjengeligheten på VR er ikke kritisk for denne kommunikasjonen, men er et myndighetskrav (Samferdseldirektoratet, 2011) om at skal fungere for at det skal være lov å fremføre tog i Norge.
- EBSC har fysisk redundans og det forutsettes at omkoblingen mellom aktiv og passiv EBSC alltid er vellykket.
- Påliteligheten til transmisjonsløsningen (NGN) som gjør det mulig å skifte mellom aktiv og passiv EBSC settes til 99,95%.

- TRAU, HLR og MSC har innebygget HW redundans, men ikke fysisk redundans. I denne analysen benyttes den totale tilgjengeligheten for hvert enkelt av disse elementene.
- IN, VR og Power har fysisk redundans, men de oppgitte feilratene er for systemene som helhet.
- Intern kabling mellom sentrale systemer antas å ha en tilgjengelighet på 100 % og tas derfor ikke med i analysen.
- Det forutsettes at TRAU og BSC står plassert sammen med resten av kjerneutstyret.



Figur 3-7 Blokkdiagram sentrale systemer med redundant EBSC og NGN

3.4.8. Feiltre-analyse sentrale GSM-R systemer

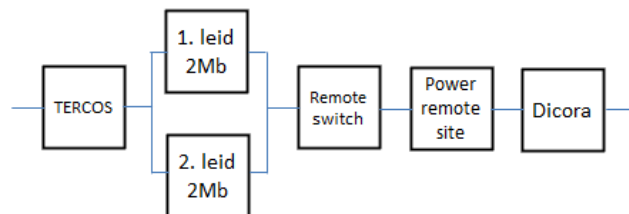
For å beregne tilgjengeligheten på sentrale systemer utføres det en feiltreanalyse med topphendelsen “Tap av sentrale systemer”. Det benyttes pålitelighetsdata som oppgitt i Vedlegg A. Komplette feiltre finnes i Vedlegg D. Ut i fra beregningen i Cara fault tree (Exprosoft), finner man følgende verdier for påliteligheten til systemet, gitt betingelser som beskrevet i tabellen under.

Tabell 3-3 Resultat av analyse for sentrale systemer

Analyse nummer	Betingelser	$Q_0(t)$	MTBF	λ (=1/MTBF)	Pålitelighet (=1- $Q_0(t)$)
S1	System med enkel eBSC og ikke NGN	$1,4 \cdot 10^{-5}$	17624	$7,7 \cdot 10^{-5}$	0,999986
S2	System med eBSC i hot standby og NGN	$1,4 \cdot 10^{-5}$	17644	$5,7 \cdot 10^{-5}$	0,999987
S3	System med enkel eBSC og ikke NGN, men med SW feil	$2,6 \cdot 10^{-5}$	16671	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,999974
S4	System med eBSC i hot standby og NGN, med SW feil	$2,6 \cdot 10^{-5}$	16691	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,999974

3.4.9. Blokkdiagram for Togledertelefonisystem

Systemet for kommunikasjon til og fra togleder består både av sentrale elementer og elementer som er plassert ute på hver enkelt togledersentral med toglederposisjoner. I denne analysen betrakter jeg dette som et system. Tercos er den sentralen delen av systemet, remote switch og Dicora er de eksterne delene av systemet.

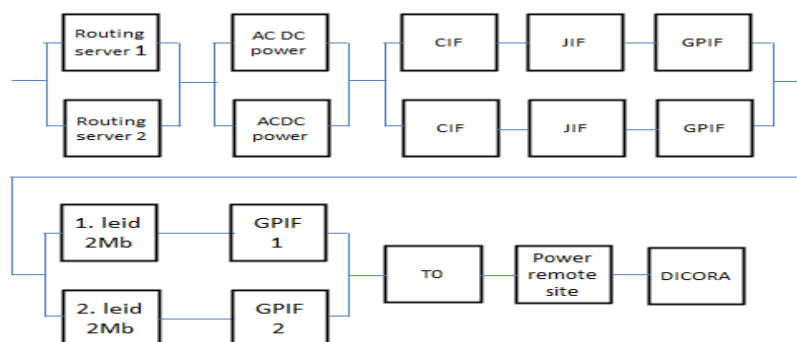


Figur 3-8 Blokkdiagram for Togleder terminal system

Følgende antakelser og begrensinger ligger til grunn for analysen:

- Tilgjengeligheten på strøm på sentrale deler av Togledertelefonisystemet tas ikke med her, da dette er dekket under analysen av sentrale systemer.
- Tilgjengeligheten på strøm på toglederterminalen er bare tatt med en gang selv om ekstern switch og selve terminalen er plassert i forskjellige rom. Dette fordi det antas at disse har samme eksterne tilførsel.
- Det er forutsatt at de eksterne delene av løsningen er tilkoplek UPS. Som en forenkling har denne UPS samme data som UPS til en BTS.

For å kunne benytte de oppgitte data for feilrate må systemet analyseres mer detaljert. Det detaljerte blokkdiagrammet blir da som følger.



Figur 3-9 Detaljert blokkdiagram for Togleder terminal systemet

3.4.10. Feiltre-analyse Togledertelefonisystemet

For å beregne tilgjengeligheten på togladertelefonisystemet utføres det en feiltre-analyse med topphendelsen “Tap av TT system”. Det benyttes pålitelighetsdata som oppgitt i Vedlegg A. Komplette feiltre finnes i Vedlegg E. I FMECA analysen som er utarbeidet for togladertelefonisystemet (Nokia Siemens Networks, 2009) av NSN, er det angitt at alle togledere har tilgang til to DICORA terminaler. Ved en feil på systemet varsles Togleder ved hjelp av et lydsignal og et blinkende varsel på terminalen. En automatisk viderekobling av innkommende samtaler til backup-terminalen vil automatisk tre i kraft ved feil. En overføring av toglederrollene vil automatisk finne sted etter 10 minutter. I analysen under er det laget en modell for redundant DICORA med MTTR på 10 minutter. Ut fra beregninger i Cara fault tree (Exprosoft) finner man følgende verdier for påliteligheten til systemet, gitt betingelser som beskrevet i tabellen under.

Tabell 3-4 Resultat av analyse for Togledertelefonisystemet

Analyse nummer	Betingelser	Qo(t)	MTBF	λ (=1/MTBF)	Pålitelighet (=1- Qo(t))
F1	Uten redundant Dicora hos toglader	$2,8 \cdot 10^{-4}$	13817	$7,2 \cdot 10^{-5}$	0,999720
F2	Med redundant Dicora hos toglader	$3,7 \cdot 10^{-7}$	18756	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,999999

3.4.11. Systemets totale tilgjengelighet

Ved å sammenstille dataene fra de 3 delsystemanalysene kan systemets totale tilgjengelighet beregnes ved summering av $Q_0(t)$ for de enkelte delsystemene. Resultatet for de forskjellige senarioene er beskrevet i tabellen under.

Tabell 3-5 Beregning av total $Q_0(t)$ ut fra kombinasjoner av $Q_0(t)$ til de enkelte delsystemer

Analyse nummer	Kombinasjon av analyser	Betingelser	Qo(t)	MTBF $=1/(\sum 1/MTTF)$	Pålitelighet (=1- Qo(t))
T1	E1+S1+F1	MS under dekning av en BTS, system med enkel eBSC, ikke NGN, uten redundant Dicora hos toglader.	$3,3 \cdot 10^{-4}$	5408	0,999669
T2	E1+S1+F2	MS under dekning av en BTS, system med enkel eBSC, ikke NGN, med redundant Dicora hos toglader.	$5,1 \cdot 10^{-5}$	6030	0,999949
T3	E2+S1+F1	MS under dekning av to BTS-er, system med enkel eBSC, ikke NGN, uten redundant Dicora hos toglader.	$4,7 \cdot 10^{-4}$	5477	0,999526

Analyse nummer	Kombinasjon av analyser	Betingelser	$Q_0(t)$	MTBF $=1/(\sum 1/MTTF)$	Pålitelighet $(=1- Q_0(t))$
T4	E2+S1+F2	MS under dekning av to BTS-er, system med enkel eBSC, ikke NGN, med redundant Dicora hos togleder.	$1,9 \cdot 10^{-4}$	6115	0,999806
T5	E1+S2+F1	MS under dekning av en BTS, system med eBSC i hot standby og NGN, uten redundant Dicora hos togleder.	$3,3 \cdot 10^{-4}$	5410	0,999670
T6	E1+S2+F2	MS under dekning av en BTS, system med eBSC i hot standby og NGN, med redundant Dicora hos togleder.	$5,1 \cdot 10^{-5}$	6032	0,999949
T7	E2+S2+F1	MS under dekning av to BTS-er, system med eBSC i hot standby og NGN, uten redundant Dicora hos togleder.	$4,7 \cdot 10^{-4}$	5479	0,999527
T8	E2+S2+F2	MS under dekning av to BTS-er, system med eBSC i hot standby og NGN, med redundant Dicora hos togleder.	$1,9 \cdot 10^{-4}$	6117	0,999806
T9	E1+S3+F1	MS under dekning av en BTS, system med enkel eBSC og ikke NGN, men med SW feil, uten redundant Dicora hos togleder.	$3,4 \cdot 10^{-4}$	5315	0,999657
T10	E1+S3+F2	MS under dekning av en BTS, system med enkel eBSC og ikke NGN, men med SW feil, med redundant Dicora hos togleder.	$6,3 \cdot 10^{-5}$	5914	0,999937
T11	E2+S3+F1	MS under dekning av to BTS-er, system med enkel eBSC og ikke NGN, men med SW feil, uten redundant Dicora hos togleder.	$4,9 \cdot 10^{-4}$	5381	0,999514
T12	E2+S3+F2	MS under dekning av to BTS-er, system med enkel eBSC og ikke NGN, men med SW feil, med redundant Dicora hos togleder.	$2,1 \cdot 10^{-4}$	5996	0,999794
T13	E1+S4+F1	MS under dekning av en BTS, system med eBSC i hot standby og NGN, med SW feil, uten redundant Dicora hos togleder.	$3,4 \cdot 10^{-4}$	5317	0,999657
T14	E1+S4+F2	MS under dekning av en BTS, system med eBSC i hot standby og NGN, med SW feil, med redundant Dicora hos togleder.	$2,1 \cdot 10^{-4}$	5917	0,999794
T15	E2+S4+F1	MS under dekning av to BTS-er, system med eBSC i hot standby og NGN, med SW feil, uten redundant Dicora hos togleder.	$4,9 \cdot 10^{-4}$	5383	0,999514
T16	E2+S4+F2	MS under dekning av to BTS-er, system med eBSC i hot standby og NGN, med SW feil, med redundant Dicora hos togleder.	$2,1 \cdot 10^{-4}$	5999	0,999794

3.4.12. Teknisk tilgjengelighet til en BTS

For å verifisere beregningen utført tidligere i denne oppgaven foretas det i dette avsnittet en sammenligning av beregnede verdier, og hva som er opplevd gjennom drift av GSM-R nettet. GSM-R nettet består av 503 BTS-er som er koblet opp mot 2 BSC-er. Disse 503 BTS-ene er fordelt langs hele jernbanen. For overvåkning av disse benyttes Radio Commander (RC). Hver gang RC mister kontakt med en BTS generer dette alarmen "SP247 FunctionalityLost" i RC. Man kan dermed benytte RC til å finne ut hvor mange ganger BTS-er har vært ute av drift. Nå er det bare en begrenset periode med data som finnes tilgjengelig, da data som er over ett år gamle automatisk blir slettet.

Tabell 3-6 SP247 FunctionalityLost i perioden Juni 2011 til November 2012

Måned	2011	2012
Januar		1033
Februar		2372
Mars		1391
April		953
Mai		15027
Juni	1736	4676
Juli	4800	12720
August	6428	5127
September	7802	2821
Oktober	1646	6908
November	2454	12314
Desember	2652	

Dette er veldig høye tall for utfall av funksjonalitet til BTS-er, men det som det er viktig å legge merke til er at alt planlagt arbeid også gir samme type alarm. Dette betyr at det reelle antall tekniske feil er betydelig lavere enn det som er angitt i tabellen. OPM presenterer fortløpende en rapport med oversikt over uforutsette avvik for tilgjengeligheten til tjenester som Bane Nett produserer på GSM-R. Den omfatter bare de avvikene som er varslet til togleder. Når en basestasjon går ned, vil det oppstå midlertidige dekningshull langs jernbanen. Denne distansen måles i kilometer, og varigheten for det midlertidige dekningshullet regnes i minutter. Produksjonsavviket er produktet av antall kilometer dekningshull og varigheten i minutter. I Tabell 3-7 er det en oversikt over de rapporterte tilgjengelighetstall for GSM-R i perioden 2009 til 2012.

Tabell 3-7 Rapportert tilgjengelighet for GSM-R nettet i perioden 2009 - 2012

Rapportert tilgjengelighet GSM-R				
Måned	2009	2010	2011	2012
Januar	99,97527	99,94378	99,99943	99,996
Februar	99,88424	99,99967	99,99917	99,996
Mars	99,90132	99,97524	99,99659	100,000
April	99,99339	99,99637	99,99546	100,000
Mai	99,99987	99,99592	99,99767	100,000
Juni	99,96906	99,99887	99,97250	99,999
Juli	99,98686	99,98456	99,99276	99,991
August	99,99965	99,99820	99,98438	99,959
September	99,99874	99,99949	99,99832	100,000
Oktober	99,99117	99,99966	99,99085	99,948
November	99,98656	99,99950	99,99011	99,947
Desember	99,98779	99,99615	99,99932	99,999

Det er ikke mulig og direkte korrelere dataene mellom Tabell 3-6 og Tabell 3-7 da den lave utetiden i vesentlig grad kommer av innebygget redundans i nettet. Dette betyr at en BTS kan være ute av drift uten at det sendes melding om driftsavvik. Dette på grunn av at nærliggende BTS-er gir dekning i samme området og dermed gir ikke dette utfall på tjenesten GSM-R. Hvis man sammenstiller den meldte utetiden opp mot beregning i E1, E2 og designkravet på 99,975 % finner man følgende.

Tabell 3-8 Avvik mellom rapportert og beregnet tilgjengelighet i perioden 2009 - 2012

<i>Avvik fra beregnet tilgjengelighet ved en BTS = 0,999963 (E1)</i>			
2009	2010	2011	2012
-0,023 %	-0,006 %	-0,003 %	-0,010 %
<i>Avvik fra beregnet tilgjengelighet ved redundant BTS = 0,999998 (E2)</i>			
2009	2010	2011	2012
-0,027 %	-0,009 %	-0,007 %	-0,014 %
<i>Tilgjengelighet i forhold til systemkravet på 0,999750</i>			
2009	2010	2011	2012
-0,002 %	0,016 %	0,018 %	0,011 %

Av tabellen over ser man at det leveres bedre tilgjengelighet enn designkravet på 99,975 %, men lavere enn den tekniske beregnede påliteligheten. Det er enkelte begrensinger ved den rapporterte tilgjengeligheten som det er viktig å være klar over.

Korte utfall på BTS-er blir ikke varslet topledelse og kommer dermed ikke med i rapporten, typisk er brudd kortere enn 10 minutter. Nøyaktigheten på det meldte utfallet er avhengig av at operatøren tar med alle BTS-er som har rapportert "sp247-FunctionalityLost". Ved store utfall og stressende feilretting er det en mulighet for at enkelte BTS-er ikke blir med i rapporteringen.

Området som hver BTS dekker er målt ved hjelp av en måleprobe. Dekningsmålingen er foretatt når alle BTS-er på strekningen var i drift. Det er dermed ikke målt en eksakt dekning til hver enkelt BTS når nabocellen ikke er i drift. Denne dekningen vil normalt være større enn når alle BTS-er er i drift.

Tilgjengeligheten til GSM-R nettet som rapporteres i rapporten er ikke eksakt, men rapporteringen gir en god indikasjon på status. Så lenge rapporteringen gjøres på samme måte over lengre tid gir dette mulighet til å se på trender i utvikling av kvaliteten på den leverte tjenesten.

Måling på teknisk oppetid har ingen hensikt så lenge alarmer i forbindelse med planlagt arbeid ikke blir spesielt merket i systemet. Slik systemet er bygget opp i dag, har OPM ingen mulighet til å automatisk merke alle alarmer som oppstår i forbindelse med planlagt arbeid. For en gjennomføring av dette kreves det en større endring av overvåkingssystemene, noe som anses som lite relevant i forhold til gevinsten ved endringen.

3.5. Analyse av erfaring fra drift av GSM-R nettet

Hvis man fortar en analyse på hendelser som har vært registrert i HP Service Desk siden oppstarten og frem til 9.1.2011 finner man følgende fordeling av hendelser.

Tabell 3-9 Fordeling av hendelser i perioden 2004 - 2011

Kategori	Antall	
Aksessnett	51	220V)
Annet	324	Radio network RC (BSC, Trau, BTS, Antenne)
Backup	44	794
Civil works (Hus, Mast, ENVA-alarmer)	141	Redundans
Dekning GSM-R	195	496
Dispatcher (Hipath, CS, MUX)	43	Software
HW-feil	1711	5
IP-nett/DCN (Switcher, Rutere, LAN/WAN)	13	Støttesystemer (CCBS, SAT/OTA, SPOTS, OTS, SD)
Kapasitet	115	62
Konfigurasjonsfeil	181	SW-feil
Major Incident	11	164
Other Hardware	214	Switch SC (MSC, HLR)
Overvåking	487	64
Planlagt arbeid	419	Temperatur
Power	1629	298
Power/Kjøling (UPS, Batteri, Likeretter,	256	Transmisjon Netviewer (RL, Leid linje, Fiber)
		554
		Tunnelsystemer Mikom (Repeater, Modem, Antenne, Kabel)
		481
		Værforhold
		61
		VØT (IN, SMS, VMS)
		44
		(tom)
		1
		Totalsum
		8858

Av disse 8858 hendelsene ble det opprettet totalt 4454 arbeidsordrer til feltdrift. Nå kan det være at en hendelse har mange arbeidsordrer tilknyttet. Av tabellen over ser man at det er 1885 hendelser som er

relatert til strøm, eller strøm og kjøling. Dette utgjør 21,3% av alle registrerte hendelser. Hvis man ser nærmere på kategorien Hardware finner man at 256 av disse også er relatert til hendelser med strøm som en medvirkende årsak. Det vil si at 2141 eller 24,2% av alle registrerte hendelser i perioden, har strømforsyning som en medvirkende årsak. Dette gir en god indikasjon på omfanget av problemer med strømforsyning, selv om det kan være feilregistreringer blant de 2141 hendelsene. Det kan være hendelser hvor strømforsyning er hovedårsak, men at de er kategorisert under andre verdier. Det kan også være at saker er registrert som strømproblemer, men hovedårsaken er en annen.

Hvis man ser nærmere på de 4454 arbeidsordrene som er opprettet i samme perioden finner man at 944 eller 21,2 % av disse er relatert til problemer med strømforsyning. Fordelingen av disse arbeidsordrene er vist i tabellen under.

Tabell 3-10 Fordeling av arbeidsordrer i perioden 2004 – 2011 relatert til strømforsyning.

Radetiketter	Antall av Oppdrag		
		JBV IRVD Drift Bergen	20
Bergen Oilfield services AS	1	JBV IRVD Drift Kristiansand	61
JBV	1	JBV IRVD Drift Nærbo	11
JBV BTN Bd. Teknikk Nett	2	JBV IRVD Drift Voss	68
JBV Drift Ofofbanen	1	JBV IRVD Drift Ål	38
JBV Drift Vest	1	JBV IRØD Drift Drammen	73
JBV Drift Øst	2	JBV IRØD Drift Hamar	59
JBV IRND Drift Mo i Rana	73	JBV IRØD Drift Oslo	80
JBV IRND Drift Mosjøen	73	JBV IRØD Drift Otta	3
JBV IRND Drift Narvik	14	JBV TN Trafikk Nord	1
JBV IRND Drift Nord	8	OPM Drift og Vedlikehold	1
JBV IRND Drift Oppdal	2	(tom)	147
JBV IRND Drift Trondheim	152	Totalsum	944
JBV IRV Drift Tele Kristiansand	52		

I HP Service Manager frem til 1.11.2012 finner man følgende fordeling av saker.

Tabell 3-11 Fordeling av hendelser i perioden 2011 - 2012

Kategori	Antall hendelser		
Duamco	13	IDU	27
System/Konfigurasjon	139	Hytte/Mast	21
Signalering	12	Dør/Adgang	10
Likerettermodul	228	Modem	19
Batteri	73	ODU	72
Samband	160	Strøm	124
Redundansbrudd	44	Kjøling	54
GPRS	3	Equipment	116
CU	11	Communication	50
Antennekabel	30	NULL	3017
		Totalsum	4223

Ut fra tallene fra Service Manager er det ikke mulig å utføre noe analyse, da ca. $\frac{3}{4}$ av alle hendelser ikke er kategorisert (NULL). Av de 1206 hendelsene som er kategorisert er 425 av disse relatert til problemer med strøm, likeretter og batteri. Problemer med strømforsyning utgjør dermed 35 % av sakene som er kategorisert.

3.5. Analyse av den strukturelle betydning av komponenter

En av hensiktene med å utføre en pålitelighetsstudie er å identifisere svakheter i systemet, og fastslå sannsynligheten for at systemet svikter. I denne oppgaven har dette primært blitt løst gjennom bruken av feiltreanalyser. Man kan også gjennom en utvidet analyse kartlegge hvilke komponenter som er viktigst for påliteligheten. Eller man kan analysere hvilke av komponenter som har størst forbedringspotensial. Metoder som brukes til dette er Birnbaums mål, forbedringspotensial og mål for kritisk viktighet. Man kan ut fra disse analysene se hvor det lønner seg å gjøre forbedringer for å oppnå en bedre pålitelighet for systemet. Birnbaums mål gir et forholdstall for den enkelte komponents viktighet i forhold systemets pålitelighet. Forbedringspotensialet forteller oss hvor mye påliteligheten til systemet øker, hvis komponenten erstattes med en perfekt komponent. Mål for kritisk viktighet er et mål for sannsynligheten for at komponenten skal føre til at systemet svikter.

Disse beregningene gjøres enklest ved å benytte Cara fault tree (Exprosoft), og utføre en feiltreanalyse på systemet når MS er under dekning av bare en BTS (Vedlegg C). Ved bruk av analysen i Cara fault tree (Exprosoft) kommer man frem til følgende resultat.

Tabell 3-12 Birenbaums beregning av strukturell viktighet, sortert ut fra forbedringspotensial

Komponent.	Birnbaums relevans	Kritisk viktighet	Forbedrings potensiale
BTS 1	1,0000	9,3108E-1	3,4631E-5
RL1	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL10	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL2	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL3	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL4	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL5	1,5095 E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL6	1,5095 E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL7	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL8	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
RL9	1,5095E-3	1,2172E-2	4,5273E-7
230V1	3,0434E-4	7,4655E-3	2,7767E-7
BAT3	9,1212E-4	1,8662E-3	6,9411E-8
BAT4	9,1212E-4	1,8662E-3	6,9411E-8
BAT2	9,1212E-4	1,8662E-3	6,9411E-8
BAT1	9,1212E-4	1,8662E-3	6,9411E-8
LL1	1,5091E-3	5,1934E-4	1,9316E-8
LL2	1,5091E-3	5,1934E-4	1,9316E-8
FL12	3,7445E-5	3,7699E-5	1,4022E-9
FL11	3,7445E-5	3,7699E-5	1,4022E-9

Denne analysen viser at den komponenten som har størst forbedringspotensial i forhold til pålitelighet er BTS. I denne oppgaven har BTS blitt behandlet som en enhet, uten å gå nærmere inn på hvordan denne er bygget opp og mulighet for etablering av mer intern redundans for å forbedre påliteligheten.

Tilgjengeligheten til radiolinjen (RL) var oppgitt som en parameter i systemkontrakten Exhibit E (Jernbaneverket, 2003), og har ikke blitt analysert nærmere i denne oppgaven. Leide linje (LL) som benyttes i GSM-R er i dag levert av en ekstern tilbyder, og JBV har en pågående prosess for å forbedre tilgjengeligheten på de leide sambandene. Det langsiktige tiltaket er at disse sambandene legges over på JBV's egen fiberbaserte infrastruktur (NGN), noe man mener at skal føre til forbedret pålitelighet

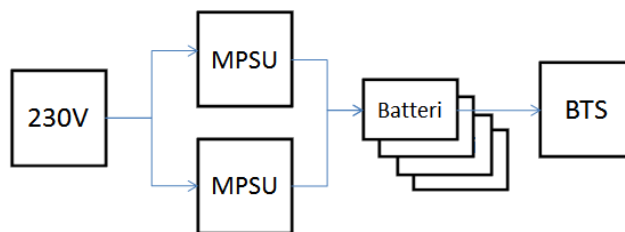
Da står man igjen med strømforsyningen (FL, BAT og 230V), og oppbyggingen av denne. Hvis man ser på antall saker angående strøm og strømforsyning som har vært registrert siden oppstart i 2004 så er dette en betydelig andel av det totale antall registrerte feil. Det kan virke som om det høye antall saker angående strøm og strømforsyning ikke henger sammen med den beregnede påliteligheten til strømforsyningen. Det er derfor grunnlag for å se nærmere på løsningen for strømforsyning.

3.6. Analyse av strømforsyning til BTS

For å kartlegge hvilken betydning vedlikeholdet av strømforsyningen har for påliteligheten til en BTS gjennomføres en nærmere analyse av denne. Dette utføres som en Markovanalyse med følgende begrensinger og forenklinger.

- Batteribanken regnes som en enhet selv om den består av 4 batterier.
- En batteribank som fungerer leverer 48V i 8h.
- En batteribank som er defekt antas å levere 48V i 2h.
- Likeretteren har en kontrollmodul (MCU). Denne er tatt ut av analysen da systemet fungerer uten denne. Bortfall av MCU medfører at likerettermodulene lader med en forhåndsinnstilt ladespenning.
- Systemet har to likerettermoduler (MPSU), systemet oppfører seg likt uavhengig av hvilken MPSU som svikter. Dette punktet tas bare med en gang i analysen.

Systemet er bygget opp som et modulært likerettersystem med 2 likerettere som lader batteribanken med 48V. Hvis en likerettermodul feiler, har den andre tilstrekkelig kapasitet til å lade batteribanken. Ved feil på et eller flere batterier i batteribanken, vil dette medføre betydelig redusert kapasitet i forhold til de dimensjonerte 8h. 48V til BTS er koblet direkte til batteribanken via et distribusjonspanel.



Figur 3-10 Blokkdiagram strømforsyning

Oversikt over de enkelte feiltilstander kan sattes opp i tabell som vist under.

Tabell 3-13 Oversikt over mulige tilstander til strømforsyning

Tilstand	Komponent status				Konsekvens
	230V	MPSU 1	MPSU 2	Batteri-bank	
11	1	1	1	1	Systemet leverer 48V som normalt
10	0	1	1	1	Systemet leverer 48V >8h
9	0	1	1	1	Systemet leverer 48V >6h
8	0	1	1	1	Systemet leverer 48V >4h
7	0	1	1	1	Systemet leverer 48V >2h
6	1	1	1	0	Systemet leverer 48V <2h ved tap av strøm
5.2	1	1	0	1	Systemet leverer 48V som normalt
5.1	1	0	1	1	Systemet leverer 48V som normalt
4.2	1	0	0	1	Systemet leverer 48V >8h
4.1	0	0	0	1	Systemet leverer 48V >8h
3	0	0	0	1	Systemet leverer 48V >6h
2	0	0	0	1	Systemet leverer 48V >4h
1	0	0	0	1	Systemet leverer 48V >2h
0	0	0	0	0	System nede

Tilstand 5.1 og 5.2 er den samme og betegnes bare 5 i den videre analysen. Tilstand 4.1 og 4.2 gir samme resultat og betegnes bare 4 i den videre analysen.

Tiden som brukes til feilretting er i Systemkontrakten (Jernbaneverket, 2003) angitt til 8h. Man må anta at denne tiden har en sannsynlighetsfordeling hvor de fleste hendelser er løst innen 8h, mens enkelte hendelser tar lengre tid å løse. En sannsynlighetsfordeling som beskriver dette er den log-normal sannsynlighetsfordeling. Ved en gjennomgang av rapporter i økonomisystemet til JBV, for utførte arbeidsoppdrag i forbindelse med prioritet 1 arbeidsordrer finne man at gjennomsnittlig rettetid er 5,5h. Det er knyttet stor usikkerhet til dette tallet da svært mange av arbeidsordenen er belastet med nøyaktig ett dagsverk. I tillegg omfatter også dette tallet reisetid tilbake fra oppdrag som ikke skal regnes med i MTTR. Men som et konservativt anslag benyttes 5,5h videre i beregningene.

Tiden som er benyttet tidligere i oppgaven for feilretting av strømforsyning innen 4h er hentet fra et myndighetskrav. Man kan anta at også denne tiden for feilretting følger en sannsynlighetsfordeling, hvor de fleste hendelser er løst innenfor 4h. Hvis man går inn på <http://www.nve.no/avbruddsstatistikk> finner man avbruddstatistikken for lange strømbrudd i perioden 2003 -2011

Tabell 3-14 MTTR lange strømbrudd i perioden 2003 -2011 (NVE, 2013)

År	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
MTTR	1,36	1,06	1,06	1,12	1,17	1,4	1,33	1,25	1,52
Gjennomsnitt	1,25								
SD avvik	0,16								

Som feilrettingstid for strømbrudd vil 1,25h bli benyttet videre i analysen.

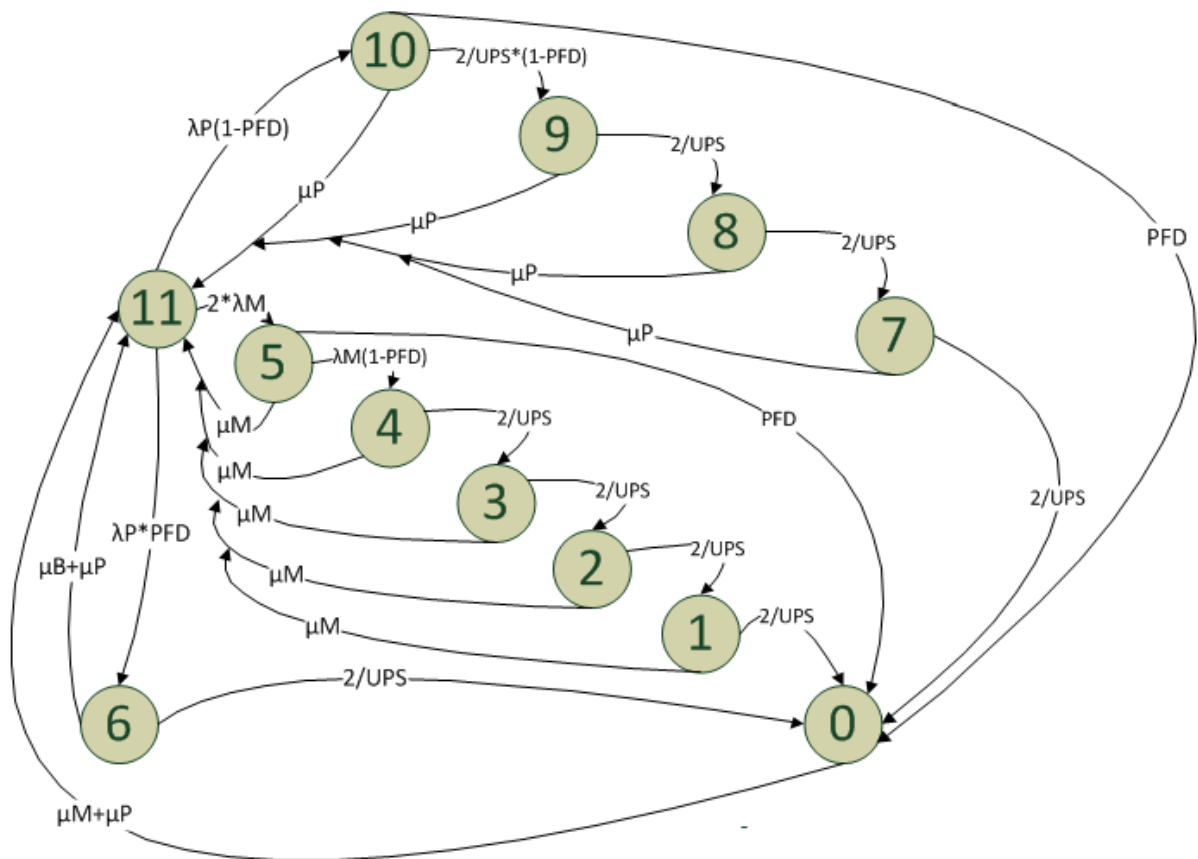
I analysen er tilstand 11 valgt som normal feilfri stauts, og tilstand 0 når systemet har sviktet. Ved eksternt strømbrudd vil man gå til tilstand 10 hvis batteribanken er ok, hvis ikke går man til tilstand 6. Tilstand 10, 9, 8, og 7 er en modellering av batteribankens kapasitet på 8 timer. Hver av tilstandene representerer 2h batterikapasitet. Denne oppdeling er foretatt for å kunne se hvor ofte batteribanken blir benyttet, og hvor stor sannsynlighet det er for at kapasiteten benyttes 25 %, 50 %, 75 % eller 100 %. Man kan returnere tilbake til tilstand 11 fra samtlige av de fire tilstandene ved at eksternt strømbrudd blir reparert. Til tilstand 6 kommer man med sannsynligheten for samtidig strømbrudd og defekt batteribank. Deretter videre til tilstand 0 ved fortsatt strømbrudd over 2h. Man returnerer fra tilstand 6 til 11 ved at batteribanken fornyes, noe som normalt tar 7 uker grunnet lang leveringstid av ny batteribank fra leverandør. Man kan også returnere fra tilstand 6 til 11 ved at ekstern strømbrudd blir reparert. Systemet er utstyrt med to likerettermoduler, hvis den ene svikter beveger man seg til tilstand 5, og deretter til tilstand 4 hvis den andre likerettermodulen også svikter. Man kan returnere fra begge tilstandene og tilbake til 11 ved at begge likerettermodulene byttes ut. Tilstand 4, 3, 2, og 1 er en modellering av batteribankens levetid på 8 timer. Hver av tilstandene representerer 2h batterikapasitet. Man kan returnere tilbake til tilstand 11 fra samtlige av de fire tilstandene ved at begge likerettermodulene byttes ut. Fra tilstand 10 og 5 kan man gå direkte til tilstand 0, med sannsynligheten av at batteribanken svikter ved behov (PFD). Fra tilstand 0 returner man til tilstand 11 enten ved at ekstern strøm blir reparert, eller at begge likerettermodulene blir byttet ut.

<i>LambaP</i>	feilrate ekstern strømforsyning, se Vedlegg A
<i>LambaB</i>	feilrate batteribank ($=1/MTTF_Batteri$), forutsatt at den holder minimum i 8h, se Vedlegg A.
<i>LambaM</i>	feilrate likerettermodul, se Vedlegg A
<i>MyP</i>	reparasjonstid ekstern strømforsyning ($=1/1,25$), se tidligere i dette avsnitt for forklaring rundt valg av verdi
<i>MyB</i>	reparasjonstid for batteribank ($=1/(Leveransetid*24)$),
<i>MyM</i>	reparasjonstid ekstern strømforsyning ($=1/MTTR$), se tidligere i dette avsnitt for forklaring rundt valg av verdien.
<i>Leveransetid</i>	leveransetid for ny batteribank, ut fra erfaring fra drift av nettet har leverandøren meget lang leveringstid på batteribanker. I tillegg er det en omfattende jobb å bytte batteribanken på BTS-en. Setter denne her til 7 uker som er et konservativt estimat.
<i>MTTF Batteri</i>	forventet levetid til en batteribank bestående av 4 batterier, se vedlegg A
<i>MTTR</i>	reparasjonstid av likerettermoduler ($=5,5h$). Nå fungerer systemet om bare en av modulene blir reparert, men er begge moduler defekt skal begge moduler byttes. Det er ingen forskjell i arbeidstid på å bytte en modul kontra to moduler. Selve byttet er meget

raskt å utføre, det som tar tid er å reise til lokasjon. Se tidligere i dette avsnitt for forklaring rundt valg av verdien

PFD Sannsynlighet for feil ved behov. Beregnet ut fra en inspeksjonsrate på 1 år
 ($= (\lambda B * 8760) / 2$)

UPS Batteribankens kapasitet i timer (8h)



Figur 3-11 Markov tilstandsdiagram for strømforsyning til BTS

Ved å benytte regnearket “Markovanalyse” utviklet ved NTNU, får man følgende resultat.

Tabell 3-15 Sannsynlighet for stabil tilstand, besøksfrekvens og MTTF for strømforsyning til BTS

	Stabil tilstand		Besøksfrekvens
P0	1,3334*10 ⁻⁵	v0	1,3092*10 ⁻⁵
P1	8,5794*10 ⁻⁹	v1	3,7047*10 ⁻⁹
P2	1,4796*10 ⁻⁸	v2	6,3891*10 ⁻⁹
P3	2,5563*10 ⁻⁸	v3	1,1038*10 ⁻⁸
P4	4,4154*10 ⁻⁸	v4	1,9066*10 ⁻⁸
P5	4,1876*10 ⁻⁵	v5	9,3589*10 ⁻⁶
P6	9,0492*10 ⁻⁶	v6	9,5094*10 ⁻⁶
P7	2,6154*10 ⁻⁶	v7	2,7473*10 ⁻⁶
P8	1,0989*10 ⁻⁵	v8	1,1539*10 ⁻⁵
P9	4,6155*10 ⁻⁵	v9	4,8463*10 ⁻⁵
P10	2,0228*10 ⁻⁴	v10	2,1872*10 ⁻⁴
P11	9,9967*10 ⁻¹	v11	2,3758*10 ⁻⁴
MTTF	76395		

Hvis man regner tilstand 11, 5, 10, 9, 8, 7 som driftsmessig sikker har strømforsyningen til en BTS en tilgjengelighet på 0,9998995. Ser man på sannsynligheten for tilstand 0 som dermed også angir $Q_0(t)$ for en BTS relatert til strømforsyning er $Q_0(t) = 1,3334 \cdot 10^{-5}$. Ved hjelp av Cara fault tree (Exprosoft) er utilgjengeligheten til strømforsyningen til en BTS beregnet til $Q_0(t) = 1,3 \cdot 10^{-5}$, forutsatt samme rettetider som benyttet i Markovanalysen. Beregningen ved hjelp av Markovanalysen gir dermed en tilgjengelighet som er lik den som er funnet i Cara fault tree (Exprosoft). Av analysen ser man at den mest vanlige feilsituasjon er feil på ekstern strømforsyning (P10), og at det også er den som oftest fører til at en BTS slutter å fungere ved at systemet kommer i tilstand 0. Deretter følger feil på en likerettermodul (P5). Det er relativt liten sannsynlighet for at systemet skal gå ned som følge av at den andre likerettermodulen svikter i samme tidsperiode, og dermed starter å bruke av batterikapasiteten på 8 timer før en til slutt når tilstand 0.

3.6.1. Analyse av antall forventede defekte batteribanker pr. år

I Tabell 3-15 ser man at bortsett fra ekstern strømforsyning, er det likerettermodul eller feil på batteribank som bidrar til nedetid på systemet. Det er relativt lite å hente på å forsterke systemet med en likerettermodul til da sannsynligheten for at modul to skal svikte når første modul allerede har sviktet er relativt liten.

Derimot er det mer å hente på å forbedre påliteligheten til batteribanken, gjennom å optimalisere

vedlikeholdet. Hvis man går ut fra at GSM-R nettet her 503 lokasjoner med batteribanker, får man følgende antall batteribanker som kan svikte hvert år..

$$\text{Antall defekt batteribanker} = 9,0 * 10^{-6} * 503 * 8760 = 39,66 \approx 44 \text{ stk.}$$

Dette er et høyt antall defekte batteribanker for et nett som er nybygd, men kan på den andre siden være et lavt antall for et nett hvor batteribankene begynner å nærme seg MTTF. Dette må derfor analyseres nærmere.

En batteribank har en MTTF på 12 år, og utsettes for relativt tøffe forhold. Selv om rommene der batteriene står er temperaturregulert og skal holde jevn temperatur, kan de oppleve store svingninger i temperatur gjennom året. Dette i tillegg til at batteri påvirkes av hvor mange ganger det har vært oppladet, og hvor dypt de har vært utladet. Levetiden til et batteri kan dermed ikke antas å være eksponentialfordelt, men må ha en form for aldringsfaktor for å fange opp de tidligere nevnte parameterer. Et naturlig valg vil da være Weibullfordeling som nettopp har den fordel at den tar hensyn til aldring. Når batteribanken er utsatt for aldring vil det være grunnlag for å utføre forebyggende vedlikehold gjennom regelmessige testing av batteribanken, for å avdekke feil slik at fornyelse kan iverksettes.

Hvis man legger til grunn at fornyelsene av batteribankene i GSM-R vil foregå som utskifting av alle etter 10 år kan fornyelses funksjon $W(t)$ benyttes. I perioden fra 0 til 10 år vil et vist antall batteribanker svikte og medføre at disse må fornyes. Det som er interessant for driften av nettet er hvor mange batteribanker man kan forvente å måtte fornye hvert år frem til år 10. Den tiden som går med til å bytte batteribanken er så liten at den kan ignoreres. I tillegg er tiden frem til de enkelte batteribankene svikter antatt å være likt fordelt, med en fordeling tilsvarende Weibull.

Fornyelsesfunksjon kan uttrykkes på følgende måte:

$$W(t) = \sum_{r=1}^{\infty} F_x^{(r)}(t) \quad (\text{Vatn, 2007})$$

Hvor $F_x(X)$ er distribusjonsfunksjon av feiltidene:

$$F_x^{(r)}(t) = \Pr(\sum_{i=1}^r X_i \leq t) \quad (\text{Vatn, 2007})$$

Ved bruk av fornyelsesfunksjon kan dette da uttrykkes som følger, hvis vi har en estimert startverdi for $W_0(t)$.

$$W_i(t) = F_x(t) + \int_0^t W(t-u)(u)du \quad (\text{Vatn, 2007})$$

For små verdier av t kan følgende estimat for $W_0(t)$ benyttes, $W_0(t) = F_x(t)$.

For videre beregning benyttes Excel regnearket WeibullRenwal utviklet ved NTNU. Som gir følgende antall forventede defekte batteribanker pr. år, for forskjellige verdier av α .

Tabell 3-16 Oversikt over forventet antall defekte batteribanker ut fra varierende verdier av α

År	$\alpha = 1$		$\alpha = 2$		$\alpha = 3$		$\alpha = 4$	
	Pr. år	Sum	Pr. år	Sum	Pr. år	Sum	Pr. år	Sum
1	42	42	3	3	0	0	0	0
2	42	84	8	11	1	2	0	0
3	42	126	13	24	4	6	1	1
4	42	168	18	43	8	13	3	4
5	42	210	23	66	12	25	6	10
6	42	251	27	93	18	43	11	21
7	42	293	31	123	24	67	17	38
8	42	335	34	157	30	97	25	63
9	42	377	36	194	36	133	34	97
10	42	419	39	232	41	174	43	140
11	42	461	40	273	45	219	52	192
12	42	503	41	314	48	267	58	250

Ut fra tabellen ser man at høyere α gir færre defekte batteribanker i de første årene, men øker betydelig i antall opp mot MTTF på 12 år, med unntak av $\alpha=1$ som har lik feilrate hele tiden.

Ser man på antall bestilte 155Ah batterier i perioden 2010 – 2012 som JBV har utført finner man følgende.

Tabell 3-17 Antall bestillinger av 155Ah batterier i perioden 2010 -2012

År	2009	2010	2011	2012
Antall	10	13	25	27

GSM-R nettet ble bygget i perioden 2003- 2006, som gir en gjennomsnittlig levetid siden 2005. Ved utgangen av 2012 er anlegget dermed gjennomsnittlig 7 år. Ut fra antall bestilte batteribanker i Tabell 3-17 sammenlignet med Tabell 3-16 har batteribankene i GSM-R nettet en α tilnærmet 3. Antallet batteribanker som er byttet gjør et hopp fra 2010 til 2011, dette fordi man i 2011 begynte å bytte batteribanker forebyggende ut fra alder på de eldste installasjonene. I grunnlaget for bestilling av batteribanker er ikke alle bestillinger merket med om batteribanken byttes på grunn av alder eller på grunn av svikt. Bestillinger som er merket fornyelse på grunn av alder er tatt ut av oversikten. Det man helt klart kan anta er at levetiden ikke følger en eksponential fordeling med $\alpha=1$. Dette ut fra at før 2009 ble det nesten ikke byttet batteribanker i GSM-R nettet.

Dette betyr av hvis man velger å bytte ut samtlige batteribanker ved 10 år vil 174 (ved $\alpha=3$), av disse allerede være fornyet på grunn av at de har sviktet og er blitt erstattet med nye.

3.6.2. Optimal byttefrekvens på batteribank ut fra levealder

Men hva er den optimale byttefrekvens på batteribankene? I RCM analysen som er gjennomført for GSM-R er denne satt til 9 år med en inspeksjon syklus på 36 måneder. Disse intervallene er valgt ut fra erfaring, og er ikke basert på noen matematisk beregninger. Hvis man benytter følgende forutsetninger for kostander i forbindelse med inspeksjon og bytte av batteribank kan optimalt inspeksjonsintervall beregnes.

- Kostnad inspeksjon $PM_{kost} = 4\ 000,-$ regnet ut fra 500,- timen og 8 timer arbeid inkludert kjøring.
- Kostand fornyelse $CM_{kost} = 18\ 000,-$
- Kostand for hver time systemet er utilgjengelig må estimeres i denne oppgaven:
 - Det forutsettes en jevn fordeling av trafikken gjennom hele døgnet.
 - Antall godstog på strekningen pr. døgn er 20.
 - Forsinkelseskostnad pr. tonn 72 kr/tonntime (TØI, 2012).
 - Gjennomsnittlig godsvekt 500 tonn.
 - Dette gir en kostnad for hvert godstog pr. time = 36000,- h⁻¹.
 - Antall passasjertog på strekningen pr. døgn er 80.
 - Antatt timelønn for reisende med persontog 250,- (BI, 2010).
 - Antatt antall reisene pr. tog 112 (BI, 2010).
 - Dette gir en kostnad for hvert passasjertog pr time = 28000,- h⁻¹.
- Kostnad pr time blir da $U_{Kost} = 80/24 * 28000,- h^{-1} + 20/24 * 36000,- h^{-1} = 123333,- h^{-1}$.
- MTTF uten vedlikehold = 12 år.

Effektiv feilrate når forebyggende vedlikehold av batteribanken utføres med intervallet τ er gitt ved:

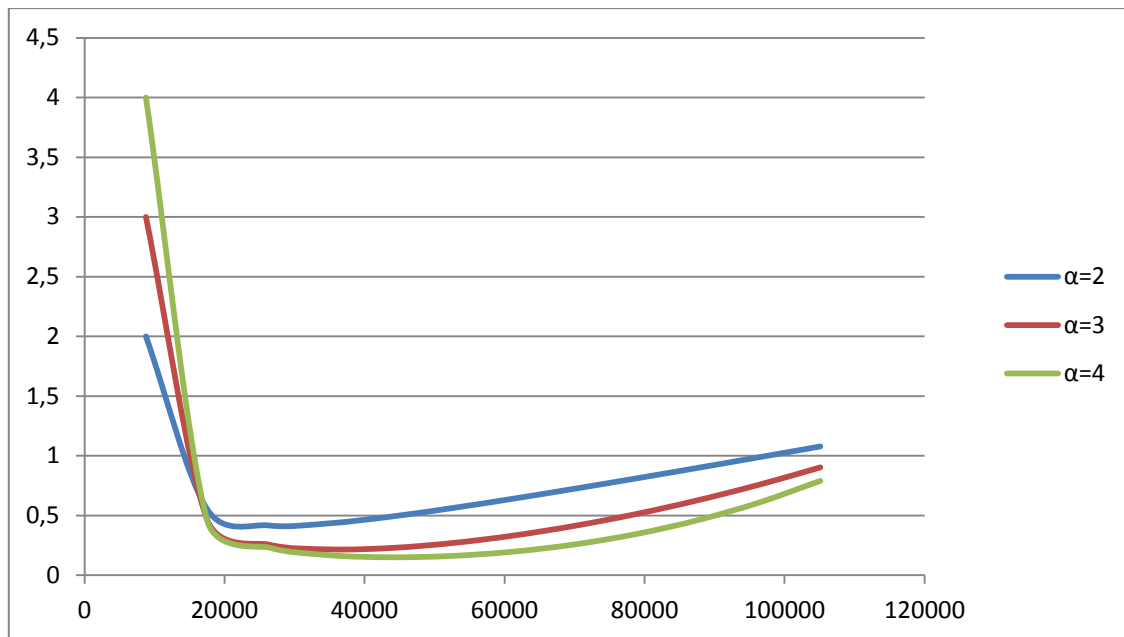
$$\lambda_E(t) = \left[\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha}) / MTTF \right]^\alpha \tau^{\alpha-1} \quad (\text{Vatn, 2007})$$

Hvor den totale kostnad for forebyggende vedlikehold (τ), pr. år er gitt ved:

$$C(\tau) = \frac{C_{PM}(\tau)}{\tau} + C_{CM}(\tau) + U_{kost}(t) \quad (\text{Vatn, 2007})$$

$$C(\tau) = \frac{PM_{kost}}{\tau} + \lambda_E(t) * (CM_{kost}(\tau) + U_{kost}) \quad (\text{Vatn, 2007})$$

Gitt verdien som er lagt til grunn for denne beregningen, gir dette følgende resultat for $C(\tau)$:



Figur 3-12 Kostnad for forebyggende vedlikehold $C(\tau)$ for forskjellige verdier av α , ved forebyggende vedlikehold på en BTS om dagen.

Eksakt verdi for τ kan finnes ved hjelp av følgende formel:

$$\tau = \frac{MTTF}{\Gamma(1+1/\alpha)} \left(\frac{PM_{kost}}{(CM_{kost} + U_{kost})(\alpha-1)} \right)^{1/\alpha} \quad (\text{Vatn, 2007})$$

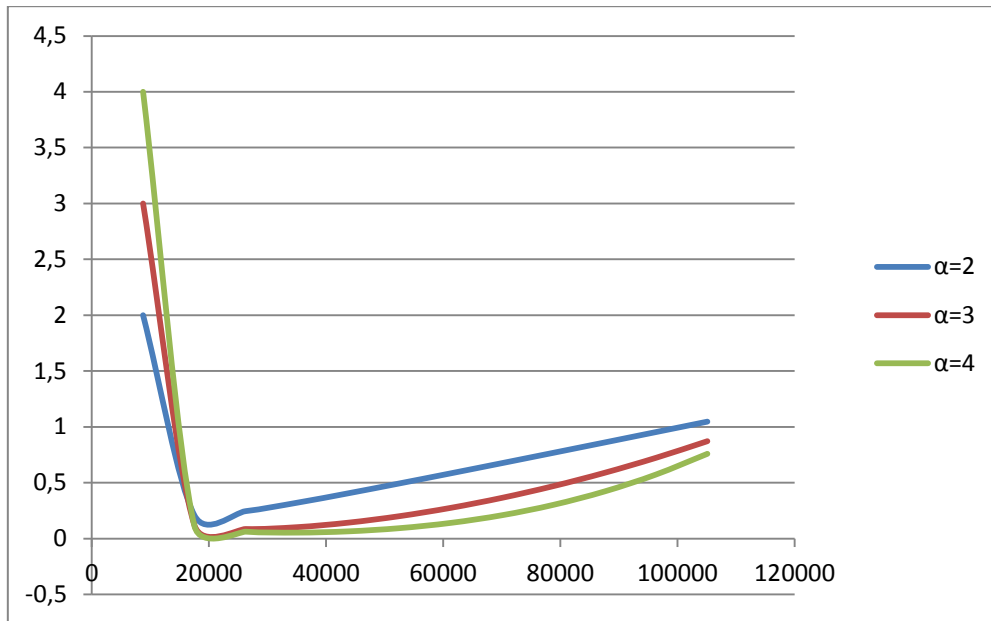
Dette gir følgende verdier for τ ut fra varierende verdier av α

Tabell 3-18 Verdier for τ ved varierende α , med vedlikehold på en BTS om dagen

α	2	3	4
τ (timer)	15146	22193	29192
τ (år)	1,7	2,5	3,3

Man ser ut fra tabellen over at antakelsen i RCM analysen for GSM-R nettet, om en τ på 3 år er et godt anslag hvis en antar at α for batteribankene ligger mellom 3 og 4.

Greier man å optimalisere vedlikeholdsplanleggingen slik at man kan gjennomføre forebyggende vedlikehold på 4 BTS-er i løpet av en dag. Vil dette gi en $PM_{kost} = 1\,000,-$ for hver BTS. Dette vil da gi følgende graf for $C(\tau)$.



Figur 13 Kostnad for forebyggende vedlikehold $C(\tau)$ for forskjellige verdier av α , ved forebyggende vedlikehold på fire BTS-er om dagen.

Dette gir følgende verdier for optimalt vedlikeholdsintervall.

Tabell 3-19 Verdier for τ ved varierende α , med vedlikehold på fire BTS-er om dagen

α	2	3	4
τ (timer)	7573	13981	20642
τ (år)	0,9	1,6	2,4

Ved å utføre forebyggende vedlikehold på flere BTS-er hver dag, kan vedlikeholdsintervallet τ gjøres kortere. Man oppnår dermed større sannsynlighet for å avdekke en batteribank som er i ferd med å svikte, enn ved lengre intervaller på τ . Dette uten at den totale kostnaden for forebyggende vedlikehold øker.

3.6.3. Leveransetiden på batteribanker sin betydning for påliteligheten

I beregningene har jeg lagt inn en byttetid på de defekt batteribankene på 7 uker. Dette på grunn av lang leveringstid fra leverandør, og at det er en relativt stor jobb å bytte en slik batteribank. Hvis man kunne redusere denne tiden til en uke ved forbedret leveringstid og kortere installasjonstid, kan dette slå ut på den beregnede påliteligheten til en BTS.

Tabell 3-20 Sannsynlighet for stabil tilstand, besøksfrekvens og MTTF for strømforsyning til BTS ved leveranstid på 7 dager for ny batteribank

	Stabil tilstand		Besøksfrekvens
P0	1,3322*10 ⁻⁵	v0	1,3079*10 ⁻⁵
P1	2,7713*10 ⁻⁹	v1	1,1967*10 ⁻⁹
P2	4,7953*10 ⁻⁹	v2	2,0707*10 ⁻⁹
P3	8,2845*10 ⁻⁹	v3	3,5774*10 ⁻⁹
P4	1,4320*10 ⁻⁸	v4	6,1837*10 ⁻⁹
P5	4,1876*10 ⁻⁵	v5	9,3589*10 ⁻⁶
P6	9,0055*10 ⁻⁶	v6	9,5094*10 ⁻⁶
P7	2,6165*10 ⁻⁶	v7	2,7473*10 ⁻⁶
P8	1,0989*10 ⁻⁵	v8	1,1539*10 ⁻⁵
P9	4,6155*10 ⁻⁵	v9	4,8463*10 ⁻⁵
P10	2,0228*10 ⁻⁴	v10	2,1872*10 ⁻⁴
P11	9,9967*10 ⁻¹	v11	2,3758*10 ⁻⁴
MTTF	76459		

Summen av tilstand 11, 5, 10, 9, 8, 7 er nå 0,999936. Som er en forbedring på $2,4 \cdot 10^{-5}$ kontra en leveringstid på 49 dager. Denne lave forskjellen kommer av modellens oppbygging med at tilstand 6 kun oppnås ved en kombinasjon av strømbrudd + defekt batteribank. Det har dermed liten innvirkning på strømforsyningens pålitelighet om leveranstiden på ny batteribank forbedres.

3.6.4. Batterier med lengre levetid sin innvirkning på strømforsyningens tilgjengelighet

En annen tilnærming kan være å fornye batteribankene med batteri som har lengre levetid og som bedre tåler de driftsforhold som de blir utsatt for i GSM-R nettet. Et eksempel på dette er Tel. X (Saft Batteries Industrial groups, 2010) batterier som oppgir å ha en MTTF på 20 år. Levetiden er også avhengig av hvor mange opp og utladninger som batteriet opplever. Levetid ved 25 oppladninger oppgis til 20 år, og ved 40 oppladninger til 14 år. Hvis man antar at modus 7, 1 og 0 representerer dyputladning av batteriene så gir besøksfrekvens til disse modusene dyputladning 0,14 ganger/år ut fra en MTTF på 12 år. Dette er verdier som oppgis ved 40°C, normalt er det 20°C i rommet hvor en BTS står. Det burde da være mulig å beregne de nye batteriene ut fra 20 års levetid. Innsatt i regnearket med 1 uke MTTR på batterier får man følgende beregning.

Tabell 3-21 Sannsynlighet for stabil tilstand, besøksfrekvens og MTTF for strømforsyning til en BTS ved 20 års MTTF for batteribanken

	Stabil tilstand		Besøksfrekvens
P0	8,5346*10 ⁻⁶	v0	8,3794*10 ⁻⁶
P1	2,7317*10 ⁻⁹	v1	1,1796*10 ⁻⁹
P2	4,7246*10 ⁻⁹	v2	2,0402*10 ⁻⁹
P3	8,1656*10 ⁻⁹	v3	3,5261*10 ⁻⁹
P4	1,4112*10 ⁻⁸	v4	6,0939*10 ⁻⁹
P5	4,5251*10 ⁻⁵	v5	9,3589*10 ⁻⁶
P6	5,4295*10 ⁻⁶	v6	5,7056*10 ⁻⁶
P7	2,7400*10 ⁻⁶	v7	2,8770*10 ⁻⁶
P8	1,1508*10 ⁻⁵	v8	1,2083*10 ⁻⁵
P9	4,8333*10 ⁻⁵	v9	5,0750*10 ⁻⁵
P10	2,0820*10 ⁻⁴	v10	2,2252E-04
P11	9,9967*10 ⁻¹	v11	2,3758*10 ⁻⁴
MTTF	119349		

Ved å benytte denne type batterier i kombinasjon med 49 dager MTTR, oppnås lavere sannsynlighet for feil på batteribanken. Målt ut fra tilstand 0 er $Q_0(t) = 8,5 \cdot 10^{-6}$. Tilgjengeligheten målt ut fra tilstand 11, 5, 10, 9, 8, 7 er på 0,999941. Dette er en forbedring i beregnet tilgjengelighet for strømforsyningen til en BTS på $4,1 \cdot 10^{-5}$.

3.7. Effekten av dubleret GSM-R kjernenett

JBV arbeider i perioden 2012 -2015 med gjennomføring av hovedplan for dublering av de sentrale systemene til GSM-R. Dette for å fjerne risikoen for at brann eller teknisk feil skal kunne sette GSM-R ut av drift i opptil 6 måneder. Det er i denne forbindelse bygget et nytt datarom som har samme bestykning og funksjon som det allerede eksisterende datarommet. Det nye datarommet er lokalisert på en geografisk lokasjon enn det opprinnelige datarommet. I samme periode blir mange av de sentrale systemene fornyet. For enkelte av systemene er man fortsatt i designfasen, slik at det enda ikke er overlevert pålitelighetsdata til JBV. Designkravet som ligger til grunn for den endelige løsningen, er at tilgjengeligheten ikke skal være lavere enn ved dagens løsning. Løsningen består stort sett i å plassere samme type utstyr eller nyere, i de to datarommene. De to lokasjonene vil bli konfigurert til automatisk å ta over for hverandre ved feil, i tillegg står systemene i lastdeling slik at den ene siden kan betjene hele nettet hvis nødvendig ved feil. For å kunne forta en enkel beregning av forventet pålitelighet til GSM-R nettet etter denne endringen, kan pålitelighetsdata fra dagens løsning benyttes for beregning av påliteligheten til den nye redundante

løsningen. Systemene som blir dublert er alle de sentrale systemene, og den sentral delen av systemet for togledertelefoni. Det foretas ikke endringer på radionettet i denne forbindelse, det benytter derfor eksisterende data for MS under dekning fra to BTS-er.

Beregningen utføres ved hjelp av Cara fault tree (Exprosoft) og gir følgende resultat.

Tabell 3-22 Resultat av analyse av dublert kjernenett

Analyse nummer	Begrensninger	Q ₀ (t)	MTBF	λ	Pålitelighet
				(=1/MTBF)	(=1- Q ₀ (t))
D1	MS under dekning av to BTS-er	1,8*10 ⁻⁶	18699	5,4*10 ⁻⁵	0,999998
D2	Dublert system for Togledertelefoni	5,5*10 ⁻¹⁴	18778	5,3*10 ⁻⁵	1
D3	Dublert kjernesystem	5,21*10 ⁻⁸	18769	5,4*10 ⁻⁵	0,999999

Utbygging til redundant kjernenett for GSM-R nettet vil gi Q₀(t)= 1,9* 10⁻⁶. Sammenlignet med beste resultat, T6 fra Tabell 3-5 er dette en klar forbedring. Av analysen ser man at det dublerte togledersystemet kommer ut med en sannsynlighet på 1. Dette er ekstremt, og designet på løsningen må nok analyseres nærmere når denne er klar fra leverandøren.

4. Oppsummering og anbefalinger for videre arbeid

I dette avsnittet blir delmålene i 1.2 vurdert opp mot resultatene av analysene som er gjennomført i denne studien.

4.1. Resultatmål A: Tilgjengelighet på 99,975 % og PLL verdi

GSM-R nettet er bygget etter krav som fremkommer av systemkontrakten (Jernbaneverket, 2003) mellom Jernbaneverket og Siemens angående bygging av GSM-R nettet langs den norske jernbanen. Det har ikke vært mulig å få klarhet i hvordan kravet om 99,975 % tilgjengelighet har fremkommet i denne kontrakten. Dette på grunn av at det er over 10 år siden kontrakten ble utformet, og det har ikke vært mulig å få tak i de personene som utformet dette kravet. Jeg har vært i kontakt med personer som var svært sentral i dette arbeidet, men de kan heller ikke grunngi hvordan dette kravet oppsto. Et annet problem er at mye av den dokumentasjon som ble utarbeidet i forbindelse med GSM-R prosjektet ikke er overført til Jernbaneverkets arkiver, og er enten gått tapt eller befinner seg på filområder som ikke er tilgjengelige. Teknisk Regelverk (Jernbaneverket, 2012) er i ettertid oppdatert med krav til tilgjengelighet for GSM-R ved bygging av nye anlegg.

I forhold til om GSM-R påvirker PLL verdien til Jernbaneverket har jeg diskutert dette med flere internt i JBV. I hovedsak er alle av den oppfatning at dette ikke har vært vurdert. Det er ikke mulig å finne noe dokumentasjon på at fremtidig effekt av GSM-R er tatt inn i den PLL verdien som gjelder for JBV i dag. Det som imidlertid er verdt å merke seg er at fastsettelsen av PLL verdien ble utført i samme tidsperiode som planleggingen av GSM-R pågikk, og en mulig synergieffekt kan være lagt inn uten at det er dokumentert. Det er her heller ikke mulig å finne noe dokumentasjon internt i JBV angående de utredninger som har foregått i forkant av fastsettelsen av denne verdien.

Det som er meget viktig å legge merke til er at PLL verdier beregnes på historiske oppnådde tall, og ikke hva man tror man skal oppnå i fremtiden. Det er derfor grunn til å anta at effekten av innføringen av GSM-R ikke har blitt vurdert ved fastsettelsen av disse verdiene.

4.2. Resultatmål B: Metoder for pålitelighetsberegning

Denne oppgaven har demonstrert to metoder for analyse av større systemer, blokkdiagram og feiltre. Ut fra analysen ser man at disse to analysemetodene gir forskjellige resultat. I utgangspunktet skal en blokkdiagramanalyse og en feiltreanalyse gi samme beregningsresultat. Hovedårsaken til at man i denne oppgaven får forskjellige resultater i de to beregningsmetodene, er at jeg har valgt å gjøre en mer detaljert analyse i feiltreet, enn det som er gjennomført i analysene ved hjelp av blokkdiagram. Dette på grunn av at

i denne oppgaven har jeg benyttet Cara fault tree (Exprosoft) som gir en enkel måte å konstruere, og eventuelt endre et feiltre. Men også feiltre har sine begrensinger når man kommer til dynamiske systemer. Til analyse av disse systemene er Markovanalysen en godt egnet metode. I denne oppgaven er strømforsyningen til en BTS analysert ved hjelp av Markovanalyse. Det er vurdert hvilke forbedringer i tilgjengelighet man kan oppnå gjennom kortere reparasjonstid, eller byttet til batterier med lengre levetid. Det er vist at begge disse faktorene vil bidra positivt til økt pålitelighet for en BTS, og dermed også for påliteligheten til hele GSM-R systemet. I tillegg er det utført beregninger for å kartlegge hvor mange batteribanker man kan forvente å måtte byttes hvert år. Dette resultatet er sammenlignet med det faktiske antall batteribanker som er byttet i perioden 2009 til 2011, og ut i fra dette kan det virke som batteribankene som benyttes til BTS-er i GSM-R nettet har en aldringsparameter α tilnærmet lik 3. Nå er grunnlaget fra drift noe tynt til å fastslå denne verdien med stor sikkerhet, men det som er helt klart er at fordelingen av feil ikke er eksponentsialfordelt som Markovanalysen tar utgangspunkt i. Markovanalysen har helt klart begrensinger når systemet som skal analyseres er stort med mange avhengigheter. Uten noen form for støtte av et beregningsprogram for Markov, kan det da bli vanskelig å utføre beregninger ut fra størrelsen på matrisen som beskriver analyseobjektet.

4.3. Resultatmål C: Analyse av typisk scenario i GSM-R

I denne oppgaven er scenarioet for kommunikasjon mellom mobilabonnet og togleder analysert ut fra om abonnenten er under dekning av en eller to basestasjoner. Kjernesystemet og systemet for togledertelefoni er analysert ut i fra forskjellige typer redundans. Ved sammenstilling av disse analysene finner jeg at kravet på 99,975 % tilgjengelighet bare er oppfylt når det er redundant Dicora terminal tilgjengelig hos togleder.

Videre er det utført en analyse av hva som er den største feilårsaken ut i fra hendelser som er registrert i sakssystemet til OPM siden oppstart i 2004. Når man ser på hendelsene som er registrert i Service Desk, står problemer med strømforsyningen for 24,2 % av alle saker. Tilsvarende analyse er ikke mulig å utføre på data fra Service Manager på grunn av manglende kategorisering av saker ved registrering. Denne manglende kategoriseringen hindrer også JBV i å hente ut relevante erfaringsdata til bruk ved analyser av påliteligheten til GSM-R nettet.

Til slutt er det utført et grovt anslag på hva påliteligheten til GSM-R nettet vil bli etter et at prosjektet med dublering av kjernesystemene er ferdig i 2015. Analysen er utført ved hjelp av feiltre, og i denne analysen finner man $Q_0(t) = 1,9 \cdot 10^{-6}$ som er en klar forbedring fra den beste beregnede verdi på dagens nett som er $Q_0(t) = 5,1 \cdot 10^{-5}$. Nå er dette ett veldig grovt anslag for ny pålitelighet, da analysen bygger på gjenbruk av pålitelighetsdata fra eksisterende systemer og en rekke forenklinger. Men den gir en god indikasjon på at nettet i fremtiden vil ha bedre overlevelsessevne i forbindelse med feil enn i dag

4.4. Resultatmål D: Tilgjengelighet på 99,985 % og SIL 1 krav

Ut fra analysene i denne oppgaven fremgår det at så lenge togledere har tilgang til redundant Dicora terminal på togledersentralen, tilfredsstiller GSM-R nettet kravet i virksomhetsplanen på 99,985 %, samtidig som det tilfredsstiller designkravet om 99,975 % pålitelighet. Det er ut fra denne analysen ikke nødvendig å forta endringer i oppbyggingen av nettet for å ivareta kravet som er fastsatt gjennom virksomhetsplan 2010 for Bane Nett. Det som er viktig å legge merke til er at denne oppgaven bare har tatt for seg ett av fem forskjellige scenarier som ligger til grunn for dokumentasjon av kravet på 99,975 % tilgjengelighet. I tillegg er kravet om at tilgjengeligheten for tog i tunneler skal være like god som i resten av nettet, utelatt fra denne analysen på grunn behov for å redusere omfanget på oppgaven.

Slik nettet er bygget i dag tilfredsstiller det ikke SIL 1 kravet. Utfordringen ligger i tilgjengeligheten til BTS-ene ute ved sporet. Ved den grove analysen av påliteligheten i GSM-R nettet etter bygging av redundant kjernenett, kommer det frem at de sentralene delene og systemet for togledertelefoni tilfredsstiller kravet til SIL 1, mens systemet for transmisjon og BTS-er fortsatt har for lav pålitelighet.

4.5. Resultatmål E: Effekten av vedlikeholdsoptimalisering

I denne oppgaven har jeg benyttet metoder for vedlikeholdsoptimalisering på analysen av strømforsyningen til en BTS, for å se om det er mulighet til å forbedre påliteligheten til denne. I Markovanalysen har jeg vist at ved både kortere leveringstid på nye batterier, og ved byttet til batterier med lengre levetid oppnås en positiv effekt for påliteligheten til strømforsyningen. I tillegg har jeg vist at dagens system med årlig inspeksjon av batteribanker ikke er det optimale sette ut fra kostnader. Det optimale intervallet for forebyggende vedlikehold ligger på ca. 2,5 år med de forutsetningene som er lagt til grunn for beregningen. Ved å effektivisere vedlikeholdet slik at man utfører forebyggende vedlikehold på 4 BTS-er om dagen i stedet for en. Kan intervallet for forebyggende vedlikehold gjøres kortere, og dermed har en større sannsynlighet for å detektere en batteribank som er i ferd med å svikte. Dette uten at kostnaden til det forebyggende vedlikeholdet øker.

4.6. Diskusjon

Denne oppgaven har belyst påliteligheten til GSM-R nettet gjennom en analyse av en modell for beregning av nettes pålitelighet. Denne modellen er valgt fordi at den dekker de mest brukte senarioene av nettet. For beregning av påliteligheten til transmisjonsnettet har jeg benyttet både pålitelighets-blokkdiagram og feiltre. Nå skal disse metodene gi samme pålitelighet ved analyse av det samme systemet. I denne oppgaven kommer analysen ut med forskjellige resultat, dette kommer at feiltreanalysen er utført ved hjelp av Cara fault tree (Exprosoft), som gjør det langt enklere å utføre komplekse analyser. Det er derfor i feiltreanalysen lagt inn betydelig flere hendelser enn det som er tatt med i pålitelighets-blokkdiagrammet. Dette viser at jo mer detaljert man kan gjøre en analyse dess mer nøyaktig blir resultatet av analysen. Dette forutsetter selvfølgelig at de enkelte enheten kombineres på den riktige måten. Så lenge feiltreanalysen kan gjøres ved hjelp av Cara fault tree (Exprosoft) eller tilsvarende programmer, er dette betydelig raskere enn å regne strukturfunksjonen til et blokkdiagramme for hånd. Nå finnes det også programmer som kan beregne blokkdiagrammer, men feiltre har fortsatt den fordel at den kan modellere komplekse systemer og fellesfeil.

Selv om feiltre i denne oppgaven gir et mer nøyaktig resultat, er ikke dette det samme som at resultatet er mer korrekt. Resultatet av analysen er avhengig av kvaliteten på dataene som legges inn. I denne oppgaven er det benyttet pålitelighetsdata som i vesentlig grad kommer fra leverandøren av systemet. JBV har som beskrevet i oppgaven valgt og ikke å prioritere arbeidet med å bygge opp sin egen pålitelighetsdatabase for GSM-R, hvor man kunne ha hentet ut opplysninger til bruk ved analyser. Dermed er beregningen basert på et tallmateriale som man ikke kjenner nøyaktigheten til. I tillegg er enkelte deler av analysen basert på verdier som er oppgitt i Systemkontrakten (Jernbaneverket, 2003), og det er ikke kjent hvilken beregning som ligger bak disse verdiene. Utfordringen er at GSM-R ikke måles ut fra teknisk pålitelighet som denne oppgaven dekker, men ut fra tilgjengeligheten til GSM-R tjenestene. I og med at nettet er bygget opp med redundans vil det være et avvik mellom disse to verdiene. Man vil oppleve oftere tekniske feil, enn feil som påvirker leveransen av GSM-R tjenesten. Hvordan man skal måle den tekniske påliteligheten er en utfordring, siden alle de automatiske alarmer i systemet ikke skiller mellom planlagt arbeid og en reell hendelse. For å kunne skille dette må JBV innføre et system i overvåkingen ved OPM hvor alarmer som følge av planlagt arbeid merkes, slik at de kan tas ut av statistikken. Dette er et omfattende arbeid, og man må til slutt vurdere kost/nytte av denne investeringen. Et annet alternativ er å fortsette rapporteringen som i dag, men benytte pålitelighetsanalyser for underbygging av kvaliteten på nettet. Et nett som er bygget for stor teknisk pålitelighet vil mest sannsynlig også gi god tilgjengelighet på tjenesten som leveres over det.

I oppgaven har feilraten for softwarefeil blitt beregnet. I beregningene er denne feilraten så lav at den ikke har noen avgjørende betydning for påliteligheten til GSM-R nettet. Men det har vist seg gjennom driften av GSM-R at softwarefeil får større effekt enn hardwarefeil. Dette fordi man som oftest ved hardwarefeil kan skifte over til den redundante hardwaren, slik at tilgjengeligheten på tjenestene i nettet opprettholdes.

Dette i motsetning til softwarefeil som har vist seg at også kan påvirke den redundante løsningen. Tre av tilfellene som er tatt med i beregningen, har medført at deler eller hele nettet var utilgjengelig for brukerne. Siden softwarefeil har større konsekvens betyr dette at JBV må vektlegge en grundig test av ny software i testlab, før den legges inn i det operative nettet. Dette er spesielt viktig når JBV nå bygger et redundant kjernenett for GSM-R hvor hele systemet går over fra å kjøre på software tilpasset proprietær hardware, til en software løsning som er beregnet å kjøre på ordinære servere i et IT miljø. Det må i denne sammenheng gjennomføres pålitelighetsanalyser for den nye løsningen som ikke bare baserer seg på hardware pålitelighet til komponentene i GSM-R systemet. Men også tar for hvilken effekt andre elementer i datanettverket kan ha på påliteligheten. Det vil i fremtiden ligge et stort datanettverk til grunn for tjenestene som skal leveres i GSM-R nettet, i det samme nettet vil det også gå andre tjenester som kan påvirke GSM-R. Feil i noen av de andre applikasjonene kan gi uheldig effekt for påliteligheten til GSM-R.

JBV har bestemt at det ikke skal innføres et SIL 1 krav for GSM-R nettet eller tilhørende transmisjonsnett. Transmisjonsnettet i JBV er definert som et åpent nett, som medfører at sikkerheten til applikasjonen må ligge i endeutstyret. Dette prinsippet fungerer bra for et instrumentert sikkerhetssystem hvor tap av kommunikasjon medfører at anlegget går i sikker modus. I et GSM-R nettet er det ingen intelligens i endeapplikasjonene, da disse er avhengig å kommunisere med de sentrale systemene for å fungere. Ved tap av kommunikasjon vil tjenestene som tilbys i nettet bli utilgjengelig for brukerne. GSM-R har dermed ingen sikker modus for brukerne ved feil.

GSM-R er ikke definert som en barriere, men som et viktig barriereelement, både før og etter en uønsket hendelse. Dette betyr at JBV er nødt til å tilby en høy pålitelighet for GSM-R og tilhørende transmisjonssystem. Metodene som er vist i denne oppgaven kan benyttes til å analysere hvor i nettet en bør sette inn tiltak og hvilken effekt disse tiltakene vil gi.

I analysen som omhandler hva som er det mest optimale intervallet for vedlikehold på batteribankene i GSM-R nettet, er det lagt til grunn at alle batteribanker byttes etter 10 år. Som vist i analysen vil et betydelig antall batteribanker måtte byttes før denne tid på grunn av feil. Hvis JBV legger opp til at alle batteribanker skal byttes etter 10 år, vil man dermed måtte bytte batteribanker som er relativt ny. I tillegg er det ikke realistisk å bytte samtlige i løpet av år. Dette ut fra omfanget på arbeidet som skal gjøres av feltdrift, ved siden av de normale arbeidsoppgavene. En annen faktor som spiller inn er kostnaden, det vil være vanskelig å argumenter for bytte ut batteribanker som nylig er fornyet på grunn av en policy om at alt skal byttes ved 10 år. JBV må derfor etablere et system som holder oversikt over når de enkelte batteribanker ble etablert og når de ble fornyet. Hvis en batteribank blir fornyet før 10 år f.eks. etter 6 år vil 10 års fornyelsesintervallet begynne å løpe på nytt fra det tidspunktet hvor batteribanken ble fornyet. Dette medfører at JBV får en større utfordring innenfor vedlikeholdsplanleggingen, men på sikt vil dette medføre at man fornyer ca. 1/10 av batteribankene hvert år. Noe som er enklere å gjennomføre ut fra

bemanning og økonomiske rammer for driften. Dette betyr at GSM-R må ta i bruk eksisterende systemer for vedlikeholdsstyring, eller implementere nye verktøyer som støtter vedlikeholdsstyring i den eksisterende overvåkningsplattformen som eksisterer ved operasjonssentret for GSM-R.

I grunnlaget for vurdering av optimalt intervall for vedlikehold av batteribanker til BTS-er, er det lagt noen forutsetninger for hvor mange togbevegelser et utfall av en BTS vil berøre. Dette grunnlaget kan sikkert diskuteres alt ut fra hvor i Norge dette utfallet finner sted. Det som er hensikt med beregningen er å finne et gjennomsnittstall for bruk i analysen. 100 tog i døgnet kan være alt for mye på enkelte strekninger, mens det er for lite på andre strekninger. Det som er viktig er at på strekninger med stor togtetthet, dekker hver BTS et mindre område enn på strekninger med lav togtrafikk. I tillegg har strekninger med stor togtetthet dekning fra to BTS-er, noe som gjør det mindre sannsynlig at utfall av en BTS vil påvirke togtrafikken. I tillegg vil områder med stor togtetthet være nærmere lokasjoner hvor JBV har stasjonert vedlikeholdspersonell, slik at sannsynligheten for lange utfall blir mindre. På baner med mindre trafikk kan modellen gi en for høy kostand, men på flere av disse banene er godstrafikken større og det kjøres tyngre tog.

Den parameteren som har størst innvirkning på optimalt vedlikeholdsintervall er kostanden for forebyggende vedlikehold. Hvis JBV etablerer rutiner for planlegging av vedlikeholdet slik at en rekker å utføre vedlikehold på fire BTS-er i stedet for en som modellen legger opp til. Kan man for $\alpha=3$ utføre forebyggende vedlikehold hvert andre år i stedet for hvert tredje år innenfor de samme kostnadsrammene. Eventuelt kan man benytte de frigjorte midlene og ressursene til annet forebyggende vedlikehold.

I analysen og i faktisk oppbyggingen av nettet er alle BTS-er bygget opp likt, og beregnet å ha samme pålitelighet. Dette betyr at en BTS på en lite trafikkert bane har like prioritet som en BTS på en bane med høy trafikk. Ved feil vil begge disse bli reparert innenfor samme tidsfrist. Det som er interessant fra et vedlikeholdssynspunkt er om begge BTS-ene trenger å være likt bestykket. BTS-er som er bygget nær byer har som oftest bedre pålitelighet på ekstern strømforsyning, og feil blir raskere rettet grunnet kortere reisevei. BTS-er som ligger lengre vekk fra byer vil mest sannsynlig ha litt dårligere ekstern strømforsyning, og det tar lengre tid å rette feil grunnet lengre reisevei. For å forbedre nettets totale pålitelighet, men fortsatt holde oss innfor de økonomiske rammene. Kan det var interessant å vurdere å redusere batterikapasiteten på BTS-er i sentrale strøk, for deretter å øke den på BTS-er i områder hvor en opplever hyppige og lange strømbrudd. Som vist i denne oppgaven er ca. 24 % av alle hendelser relatert til problemer med ekstern strøm eller intern strømforsyning. En styrking av batteribanken i områder med hyppige og lange strømbrudd vil gi bedre tilgjengelighet for GSM-R nettet totalt sett. Dette momentet bør tas med i vurderingen når JBV planlegger en fornyelse av radionettet rundt 2020. Eventuelt kan dette gjennomføres tidligere i forbindelse med fornyelse av eksisterende batteribanker. Det må da i den forbindelse kartlegges hvilke BTS-er som skal få økt batterikapasiteten og hvilke som skal få redusert batterikapasiteten.

4.7. Anbefalinger for videre arbeid

Videre arbeid basert på denne oppgaven kan være en analyse av hva JBV trenger å forbedre i GSM-R nettverket, for å kunne innføre et pålitelighetskrav på linje med kravet til SIL 1. Dette betyr i praksis at hele systemet må analyseres mer i detalj, og spesielt radio- og transmisjonsnettene må analyseres nærmere.

Mere og mere av transmisjon i GSM-R blir lagt over på Jernbaneverkets eget fiberbaserte transmisjonsnett, NGN. Det vil dermed være naturlig med en nærmere analyse av dette nettet, og spesielt dets rolle i forbindelse med nytt geografisk redundant kjernenett som skal være ferdig bygget sommeren 2015. NGN er selve bæreren for all transmisjon i denne løsningen.

Ikke bare transmisjonsnettene (NGN) bør analyseres i forbindelse med nytt geografisk redundant kjernenett, men også alle de andre elementene som inngår. Dette nett har en kompleks oppbygging med mange relasjoner og dublering av alt utstyr. På tross av denne dubleringen kan man ikke være sikker på virkemåten for alle avhengigheter og forutsetninger er analysert nøye.

I denne oppgaven er analysen av kommunikasjonsløsningen for tunneler utelatt. GSM-R har utstyr i over 600 tunneler som alle har egen strømforsyning og batteribanker. Disse batteriene vil på lik linje med batteriene til BTS-er utgjøre en betydelig kostnad for JBV å vedlikeholde. I tillegg har JBV krav om at påliteligheten til GSM-R skal være like godt i tunneler som ellers langs jernbanen. Det bør derfor også gjennomføres en analyse av påliteligheten til kommunikasjonsløsningen for tunneler.

5. Forkortelser brukt i denne oppgaven

ATC	Automatic Train Control	MOU	Memorandum of . Understanding
BSC	Base station controller		
BTS	Base Transiver Station	MS	Mobile Subscriber
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization	MSC	Mobile Switching Center
CMDB	Configuration Management DataBase	MTTBF	Mean Time Between Failure
CTC	Central Train Control	MTTF	Mean Time To Failure
D	Dangerous	MTTR	Mean Time To Repair
DD	Dangerous Detected	NGN	Next Generation Network
DU	Dangerous Undetected	NSN	Nokia Siemens Network
EBSC	Enhanced Base Transiver Station	OREDA	Offshore REliability DAta
EIRENE	European Integrated Radio Enhanced Network	PFD	Probability of Failure on Demand
ERA	European Railway Agency	PLL	Potential Loss of Life
FAR	Fatal Accident Rate	RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety
FMECA	Failure mode, effects and criticality analysis	RCM	Reliability Centered Maintenance
Frequentis	Produsent av Togleder telefoni system	RL	Radio Linje
FTS	Frequentis togledertelefoni system	S	Safe
GSM-R	Global System for Mobile Communication-Rail	SD	Safe Detected
IN	Intelligent node	SFF	Safe Failure Fraction
IP	Internet Protocol	SIF	Safety Instrumented Function
IT	Inforamsjon Teknologi	SIL	Safety Integrity Level
JBV	Jernbaneverket	SIS	Instrumenterte sikkerhetssystemer
IRPA	Individual Risk Pr. Annum	SU	Safe Undetected
ITIL	Information Technology Infrastructure Library	TRAU	Transcoder unit
MDT	Mean down time	TXP	Lokal trafikkleder
MORANE	MOBilie RAdio for railway Networks I Europe	U	Unavailability
		UIC	International Union of railways
		VR	Voice recorder
		WO	Work Order

Bibliografi

Arthur D. Little International Inc. 1999. *Development of a strategic plan for the transformation to a GSM-R system.* Oslo : Arthur D. Little International Inc, 1999.

Arthur D. Little International Inc. 1998. *Evaluating the oppotunities of GSM-R.* Oslo : Arthur D. Little International Inc, 1998.

Arthur D. Little International Inc. 2000. *Input parameters analogue world, -evaluation renewal on Main Lines, - evaluation extension alaong Additional Lines.* Oslo : Arthur D. Little International Inc, 2000.

Arthur D. Little International Inc. 2000. *Input parameters for teh evaluation of re-investing and maintainining Jernbaneverkes's Analogue Radio Systems (Main Lines and Additional Lines).* Oslo : Arthur D. Little International Inc, 2000.

Arthur D. Little International Inc. 2000. *Input parametrs for planning of the GSM-R Business Case Model.* Oslo : Arthur D. Little International Inc, 2000.

Arthur D. Little International Inc. 1998. *Result of workshop October 23, 1998 GSMR-R.* Oslo : Arthur D. Little International Inc, 1998.

BI. 2010. Når toget ikke går. [Online] 4 9, 2010. [Cited: 1 26, 2013.]
<http://www.bi.no/forskning/News/Nyheter-2010/Nar-toget-ikke-gar/>.

Exprosoft. CARA FaultTree. [Online] [Cited: 1 25, 2013.]
<http://www.exprosoft.com/products/cara.html>.

FLAMMINI, Francesco. 2012. *Railway Safety, Reliability, and Security. Technologiies and Systems Engineering.* Hershey : Information Science Reference, 2012. ISBN 978-1-4666-1643-1.

GNB. 2001. *GNB-Battery-Marathon-frontterminal-155-datasheet-12549649031.* 10 2001.

Jernbaneverket . 2001. *GSM-R i Jernbaneverket. Effekt av investeringen med fokus på sikkerhet.* Oslo : Jernbaneverket, 2001.

Jernbaneverket Banesystem. 2002. *Utbygging av radiokommunikasjon.* Oslo : Jernbaneverket hovedkontoret, 2002.

Jernbaneverket. 2003. Contract no. K000158 between Jernbaneverket Utbygging and Simens AS concerning GSM-R Systems Delivery. *Binde 2 (of 5) Exhibit E - Specifications.* Oslo, Norway : Jernbaneverekt, 08 20, 2003.

Jernbaneverket. 2011. *GSM-R systemt vurderer gevinsten ved et SIL 1-sertifisert GSM-R system.* Oslo : Jernbaneverekt Bane Nett, 2011.

Jernbaneverket Hovedkontor, HolteProsjekt Consulting, Advokatfirmaet Wiersholm, Melbye og Bech. 2002. *Risikoanalyse av eierskap til GSM-R-system / Bane Tele.* Oslo : Jernbaneverket Hovedkontor, 2002.

Jernbaneverket. 2011. Sikkerhetshåndboken - Grunnlag for Jernbaneverkets risikoakseptkriterier. [book auth.] Liv Bjørnå Mona Tveraaen. *STY-601478.* Oslo : Jernbaneverket, 2011, p. 5.

- Jernbaneverket. 2011.** Sikkerheshåndboken - Risikoakseptkriterier. [book auth.] Liv Bjørnå Mona Tveraen. *Sikkerheshåndboken*. Oslo : Jernbaneverket, 2011, p. 5.
- Jernbaneverket. 2001.** Sikkerheshåndboken - Sikkerhetsstyring. [book auth.] Liv Bjørnå Mona Tveraen. *Sikkerheshåndboken*. Oslo : Jernbaneverket, 2001, p. 5.
- Jernbaneverket. 2008.** *Sikkerheshåndboken, Dok. nr. i Pro.Arc: STY-3959*. Oslo, Norge : s.n., 06 15, 2008.
- Jernbaneverket. 2012.** Teknisk Regelverk. [Online] 10 5, 2012. [Cited: 11 11, 2012.] <https://trv.jbv.no/wiki/Hovedside>.
- Jernbaneverket. 2012.** Årsrapport 2011. *www.Jernbaneverket.no*. [Online] 3 9, 2012. [Cited: 01 24, 2013.] <http://www.jernbaneverket.no/PageFiles/18952/%c3%85rsrapport%20-%202011%20JBV%201.0.pdf>.
- Nokia Siemens Networks. 2009.** *Failure modes - Effects and Criticality analysis Frequentis*. Oslo : Jernbaneverket, 2009. p. 1+26. GSM-00_q-20009.
- Jernbaneverket. 2009.** *Network Design BSS incl GPRS*. Oslo : Jernbaneverket, 2009. GPR-20-A-2009.
- Jernbaneverket. 2008.** *RAMS - Total network incl GPRS*. Oslo : Jernbaneverket, 2008. p. 86. GPR-00-A-20032.
- Jernbaneverket. 2012.** *RAMS Total network incl GPRS, VR and Flexi-BSC*. Oslo : Jernbaneverket, 2012. GPR-00-A-20032.
- Jernbaneverket. 2011.** *RAMS-Total network incl GPRS and eBSC*. Oslo : Jernbaneverket, 2011. p. 77. GPR-00-A-20032.
- Jernbaneverket. 2009.** *Sikkerhetsvurdering GSM-R inkl. GPRS/EDGE*. Oslo : Jernbaneverket, 2009. p. 23, Intern rapport JBV. GPR-20-Q-20002.
- NVE. 2009.** Tiltak for å redusere sannsynligheten for at et område er strømløst over lang tid. [Online] 09 2009. <http://www.nve.no/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202009/Rapport%202009/rapport2-09.pdf>.
- OLF. 2004.** *Application of IEC61508 and IEC 61511 in the Norwegian petroleum industry*. s.l. : OLF, 2004.
- P. Wüchner, K. Al-Begain, J. Barner, G Bolch.** *Modelling a single GSM/GPRS cell with delay tolerant voice calls using Mosel-2*. Pontypridd : University og Glamorgan.
- PTIL. 2012.** Prinsipper for barrierestyring i petroleumsvirksomheten. *www.ptil.no*. [Online] 5 4, 2012. [Cited: 1 23, 2013.] <http://www.ptil.no/getfile.php/PDF/Prinsipper%20for%20barrierestyring%20i%20petroleumsvirksomheten.pdf>.
- Rausand, Marwin and Høyland, Arnljot. 2004.** *System Reliability Theory, Models, Statistical Methods, and Applications. Second Edition*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons inc., 2004.
- Saft Batteries Industrial groups. 2010.** Tel.X High density nickel-cadmium battery. [Online] 03 22, 2010. www.safebatteries.com.

Samferdseldirektoratet. 2011. FOR 2011-04-11 nr 388: Forskrift om nasjonale tekniske krav m.m. for jernbaneinfrastruktur på det nasjonale jernbanenettet (jernbaneinfrastrukturforskriften). FOR-2011-04-11-388. [Online] 04 11, 2011. <http://www.lovdata.no/for/sf/sd/xd-20110411-0388.html>.

SSB. Tabell: 07032: StatRes. Jernbaneanverket. Resultater . [Online] Statistisk sentralbyrå. [Cited: 11 24, 2013.]
http://statbank.ssb.no/statistikkbanken/Default_FR.asp?PXSid=0&nvl=true&PLanguage=0&tilside=selecttable/hovedtabellHjem.asp&KortnavnWeb=jbv_statres.

Statens jernbanetilsyn . FOR-2008-07-04-790 . *Forskrift om gjennomføring av vedtak 2008/ 163/EF av 20. desember 2007 om den tekniske spesifiseringen for samtrafikkvegne vedrørende sikkerhet i jernbanetunneler i det transeuropeiske jernbanesystemet for konvensjonelle tog og høyhastighetstog (TSI-sikkerhet)*. Oslo : SD (Samferdselsdepartementet) , FOR-2008-07-04-790 .

Statens Jernbanetilsyn. FOR-2008-02-29-240. *Forskrift om togframføring på det nasjonale jernbanenettet (togframføringsforskriften)*. Oslo : Statens jernbanetilsyn, FOR-2008-02-29-240.

Statens Jernbanetilsyn. 2012. *Sikkerhetsrapport 2011*. Oslo : SJT, 2012.

Statistisk Sentralbyrå. 2012. Jernbaneanverket - StatRes. [Online] 11 3, 2012. [Cited: 11 3, 2012.]
http://www.ssb.no/jbv_statres/.

TØI. 2012. Verdsetting av tid og pålitelighet for godstransport på jernbane. [Online] 3 2012. [Cited: 1 26, 2013.] <https://www.toi.no/getfile.php/Publikasjoner/T%D8I%20rapporter/2012/1189-2012/1189-2012-elektronisk.pdf>.

UIC Project EIRENE. 2006. *Functional Requirements Specification*. s.l. : UIC, 2006. Versjon 7. PSA167D005.

Utne, Marwin Rausand og Ingrid Bouwer. 2009. *Risikoanalyse - teori og metoder*. Trondheim : Tapir Akademiske Forlag, 2009.

Vatn, Jørn. 2007. *Veien frem til "World Class Maintenance", Maintenance Optimisation*. Trondheim : NTNU, 2007.

Vedlegg A MTBF grunnlagsdata fra leverandører

Subsystem	Funksjon	MTBF (timer)	Utetid (min/år)	Tilgjengelighet %	Feilrate λ	TTR	Merknad
Radiolinje	HW, hele systemet nede	26667	158	99,97	$3,8*10^{-5}$	8	Side 48 RAMS - Total network incl GPRS (Nokia Siemens Networks, 2008)
BTS 240	HW, hele systemet nede	$2,31*10^5$	18	99,996537	$4,3*10^{-6}$	8	Side 52 RAMS – Total network incl GPRS (Nokia Siemens Networks, 2008)
Leid line (LL)	En linje nede	1600	2628	99,5	$1,6*10^{-6}$	8	Side 48 RAMS - Total network incl GPRS (Nokia Siemens Networks, 2008)
Likeretter	HW, hele systemet nede	213632	20	99,996255	$4,7*10^{-6}$	8	Side 39 RAMS - Total network incl GPRS (Nokia Siemens Networks, 2008)
Ekstern strøm	HW, hele systemet nede	4380	480	99,908676	$2,3*10^{-4}$	4	Fos § 7 (NVE, 2009) Leveringspunkt skal være spenningsatt og ha tilstrekkelig kapasitet innen to timer. (Leveringspunkt med ensidig forsyning skal være spenningsatt og ha tilstrekkelig kapasitet innen fire timer). Et tilknytningspunkt i sentralnettet skal ha maksimalt to avbrudd pr. år.
Batterier	HW, redundans strømforsyning nede	105120	40	99,99239	$9,5*10^{-6}$	8	Side 2 GNB-Battery-Marathon-frontterminal-155-datasheet-12549649031.pdf (GNB, 2001)
EBSC	HW, hele systemet nede	$5,59*10^6$	1	99,99985682	$1,8*10^{-7}$	8	Side 34 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
TRAU	HW, hele systemet nede	$1,34*10^6$	3	99,99940378	$7,5*10^{-7}$	8	Side 28 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
HLR	HW, hele systemet nede	8768760	0,5	99,99990877	$1,1*10^{-7}$	8	Side 24 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
MSC	HW, hele systemet nede	6981720	0,6	99,99988542	$1,4*10^{-7}$	8	Side 23 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
IN	HW, redusert funksjonalitet	$8,00E+05$	5,2	99,999	$1,2*10^{-7}$	8	Side 51 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
VR	HW, redusert funksjonalitet	256843	16	99,99688526	$3,9*10^{-6}$	8	Side 73 RAMS-Total network incl GPRS, VR and Flexi-BSC (Nokia Siemens Networks, 2012)
Strøm Marien-borg	HW, hele systemet nede	1979608	1	99,99979794	$5,1*10^{-7}$	4	Side 51 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
Linje TRAU - MSC	HW, hele systemet nede	$1,34E+06$	3	99,99940454	$7,5*10^{-7}$	8	Side 29 RAMS-Total network incl GPRS and eBSC (Nokia Siemens Networks, 2011)
Routing server					$2,0*10^{-5}$	8	Side 4 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)

Subsystem	Funksjon	MTBF (timer)	Utetid (min/år)	Tilgjengelighet %	Feilrate λ	TTR	Merknad
CIF					$2,6 \cdot 10^{-5}$	8	Side 4 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
JIF					$2,2 \cdot 10^{-5}$	8	Side 4 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
ACDC					$6,7 \cdot 10^{-6}$	8	Side 5 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
GPIF_C					$7,8 \cdot 10^{-6}$	8	Side 6 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
Dicora					$1,4 \cdot 10^{-5}$	8	Side 8 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
Audiomodul					$9,1 \cdot 10^{-6}$	8	Side 8 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
T0					$7,0 \cdot 10^{-6}$	8	Side 10 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
GPIF_R					$7,9 \cdot 10^{-6}$	8	Side 10 Failure modes-Effects and Criticality analysis Frequentis (Nokia Siemens Networks, 2009)
Flatpack 1500					$4,7 \cdot 10^{-6}$		
NGN				99,8%	$114,178 \cdot 10^{-6}$	2	

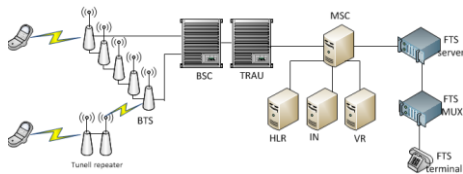
Vedlegg B Modeller for beregning av tilgjengelighet i GSM-R nettet.

Systemkontrakten Exhibit E (Jernbaneverket, 2003) angir 5 forskjellige metoder for hvordan tilgjengelighet i GSM-R systemet skal beregnes. Disse metodene er angitt i Systemkontrakten Exhibit E punkt 6.1.1.1.3 til 6.1.1.1.7 (Jernbaneverket, 2003) og angir kalkulasjonsmetoder for tilgjengeligheten i følgende scenarier:

BTS – Togledersentral

Tilgjengeligheten til GSM-R er avhengig av at den komplette kjede av nettverkselementer fra BTS til toglederterminal virker med full funksjonalitet. Dette er som å forstå som sannsynligheten for at:

- en spesifikk BTS (inkludert tilhørende tunnelsystem) virker med full funksjonalitet.
- vellykket kommunikasjon mellom BTS og BSC
- BSC fungerer med full funksjonalitet
- alle sentrale GSM-R elementer (kjerne og støttesystemer) fungerer med full funksjonalitet. I denne sammenheng forstås GSM-R togledersystem som alle sentrale enheter, grensesnitt mot spesifikk toglederterminal og spesifikk toglederterminal.

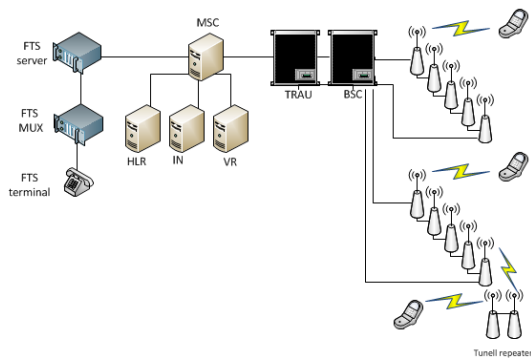


Figur 0-1 BTS – Togledersentral

Kringkastingsmelding mellom Togledersentral til flere BTS-er

Tilgjengeligheten til GSM-R nettverket er slik at kringkastingsmeldinger vellykket kan bli sendt gjennom en komplett kjede av nettverkselementer fra en toglederterminal til 10 etterfølgende BTSer: Dette er som å forstå som sannsynligheten for at:

- GSM-R togledersystem virker med full funksjonalitet. I denne sammenhengen forstås GSM-R togledersystem som alle sentrale enheter, grensesnitt mot spesifikk toglederterminal og spesifikk toglederterminal.
- GSM-R togledersystem kommuniserer med full funksjonalitet med GSM-R sentrale systemer (kjerne og støttesystemer).
- GSM-R sentrale systemer (kjerne og støttesystemer) fungerer med full funksjonalitet.
- GSM-R sentrale systemer (kjerne og serviceplattform) kommuniserer med BSC med full funksjonalitet.
- BSC fungerer med full funksjonalitet. BSC kommuniserer vellykket med 10 etterfølgende BTS-er.
- 10 etterfølgende BTS-er (med tilhørende tunnelsystemer) virker med gitt funksjonalitet.



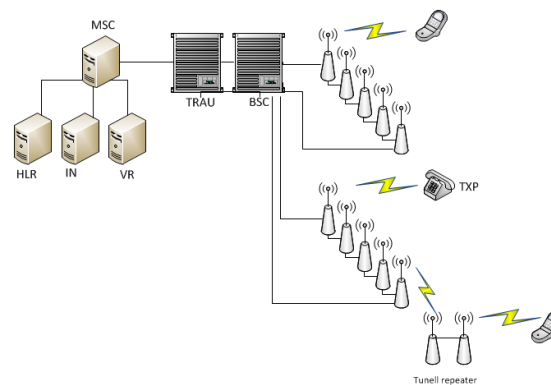
Figur 0-2 Kringkastingsmelding fra Toglederterminal til flere BTS-er

BTS – Lokal trafikkleder (TXP)

GSM-R systemet er tilgjengelig som en komplett kjede av nettverkselementer fra en BTS til lokal toglederterminal som fungerer med gitt funksjonalitet. Dette er å forstå som sannsynligheten for at:

- en BTS (inkludert tilhørende tunnelsystem) fungerer med gitt funksjonalitet.
- BTS kommuniserer med BSC med full funksjonalitet.
- BSC virker med full funksjonalitet.
- BSC kommuniserer med GSM-R sentrale elementer (kjerne og serviceplattform).
- alle GSM-R sentrale elementer (kjerne og serviceplattform) fungerer med gitt funksjonalitet.
- GSM-R sentrale elementer (kjerne og serviceplattform) kommuniserer vellykket med de sentrale systemer for GSM-R togledersystem, som fungerer med full funksjonalitet.

- GSM-R sentrale systemer (kjerne og serviceplattform) kommuniserer vellykket med BSC.
- BSC fungerer med gitt funksjonalitet.
- BSC kommuniserer vellykket med en BTS (som lokal toglederterminal er tilkoblet).
- BTS (som lokal toglederterminal er tilkoblet) fungerer med full funksjonalitet.
- Lokal toglederterminal fungerer med full funksjonalitet.



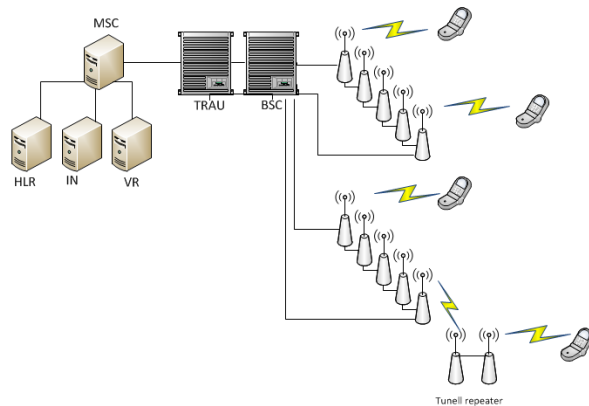
Figur 0-3 BTS lokal toglederterminal

BTS – BTS

GSM-R systemet er tilgjengelig hvis den komplette kjede av nettverkselementer fra en BTS til en annen BTS fungerer med full funksjonalitet. Dette er å forstå som sannsynligheten for at:

- en spesifikk BTS (inkludert tilhørende tunnelsystem) fungerer med full funksjonalitet.
- BTS kommuniserer vellykket med BSC.
- BSC fungerer med full funksjonalitet.

- BSC kommuniserer vellykket med GSM-R sentrale systemer (kjerne og serviceplattform).
- alle GSM-R sentrale systemer (kjerne og serviceplattform) fungerer med gitt funksjonalitet.
- GSM-R sentrale elementer (kjerne og serviceplattform) kommuniserer med BSC.
- BSC fungerer med full funksjonalitet.
- BSC kommuniserer vellykket med gitt BTS.
- BTS (inkludert tilhørende tunnelsystem) fungerer med gitt full funksjonalitet



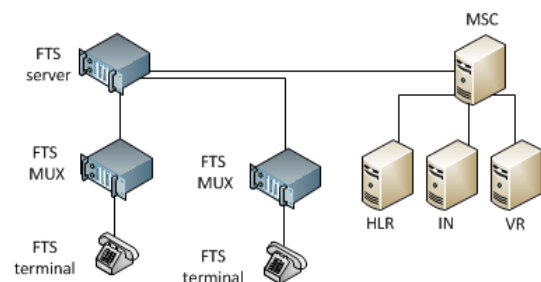
Figur 0-4 BTS –BTS

Togleder – Togleder

GSM-R systemet er tilgjengelig hvis den komplette kjede av nettverkselementer fra sentral toglederterminal til sentral

toglederterminal fungerer med gitt funksjonalitet. Dette er å forstå som sannsynligheten for at:

- En sentral toglederterminal fungerer med full funksjonalitet.
- Sentral toglederterminal kommuniserer vellykket med sentrale deler av GSM-R togledersystemet.
- Sentrale deler av GSM-R togledersystemet kommuniserer vellykket med en fungerende toglederterminal.

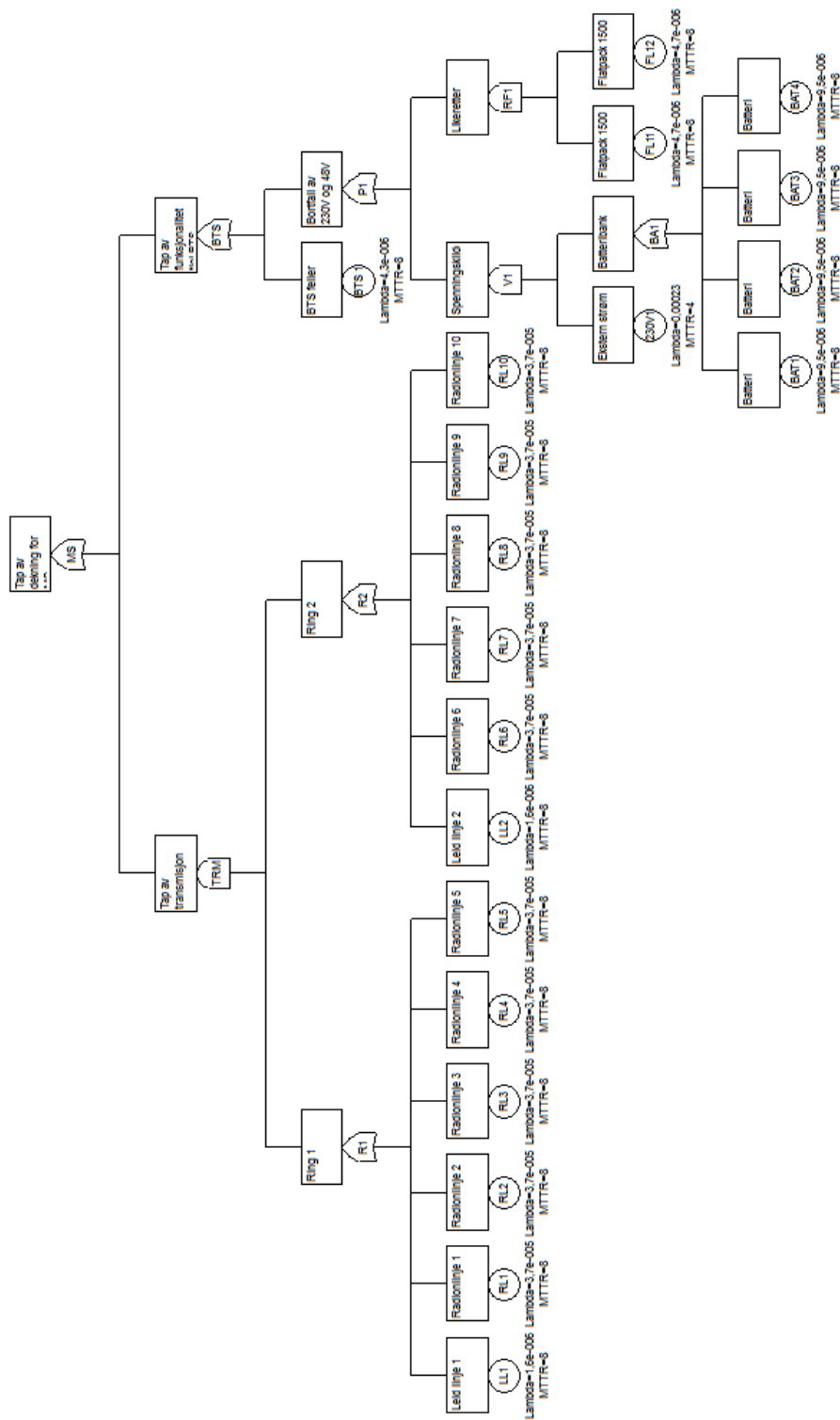


Figur 0-5 Togleder - Togleder

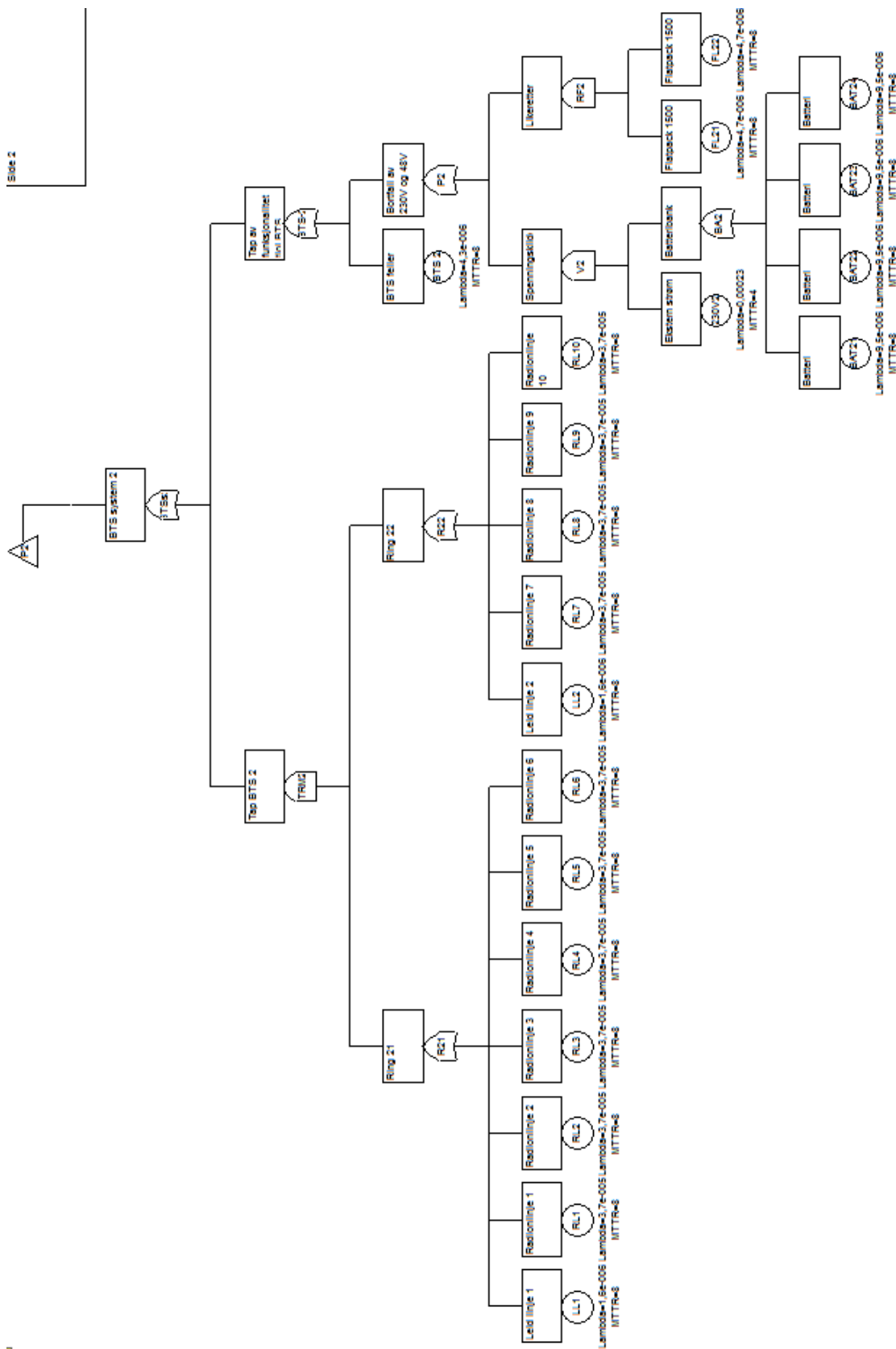
Felles for alle disse kalkulasjonsmetodene er et kravet om en tilgjengelighet på 99,975%.

Systemkontrakten Exhibit E punkt 6.1.1.1.8 (Jernbaneverket, 2003) angir at kravet om en tilgjengelighet på 99,975 % gjelder uavhengig av geografisk start og slutt punkt i de fem metodene for beregning av tilgjengeligheten.

Vedlegg C Feiltre for Radio og Transmisjonsnett



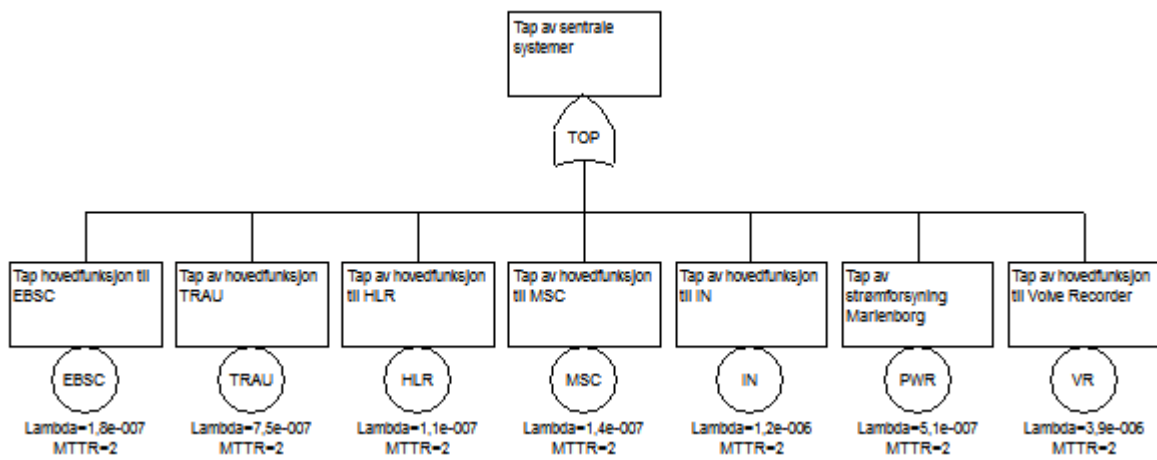
Figur D-0-1. Feiltre for tap av dekning for MS som er under dekning av en BTS



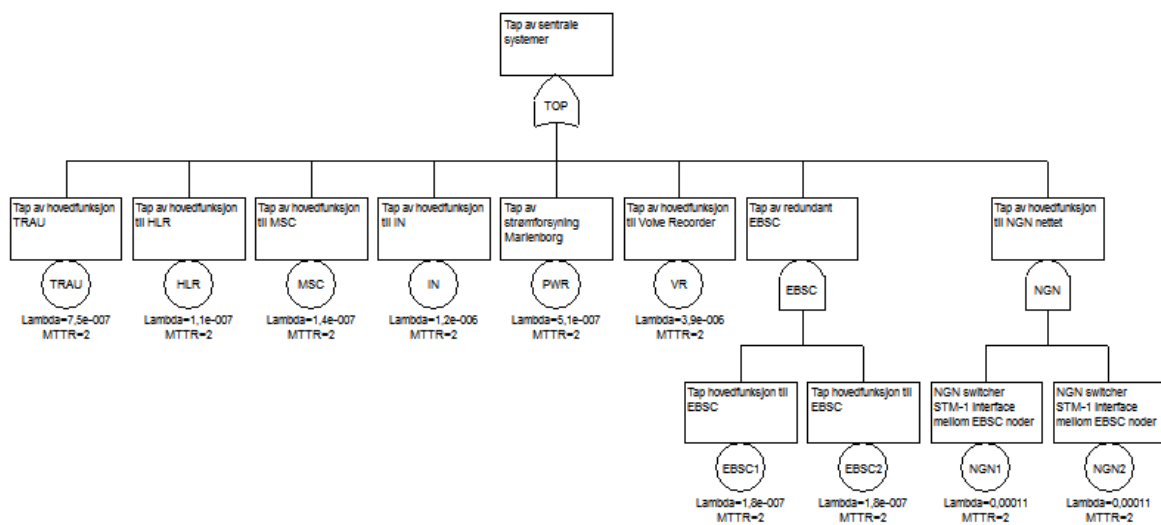
Side 2

Figur D-2. 2/2 Feiltre for tap av dekning til MS som er under dekning av to BTS-er

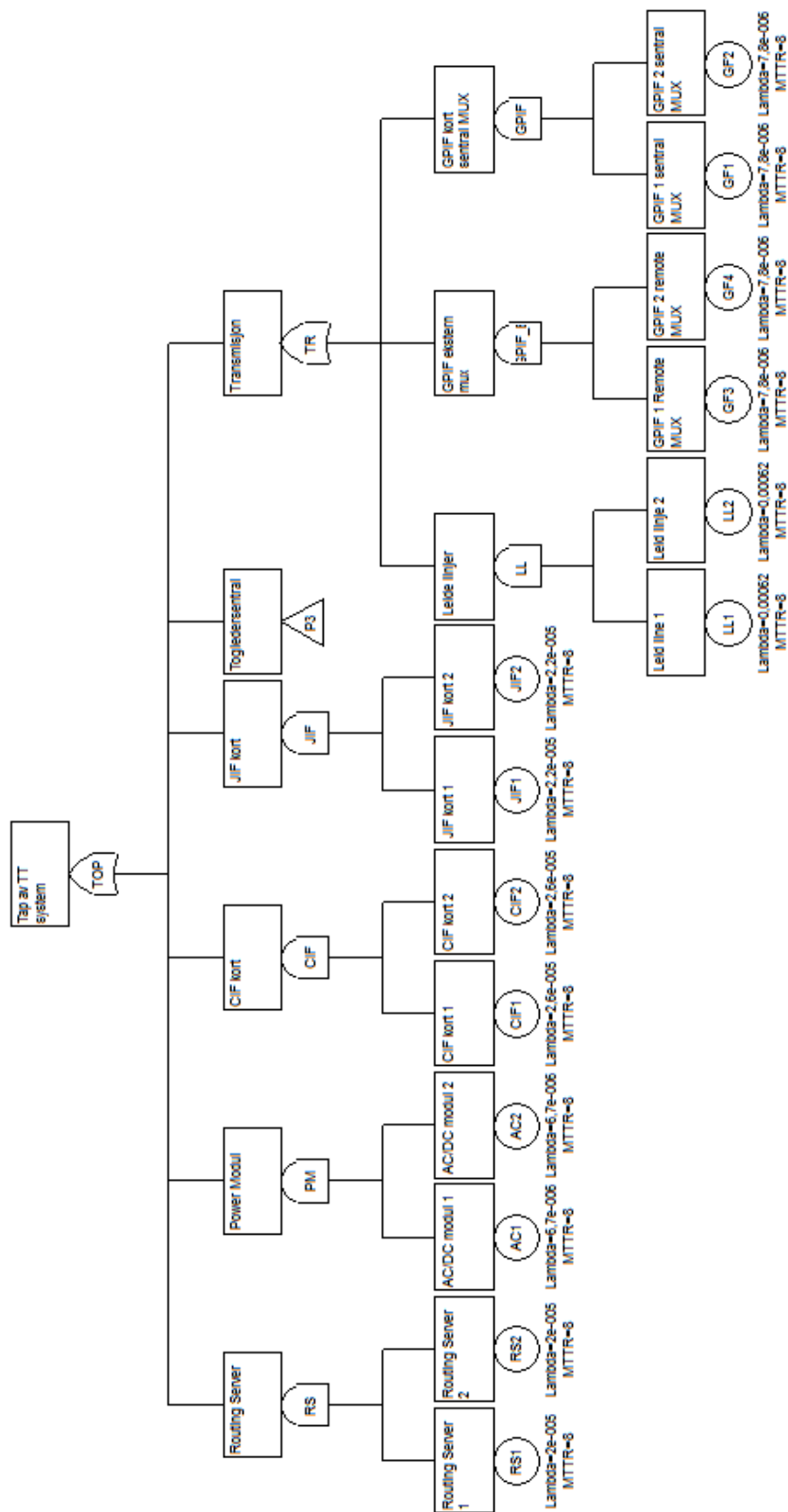
Vedlegg D Feiltre for sentrale systemer



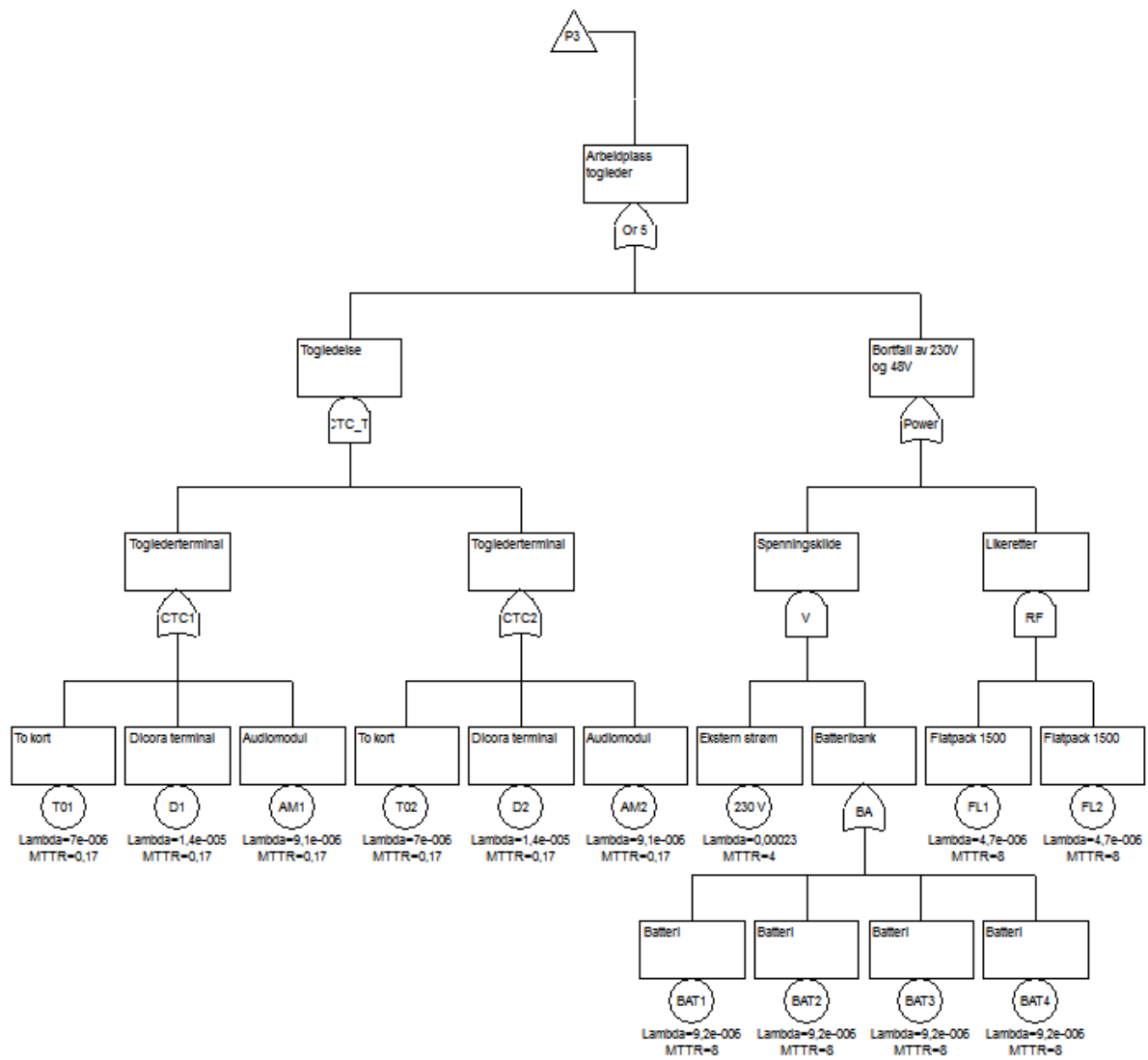
Figur E-0-1. Feiltre sentrale systemer uten redundant EBSC og NGN



Figur E-0-2 Feiltre sentrale systemer med redundant EBSC og NGN



Figur F 0-2. ½ Feiltre Frequentis med redundant Dicora



Figur F 0-3. 2/2 Feiltre Frequentis med redundant Dicora

