

Feilanalyse og tilstandsovervåkning av togdeteksjonssystemer

Olav Kallerud

Master i kybernetikk og robotikk

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Tor Engebret Onshus, ITK

Medveileder: Morten Schjelderup, Jernbaneverket

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for teknisk kybernetikk

Forord

Denne rapporten er skrevet som en masteroppgave ved institutt for teknisk kybernetikk på NTNU, i Trondheim våren 2016. Arbeidet med rapporten er utført i samarbeid med Jernbaneverket. Masteroppgaven har en vekt på 30 studiepoeng. I arbeidet er det brukt mye tid på å sette seg inn i og sammenstille feil fra Banedata på en god måte.

Denne rapporten skulle i utgangspunktet inkludere en analyse av pilotsystemet på tilstandsovervåking av sporfelt som installeres i skrivende stund. Systemet var skulle være ferdig i mars/april, 2016, men implementeringen ble forsinket på grunn av forskjellige problemer knyttet installeringen av systemet. Dermed ble rapporten gjennomført uten å ta for seg nevnte system.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder fra instituttet, Tor E. Onshus, og mine veiledere Anna Gjerstad, Vidar Larssen og Morten Schjelderup, i Jernbaneverket. I tillegg har jeg hatt mange bidragsytere i Jernbaneverket: Tor Johnny Moen, Jørgen Torgersen, Johanne Norstein Klungre, Erik Magnus Einarsen og Norsk Jernbaneskole. Tusen takk for all hjelp!

Sammendrag

Denne rapporten tar for seg hvordan man kan forbedre og opprettholde pålitelighet og tilgjengelighet av sporfelter, som en del av sikringsanlegget på jernbanen. Metodene som gjennomføres for å belyse denne oppgaven er en rotårsaksanalyse og forslag til hvordan man kan tilstandsovervåke sporfeltene. Sporfeltsystemet har en lav grad av feilåpenbaring, feil vises stort sett i form av stoppsignaler og senere togstans. På grunn av dette er det et stort behov for bedre innsikt i feil og årsakene til disse, som forekommer på sporfeltene. Målet er å kunne detektere og utbedre feilene før de medfører driftsstans.

Sporfeltfeil er analysert i rotårsaksanalysen, som er bygget på feil registrert i Banedata, Jernbaneverkets database for feil registreringer på infrastruktureobjekter. Datasettet hentet fra Banedata inneholder feil på objektene sporfelt og sporfeltreléer, dataene er fra tidsrommet 2010-2015. Dette datasettet består av to feilkodesett, henholdsvis nytt og gammelt, som er holdt separert for å kunne brukes til sammenligning. Rotårsaksanalysen er bygget opp av tre deler, «critical incident»-tabeller, «parteo»-diagrammer og «cause-and-effect»-diagrammer.

Første del, «critical incident»-tabellene, er en feiloversikt som viser de mest forekommende feil sortert på feilkategorier. De hyppigste feilene er «ingen feil funnet», «andre feil», «kortslutninger» og «isolert skinneskjøt». Fellestrekkene mellom feilkodesettene er «ingen feil funnet» og «andre feil», altså feilen er ikke funnet eller så har den havnet i en samlekategori. Kategorien med kortslutninger kan i tillegg representere et sporfeltbelegg, uten at en spesifikk feil er funnet. Sistnevnte kategori representerer nesten halvparten av feilene i det gamle feilkodesettet.

Andre del, er «pareto»-diagrammene gir en grafisk representasjon av årsakene til feil, i samme datasett i Banedata. Paretodiagrammene viser antallet feil fordelt på årsakskategoriene gitt av et histogram, og akkumulert antall feil som en punktgraf i samme figur. Dette er sammenfallende med resultatene presentert i «critical incident»-tabellene, der majoriteten av feilene er «ukjent årsak». Etter dette er «metallspon», «andre årsaker», ikke-utfylt årsak og «støv/skitt/annet belegg» høyt representert som årsaker til feil. I begge feilkodesettene representerer «ukjent årsak» rett i underkant av en fjerdedel av alle feilene. Dette resulterer i de mest angripende årsakene feil er metallspon og støv/skitt/annet belegg. Selv om den største kategorien med feil forblir ukjent.

Tredje del, «cause-and-effect»-diagrammene, er laget for å vise sammenheng mellom feil og årsaker. Diagrammene viser hvilke årsaker som direkte og indirekte forårsaker feil, disse defineres som henholdsvis første- og høyere ordens årsaker. Av dette vet vi at «critical incident»-tabellene og «pareto»-diagrammene angir kortslutninger og blunkbelegg som store kategorier. Diagrammet brukes til å se sammenhenger mellom feil og årsak på et høyere abstraksjonsnivå enn de foregående delene av rotårsaksanalysen.

For å forbedre eksisterende feilåpenbaring kan tilstandsovervåkning brukes til overføre de mange AKV-feilene som kan observeres i «critical incident»-tabellene, til UKV, eller forebyggende vedlikehold. Problemet med dagens situasjon er liten kontroll over sporfeltene og feil i hovedsak detekteres ved driftsfeil, altså feil på sporfeltene som medfører stoppsignaler. Målet er å kunne detektere begynnende feil for å kunne utbedre disse, før driftstans inntreffer. Til dette systemet er det diskutert oppbygning av et slikt system ved tastefrekvens, målemetoder, PF-intervall, hvor målingene skal utføres i sporfeltkretsen og behandles av et overordnet analysesystem. Alt dette er til for å kunne innhente og bruke informasjonen til mest mulig effektivt vedlikehold med et slikt overvåkningssystem.

Et tilstandsovervåkningssystem vil medføre en stor forbedring i kontroll med sporfeltene, en kontroll som er nærmest ikke-eksisterende i dag. Mulighetene for å overføre mange av AKV-feilene til UKV er der, forutsatt at PF-intervallene til sporfeltfeil er tilstrekkelig store. Man vil kunne hente inn målinger fra sporfeltene mye hyppigere enn med dagens inspeksjoner, og det vil ikke ta av sporkapasiteten. Målinger bør utføres i tilførsel- og returkrets for å fange opp langtidseffekter, altså funksjonsfall over lang tid, i tillegg til forskjeller i strømnivåer på de ulike stedene. På toppen av dette vil det være mulig å identifisere feil ved feilenes karakteristiske transiente strøm-oppførsel, konkrete eksempler på denne typen transientkurver er presentert i rapportens diskusjon.

Tilstandsovervåkning vil kunne bedre dagens oppetid på sporfeltene, ved å gi mulighet til å utbedre feil før de blir kritiske. Identifisering av feil og årsaker vil bli lettere når tilstandsovervåkning kan bidra til identifikasjon av disse, uten at dette krever mye tid og ressurser fra vedlikeholdspersonell. Dermed vil man få bukt med overrepresentasjonen av ukjente feil og -årsaker. Dette vil da erstatte mer konkrete og angripelige grunner, i tillegg til å kunne få bedre innsikt i blunkbelegg, som det er mye av. Sistnevnte feiltipe har sannsynligvis store mørketall. Et analysesystem vil være i stand til å kombinere flere datakilder for å kunne komme med prediksjoner på feil. Et analysesystem sammen med tilstandsovervåkning vil kunne

detektere en større mengde feil og sannsynligvis også gi indikasjon på økt sannsynlighet for feil basert på datakilder.

Abstract

This report will treat how to improve and sustain reliability and availability of track circuits, as a part of the security system on the railroad. The methods used for this purpose is a root cause analysis and on how to use conditional monitoring for oversee the track circuits is proposed. The track circuits mostly used in Norway has a low degree of failure revelation; most of the failures is detected as stop signals resulting in traffic delays. The aim is to be able to detect and improve a coming failure before it causes traffic delay.

Track circuit errors is analyzed in the root cause analysis, from data retrieved from “Banedata”, the database for error reports on the Norwegian railway infrastructure. The dataset from “Banedata” contains registered failures on track circuits and track circuit relays, the dataset used is from 2010-2015. The dataset includes two sets of error codes, the new and old respectively, this is kept separate and is used for comparison of the two. The root cause analysis separated into three parts, critical incident tables, pareto charts and the last is cause-and-effect diagrams.

The first part containing the critical incident tables is a containing the errors separated by their class of error. The most common errors is “no failure found”, “other errors”, “short circuits” and “isolated rail joint”. The relation between the two sets of error codes is “no failure found” and “other errors”, in other words, the failure is either not found or it is represented by a general category of failure. The class of errors with “short circuits” can represent the presence of trains, without finding a specific error. The category of short circuit errors represent nearly half of the registered failures in the set of old failure codes.

The second part is the pareto charts, which gives a graphic representation of the causes of failures. The charts shows the number of errors registered to each cause as a histogram, and the accumulated number of errors as a dotted graph in the same figure. This is quite similar to what is shown in the critical incident tables, here is most represented class of causes is “cause unknown”. Following this is the classes of “metal chips” (from breaking and general wear), “other causes”, class of cause not filled¹ and “dust/dirt/other coating”. But the biggest cause is the one which remains unknown.

¹Empty field

The third part is the cause-and-effect charts is constructed to show the connection between failures and causes. The charts shows the causes which generates failures directly and indirectly, this is represented by first- and higher order causes respectively. It can be observed by the critical cause tables and pareto charts that short circuits and transient failures² is a big classes of failures. The cause-and-effect diagram can be used to understand the connection between error and cause at a higher level of abstraction than the previous parts of this root cause analysis.

The conditional monitoring can be used to replace the critical errors(AKV) to the postponed critical errors(UKV) or preventive maintenance. The main problem of the current situation is the lack of control over the infrastructure, where failures is mostly revealed by stop signals is indicating the errors and causing delays. The aim is to be able to detect beginning failure situations and to fix this before it causes delay. The build-up of such a system is discussed, including sampling frequency, measuring methods, PF-intervals, where the measurements are conducted in the circuit and a principal system for analysis. The combination of the given elements is to collect and utilize the possibilities of conditional monitoring system for track circuits.

It can be expected a major improvement in control over the track circuits, a control which is nearly non-existent today. The possibilities to transfer the AKV to UKV/preventive maintenance is under the condition that the PF-intervals is large enough, to reduce downtime. The system will be able to increase the measurement frequency relative to the practice of today, without taking track capacity. Measurements of the track circuits should be conducted in the supply and return circuits to collect long term effects, and functional reduction over time. On top of this it will be possible to capture the transient effects of track circuit current indicating errors, including related noise. This is covered by this reports discussion.

The conditional monitoring will be able to offer an improved reliability for the track circuits, by it's way of fixing the errors before a delay in introduced. Identification of failures and causes will be more illuminated because of conditional monitoring. Because of this it will be gained a broader insight to the (root) causes of track circuits. A system for analyzing collected data, and combining with other sources will revolutionize the ability to detect developing errors in addition to predict many of them. So the conditional monitoring system will improve todays system by itself, but will be better utitized by an analysis system on top of this.

²no.“blunkbelegg”

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	vii
Innhold	ix
Figurliste	xiii
Tabelliste	xv
Definisjoner	xvii
Akronymer	xxi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	5
1.3 Målsetning	5
1.4 Avgrensing	6
1.5 Litteratur og datamateriale	6
1.6 Oppbygning	6
2 Teoretisk grunnlag	9
2.1 Sporfelter	9
2.1.1 Vekselstrømsporfelt	14
2.1.2 Likestrømsporfelt	16
2.1.3 Audiofrekvente sporfelt	16
2.1.4 Komponentene i tradisjonelle sporfelt	18
2.2 Akseltellere	23
2.3 Måleteori	25
2.3.1 Målemetoder	25

2.3.2	Indirekte måling	26
2.3.3	Filtrering	26
2.3.4	Tasting	26
2.4	Vedlikehold	32
2.4.1	Vedlikeholdsmodeller	32
2.4.2	Badekarkurven	34
2.4.3	Vedlikeholdsstrategier	34
2.4.4	Forebyggende vedlikehold	36
2.4.5	Korrektivt vedlikehold	37
2.4.6	«Reliability Centered Maintenance»(RCM)	38
2.5	Tilstandsovervåking	39
3	Metode	41
3.1	Utfordringer med rapporten	41
3.2	Data, fremgangsmåte og prosedyrer	42
3.2.1	Banedata	42
3.2.2	Værdata	44
3.2.3	Litteraturstudium	47
3.2.4	Svakheter ved analysen	48
3.2.5	Analytiske tilnærminger	48
3.3	Bearbeidelse av data, figurer, tabeller og grafer	49
4	Resultater	51
4.1	Rotårsaksanalyse	51
4.1.1	Feilfrekvens	51
4.1.2	Dataanalyse av feilgrunnlag	57
4.1.3	Rotårsakidentifikasjon	60
4.2	Klimapåvirkning	62
4.3	Målinger på sporfeltsimulator	67
5	Diskusjon	71
5.1	Rotårsaksanalyse	71
5.1.1	«Critical incident»-tabeller	72
5.1.2	«Pareto»-diagrammer	74
5.1.3	«Cause-and-effect»-diagrammer	76
5.1.4	Oppsummering av rotårsaksanalysen	77
5.2	Klimapåvirkning	78
5.2.1	Døgnverdier	78
5.2.2	Månedsverdier	79
5.3	Vedlikeholdsstrategier	81
5.4	Tilstandsovervåking	84
5.4.1	Tidligere bruk av tilstandsovervåking	84

5.4.2	Hva og hvor bør det måles?	85
5.4.3	Når og hvor ofte bør måles?	88
5.4.4	Forslag til feilkarakteristikker basert på strømkurver	90
5.4.5	Tilstandsovervåkning av rotårsaker	95
5.5	Analysesystem	96
6	Konklusjon	99
6.1	Rotårsaksanalyse og klimapåvirkninger	99
6.2	Tilstandsovervåkningens nytteverdi	100
6.2.1	Hva kan oppdages med tilstandsovervåkning?	100
6.2.2	Analyse av tilstandsovervåkingsdata	101
6.2.3	Kombinasjon av tilstandsovervåkning og andre datakilder	102
7	Videre arbeid	103
	Referanser	105
	Register	109
A	Oppgavetekst	111
B	MATLAB-kode	113
B.1	MATLAB-kode - Aliasing	113
B.2	MATLAB-kode - Overharmoniske komponenter	115
B.3	MATLAB-kode - Eksportering av figurer	116
C	Sporfeltfordeling	117
D	Rotårsak tallgrunnlag	119
E	Tallgrunnlag for figurer	123
E.1	Værdata på månedsbasis	123
E.2	Værdata på døgnbasis	128
F	Kartgrunnlag fra klimaanalysen	133

Figurliste

1.1	Oppbygning av signalanlegg	2
1.2	Sporavsnitt satt i sammenheng	3
2.1	Fordeling av sporfelttyper	11
2.2	Sporfeltets virkemåte	12
2.3	Endematet sporfelt	13
2.4	Midtmatet sporfelt	14
2.5	Skjematisk oppbygning av TI 21, audiofrekvent sporfelt	17
2.6	Skjematisk oppbygning av FTG S, audiofrekvent sporfelt	17
2.7	Sporfeltreléer i bruk per i dag	19
2.8	Skjematisk tegning av impedansspole	20
2.9	Skisse av transformator	21
2.10	Skjematisk oppbygging av sporfeltet	22
2.11	Skjematisk oppbygning av akseltellersystemet	23
2.12	Illustrasjon av signal på 95 Hz med tastefrekvens på 100 Hz	28
2.13	Illustrasjon av signal på 95 Hz med tastefrekvens på 200 Hz	28
2.14	Illustrasjon av signal på 95 Hz med tastefrekvens på 500 Hz	29
2.15	Illustrasjon av signal på 95 Hz med tastefrekvens på 1000 Hz	29
2.16	Sinuskurve med overharmoniske komponenter	31
2.17	Jernbaneverkets vedlikeholdsmodell	33
2.18	Alternativ vedlikeholdsmodell	33
2.19	Badekarkurve	34
2.20	Forebyggende- og korrektiv vedlikeholdssgrense	38
3.1	Sporfeltsimulator	42
3.2	Bansjefstrekninger	45
4.1	Paretodiagram med kategorien «Aarsak» fra gammelt feilkodesett	57
4.2	Paretodiagram med kategorien «Aarsk_nyFKS» fra nytt feilkodesett	58
4.3	Paretodiagram med kategorien «Konsevens» fra nytt feilkodesett	58
4.4	Cause-and-Effect-diagram med driftsfeil	60
4.5	Cause-and-Effect-diagram med sikkerhetsfeil	61

4.6	Døgnverdier av sporfeltfeil, temperatur og nedbør, Oslo	62
4.7	Døgnverdier av sporfeltfeil, temperatur og nedbør, Kongsvingerbanen	63
4.8	Døgnverdier av sporfeltfeil, temperatur og nedbør, Bergensbanen vest	63
4.9	Sporfeltfeil, nedbør og snødybde på månedsbasis, Støren-Trondheim S	64
4.10	Sporfeltfeil og nedbør på månedsbasis, Egersund-Stavanger	65
4.11	Sporfeltfeil og nedbør på månedsbasis, Tangen-Moelv	65
4.12	Sporfeltfeil og nedbør på månedsbasis, Blaker-Åbogen	66
4.13	Sporfeltsimulator med tastefrekvens under Nyquistfrekvensen	67
4.14	Sporfeltsimulator med tastefrekvens rett over Nyquistfrekvensen	68
4.15	Sporfeltsimulator med tastefrekvens 2,5 ganger Nyquistfrekvensen	69
5.1	Rotårsaksoppbygning	71
5.2	PF-intervall-modell	82
5.3	Skinneforurensning	90
5.4	Skinneforurensning	91
5.5	Løs skinneforbinderfør feilforbedring	92
5.6	Løs skinneforbinder etter feilutbedring	92
5.7	Metallgjenstander i skinengangen	93
5.8	Etter fjerning av metallgjenstander i skinengangen	93
5.9	Feil på impedansspole	93
5.10	Etter utbedring av feil på impedansspole	94
5.11	Sviller moddelert som ohmske motstander mellom skinnestrengene	95
F.1	Kart over strekningen Støren-Trondheim	134
F.2	Kart over strekningen Egersund-Stavanger	135
F.3	Kart over strekningen Tangen-Moelv	136
F.4	Kart over strekningen Blaker-Åbogen	137

Tabelliste

2.1	Sporfelttyper i bruk i Norge	10
2.2	Overharmoniske komponenter av KL-strøm.	15
3.1	Data på målestasjoner og strekninger på månedsbasert analyse	46
3.2	Data på målestasjoner og strekninger på døgnbasert analyse	46
4.1	Critical incident-tabell av gammelt feilkodesett	52
4.2	Utdyping av tabell 4.1, årsaker fra «815 Kortslutning»	53
4.3	Critical incident-tabell av nytt feilkodesett	54
4.4	Utdyping av tabell 4.3, årsak fra «Utstysrfeil uten kode - beskrives i notatfeltet»	55
4.5	Gruppering av kategorier i tabell 4.3	56
C.1	Sporfeltfordeling i Norge	117
D.1	Tallgrunnlag for paretodiagram, med «konsekvens» i nytt feilkodesett	119
D.2	Tallgrunnlag for paretodiagram, gammelt feilkodesett	120
D.3	Tallgrunnlag for paretodiagram, nytt feilkodesett	121
E.1	Pivottabell og værdata for Blaker-Åbogen(Kongsvingerbanen)	124
E.2	Pivottabell og værdata for Tangen-Moelv(Dovrebanen sør)	125
E.3	Pivottabell og værdata for Støren-Trondheim S(Dovrebanen nord)	126
E.4	Pivottabell og værdata for Egersund-Stavanger(Sørlandsbanen vest)	127
E.5	Tallgrunnlag for døgnverdier i klimaanalyse, Kongsvingerbanen	129
E.6	Tallgrunnlag for døgnverdier i klimaanalyse, Oslo	130
E.7	Tallgrunnlag for døgnverdier i klimaanalyse, Bergensbanen vest	131

Definisjoner

Potensial beskriver elektrisk potensial, som angir forskjell i elektrisk ladning mellom to punkter. Potensial og elektrisk spenning beskriver samme enhet i Volt.

Akselteller er et digitalt punktbasert togdeteksjonssystem basert på sensorer som setter opp et magnetfelt over skinnhodet, når toget passerer brytes magnetfeltet og en logikkenhet teller antallet toghjul. Logikkenheten sammenligner antall toghjul inn mot -ut, dette bestemmer om det er tog på banestrekningen.

ATC er den delen av signalanlegget som overvåker togets hastighet og aktiverer togets bremsers dersom hastigheten overstiges. ATC kan være fullstendig(FATC) eller delvis(DATC). DATC har en funksjonalitet begrenset til kjøring mot hovedsignal "Stopp", hastighet over første sporveksel i innkjøringstogveien, samt eventuell midlertidig hastighetsnedsettelse kodet i balisene utlagt til dette formålet.

Blokkstrekning er sikkerhetinnretning som kun tillater et tog av gangen på en gitt strekning.

CTC er et fjernstyringssystem for signalanlegg brukt på norsk jernbane. I praksis vil dette si at en togleder kontrollerer signaler og sporveksler på stasjoner tilknyttet en togledersentral via CTC.

forriglinger er et sett med sikkerhetskrav som må oppfylles for kunne utføre en handling, i forriglingsanlegget vil dette si et sett med tilstander som må oppnås før kjøresignal vises.

Linjeblokk den delen av signalanlegget som på strekning med fjernstyring sikrer at det bare kan vises kjøresignal til en blokkstrekning for ett tog om gangen. Linjeblokken kan være integrert i sikringanlegget.

Pilotsystem er en testutgave eller prøveprosjekt av et system.

Rotårsak bakenforliggende grunn til et avvik, ofte vises feilen i en annen komponent enn den som er problemet.

Sammenbinder brukes i sammenheng med audiofrekvente sporfelt, hvor det er en S-sammenbinder. Generelt er dette en kabel som kobler sammen to skinner over en lasket skjot.

shunt (togshunt) defineres som motstanden som kortslutter skinnestrengene, altså resulterende motstand mellom skinne, toghjul, togaksling.

Signalanlegg er et teknisk anlegg som inkluderer sikringanlegg, linjeblokk, fjernstyringssystem og automatisk hastighetsovervåkning.

Signal de fastsatte lyssignal, skilt, stolper, flagg, tegn og lyder som brukes ved togframføring og skifting.

Sikringsanlegg den delen av signalanlegget som sikrer at det bare vises kjøresignal til en togvei for ett tog om gangen, ved å forriglet sett med sikkerhetkrav. Sikringsanlegget registrerer om det er kontroll på sporvekslene, om det er rullende materiell i sporet og i sikringssonene for tog i motsatt kjøreretning m.m. Anlegget registrerer ikke om det er rullende materiell på strekning uten fjernstyring.

Sporavsnitt er virkeområde til sporfeltet, i skinnegangen.

Sporfelt er et analogt kontinuerlig togdeteksjonssystem basert på å sende strøm i skinnegangen. Deteksjon av tog skjer når akslinger på rullende materiell kortslutter skinnestrengene.

Tilstandsovervåkning er et system som overvåker en fysisk størrelse til en komponent eller et system.

Togdeteksjon automatisk bestemmelse av togets posisjon. Enten på et punkt eller innenfor et område.

Analog beskriver kontinuerlige enheter, med flytende overgang mellom nivåene.

Digital er en implisitt beskrivelse av en diskret enhet, altså diskontinuerlig, som beskriver tilstander som enten er 0 eller 1.

Hallgenerator (engelsk: Hall-effect sensor) er en sensor for strømmåling.

Impedans er strømmotstand, kan ha både reel og kompleks del. I praksis fungerer den reele delen som likestrømmotstand og den komplekse som vekselstrømmotstand.

System brukes om enkeltkomponenter og samlinger av komponenter som tilsammen utfører en tiltenkt funksjon. Dette omfatter også funksjoner for overordnede systemer.

Tasting er punktprøving av et signal, for digital representasjon av signalet. Sampling som er den engelske betegnelsen er også mye brukt.

Akronymer

AKV Akutt Korrektivt Vedlikehold.

ATC Automatic Train Control.

CTC Centralized Traffic Control.

ERTMS European Rail Traffic Management System.

Hz Hertz.

IOT Internet Of Things.

KL Kontaktledning.

RAMS Reliability, Availability, Maintenance and Safety (norsk: Pålitelighet, Tilgjengelighet, Vedlikehold og Sikkerhet).

UKV Utsatt Korrektivt Vedlikehold.

Kapittel 1

Innledning

Denne masteroppgaven vil ta for seg tilstandsovervåkning av sporfelter. I tillegg vil rotårsaker til sporfeltfeil undersøkes, fordi nevnte temaer henger tett sammen. Målet er å kartlegge rotårsaker som vil danne grunnlaget hva som kan indikere begynnende feil på sporfelter. Tilstandsovervåkning vil gi tilgang til mer informasjon om sporfeltene og sannsynligvis øke muligheten til å detektere feil så de kan utbedres før de påvirker jernbanedriften.

Tilstandsovervåkning er potensielt et steg på veien mot Jernbaneverkets vedlikeholdsstrategi om «å ivareta krav til sikkerhet, punktlighet og et økonomisk optimalt vedlikehold»[1, s. 5]. Tilstandsovervåkingen er en teknologi som vil bidra med muligheten til å kontinuerlig kontrollere parametere knyttet til sporfelter, dermed få større innsikt i hvor og når systemene trenger vedlikehold for å opprettholde kravene til sikkerhet og pålitelighet. Økt kontroll av parametere til sporfeltene vil kunne bidra til å optimalisere nevnte parametere i vedlikeholdsstrategien.

NSI-63 er det mest brukte signalanleggstypen i Norge[2, s. 3], i tilknytning til dette er 95/105 Hz sporfelt også mest utbredte togdeteksjonsmetoden.¹ På grunnlag av «95 Hz»-sporfeltenes utbredelse, vil denne rapporten ta for seg disse.

1.1 Bakgrunn

Signalsystemet på jernbanen sørger for sikker togframføring. Den viktigste oppgaven til signalanlegget er å hindre sammenstøt mellom tog. Dette gjennomføres med å kontrollere til enhver tid hvor togene på jernbanenettet befinner seg, dette utføres automatisk av togdeteksjonssystemer.

Hovedbestanddelene av signalsystemet er sikringsanlegget, ATC og CTC, disse representerer henholdsvis forriglingene i anlegget, automatisk togstopp² og fjernstyring

¹Se tabell C.1

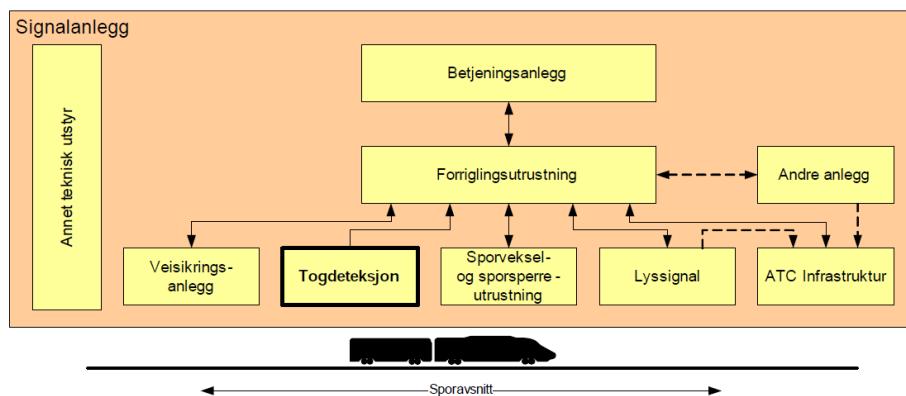
²Hindrer togene i å framføres mot stoppsignal(rødt lys)

av sikringsanleggene[3]. Disse systemene til sammen sørger for en sikker togframføring, hvis feil oppstår medfører dette ofte at stoppsignaler vises, og togene stanser. Påliteligheten ofres for å holde en høy sikkerhet.

Automatic Train Control (ATC) gjør at tog stoppes automatisk hvis de framføres mot stoppsignal. Siden sikringsanlegget kun har grensesnitt mot lokfører med optiske signaler, hindrer det ikke lokføreren å fremføre tog mot stoppsignal. Derfor virker ATC som et grensesnitt mellom tog og lyssignal, som indikert i *figur 1.1*. ATC-systemet ble innført som en følge av behovet for å sikre tog mot å bli framført mot stoppsignal, altså hindre menneskelige feil. Systemet ble innført som en følge av de to siste store togulykkene i Norge, omtalt som Tretten- og Åstaulykken[4, s. 205, 209, 426].

De fleste stasjoner i Norge er fjernstyrt ved hjelp av Centralized Traffic Control (CTC), dette gir togleder kontroll over sikringsanlegget³ på de fjernstyrte stasjonene. Togledere styrer sikringsanlegget på de aktuelle stasjonene fra en av 8 knutepunktstasjoner i Norge[5, s. 18]. Fjernstyring av tog påvirker ikke jernbanesikkerheten direkte, men gir et tap av pålitelighet og oppetid hvis fjernstyringen ikke viker. Ved feil på CTC-anlegget vil signalanlegget i de fleste tilfeller vise stoppsignal. CTC ble innført for å effektivisere jernbanedriften, ved å redusere bemanningen på hver stasjon. Siden betjeningen av signalanleggene ikke lenger har behov for lokal betjening.

Sikringsanlegget består av forriglinger, altså et sett med krav som må oppfylles før signalsystemet tillater å kjøre tog inn på en permanent gitt del av sporet, som er definert ved blokkstrekninger. Disse brukes til å sikre at kun et tog kan befinne seg på en avgrenset del av jernbanelinjen til enhver tid. Hvis det kan garanteres at to tog ikke kjører på den samme avgrensede delen av sporet, kan de heller ikke kollidere.



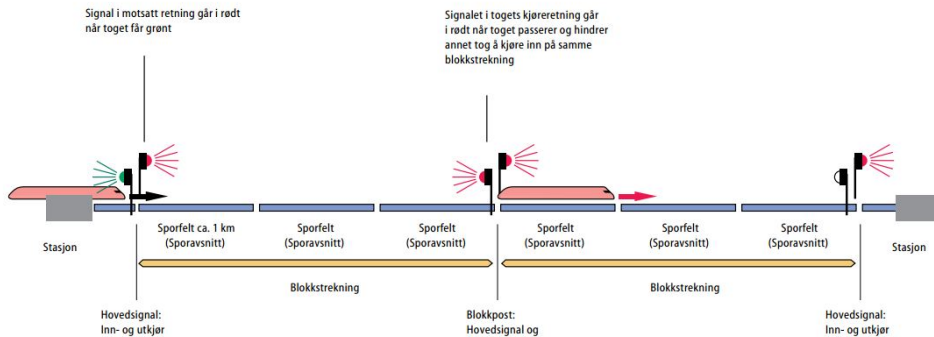
Figur 1.1: Oppbygning av signalanlegg[6]

³I hovedsak sporveksler og optiske signal, med muligheten til å sette togvei

Blokkstrekningene er i mange feilfeller en samling med sporavsnitt, *figur 1.2* viser sporfeltenes sammenheng med blokkstrekningene. Sporfeltene har begrensninger i lengde (som vi kommer tilbake til), i motsetning til blokkstrekningene som er et mer abstrakt konsept knyttet til lyssignal og forriglingsanlegget. Sporfeltene indikerer belegg på tilhørende sporavsnitt når det befinner seg tog der, denne informasjonen brukes av linjeblokkssystemet (blokkstrekningene) som videre gir informasjon til sikringsanlegget om hvilke (blokk)strekninger som er ledige og hvem som er låste, som inngår i forriglingene som krever fritt spor for å gi kjøresignal. Dermed styrer togdeteksjonssystemene i stor grad hvilket lyssignal som vises for togene.⁴

Tradisjonelt var det en blokkstrekning mellom hver stasjon. Men for å kunne kjøre tog tettere i en retning har jernbanelinjer med stor trafikk fått blokkstrekninger med større oppløsning, dette gjøres ved hjelp av blokkposter som deler strekningene opp i flere kortere delstrekninger⁵. Ved disse blokkpostene kan normalt ikke tog passere hverandre, men de kan kjøres tettere i en retning. Hver blokkstrekning har tilhørende optiske lyssignal som regulerer trafikken inn på strekningen i begge ender. Togdeteksjon og linjeblokk er systemer med høye krav til pålitelighet og oppetid på grunn av sin avgjørende rolle i sikkerheten på jernbanen.

Sporfelt, linjeblokk og blokkpost



Figur 1.2: Sporavsnitt satt i sammenheng[7, s. 32]

ERTMS

Det nye digitale signalsystemet skal implementeres på norsk jernbane, European Rail Traffic Management System (ERTMS), vil sørge for muligheten til å kjøre tog fritt over landegrensene til land som har implementert standarden.

⁴Se figur 1.1

⁵Se figur 1.2

Sporfelter og akseltellere er de togdeteksjonssystemene som brukes i Norge, disse systemene er henholdsvis analoge og digitale[6]. Stortinget har fattet vedtak med å innføre de mer moderne akseltellerne på alle strekninger, samtidig med installasjonen av ERTMS. Dette vil da fase ut sporfeltene og NSI-63, som signalanlegg. Dermed vil sporfelter være i drift fram til 2030, da ERTMS vil være ferdig installert[8, s. 11].

Sporfelter

Togdeteksjonssystemet med størst utbredelse i Norge, er sporfelter av typen AC-95/105 Hz. Dette er aldrende systemer, og ble innført samtidig med NSI-63 for omtrent 50 år siden[2, s. 3]. Sikringsanlegget er avhengig av sporfeltene for å tillate togframføring, feil på disse systemene medfører ofte togstans, siden dette er sikkerhetskritiske systemer. Sporfeltene er utsatt for mange feil og problemer[2, s. 32]. Feilrettingen krever ofte mye tid, fordi feilene potensielt kan befinne seg over strekninger på kilometers utstrekning og baserer seg i hovedsak på manuell identifisering.

Fordelen med sporfeltenes store geografiske utstrekning er den kontinuerlige deteksjonen av rullende materiell, i motsetning til akseltellere som utfører en punktdeteksjon. I tillegg er sporfeltene relativt sikre systemer, de gir veldig sjeldent indikasjon om fritt spor når tog befinner seg på strekningen.⁶ De fleste feil på sporfelter er driftsfeil som setter sikringssystemet i sikker tilstand.⁷ Sporfeltfeil knyttes ofte opp mot kortslutning av skinnestrengene, som også er måten systemet detekterer rullende materiell.

I kjølvannet av stortingsvedtaket med overgangen til akseltellere samtidig med overgangen til ERTMS, vil sporfeltene driftes i mange år framover. Generelt sett opplever aldrende systemer ofte et økt vedlikeholdsbehov for å takle økt feilrate, det er sannsynlig at sporfeltene vil oppleve samme effekt[9, s. 21]. Dermed vil det kreves at strategiene, metodene og effektiviteten på vedlikeholdet som brukes i dag forbedres, for å opprettholde ønsket funksjons- og sikkerhetsnivå.

Tilstandsovervåkning

En metode for å øke kontrollen på komponenter i et system er tilstandsovervåkning. Dette er en metode for å overvåke en eller flere parametere for å bestemme funksjonsnivået eller tilstanden til en komponent eller system. Dette er tidligere gjennomført et pilotprosjekt på tilstandsovervåkning av sporveksler i Norge, på Trondheim stasjon.⁸ Denne piloten var med overvåkingssystemet, POSS, som ble levert av det nederlands-

⁶Dette er en type farlig feil

⁷En sikker tilstand i sikringsanlegget viser ved stoppsignal

⁸I følge Tor Johnny Moen i Trønderbanen, Jernbaneverket

ke firmaet Structon. Det blir installert tilstandsovervåkning av sporveksler på Norsk jernbane, dette vil omfatte overvåkning av 700-800 sporveksler innen 2017.⁹

Tilstandsovervåkning generelt er mest utbredt i England, hvor det er innført bøter for forsinkelser i togtrafikken. Dette har tvunget fram en etterspørsel etter tilstandsovervåkning, det mest utbredte er sporveksler og sporfelter men det er også mulig å tilstandsovervåke andre jernbaneobjekter, som sporvekselvarme og jording.

Det kjøres et pilotprosjekt i Norge på tilstandsovervåkning av sporfelter som rulles ut i skrivende stund. Dette leveres av britiske voestalpine i samarbeid med Norsk jernbanedrift, på oppdrag for Jernbaneverket. På piloten overvåkes stasjoner sporfelter i Trondheims- og Osloområdet.

1.2 Problemstilling

Denne rapporten vil ta for seg togdeteksjonssystemer med fokus på sporfelt slik det benyttes i Norge i dag. Målet er å beskrive hvordan tilstandsovervåkning av sporfelt bør gjennomføres, som kan gi muligheten redusere feil og effektivisere vedlikeholdet på sporfelter. Av dette er det interessant å kartlegge rotårsaker til feil på sporfelt, og å vurdere nytteverdien av tilstandsovervåkning på sporfelter. Det også vil vurderes hvordan klimaet påvirker sporfeltene. Det vil også vises hvordan tilgjengelig data¹⁰ kan bidra til at riktig tiltak blir gjort til rett tid slik at man unngår feil som medfører togstans. Videre vil det vurderes hvilke gevinster/nytteverdi som er oppnåelige med tilstandsovervåkning.

Forsknings spørsmål og delmål

- Beskrive virkemåte og oppbygning til dagens togdeteksjonssystemer.
- Analysere bakenforliggende årsaker til feil på sporfelt.
- Vurdere muligheter for tilstandsovervåking (også av rotårsaker til feil).
- Hvilken nytteverdi har sporfeltovervåking?

1.3 Målsetning

Målet med oppgaven å vurdere tilstandsovervåkning som metode for å overføre feil som krever akutt korrektiv- til utsatt korrektiv- eller forebyggende vedlikehold. I tillegg til hvor og hvordan målinger utføres for å avdekke begynnende feil på sporfelter.

⁹I følge Anna Gjerstad, Jernbaneverket

¹⁰I hovedsak fra Jernbaneverkets Banedata

Ved identifisering av årsaker til feil før de forårsaker driftstans vil bidra til å øke oppetiden og effektiviteten til jernbanen.

1.4 Avgrensning

Det eksisterer flere forskjellige systemtyper av sporfelte. Det finnes også som nevnt akseltellere, men dette er ikke sporfelte og vil ikke vurderes nærmere. Sporfeltsystemene i bruk inkluderer[6]:

- Vekselstrøm: 95/105 Hz og -10/50 kHz .
- Likestrøm.
- Audiofrekvent: FTG S og TI21.

Det vil legges vekt på tradisjonelle sporfelt av typen AC 95/105 Hz , som er mest utbredt i Norge.¹¹ I forlengelsen av dette vil også bare tilstandsovervåking av AC 95/105 Hz sporfelte vurderes.

1.5 Litteratur og datamateriale

Datamaterialet i denne oppgaven består i hovedsak av rapporterte feil på sporfelte fra Jernbaneverkets infrastrukturdatabase, Banedata. Utover dette er informasjon om de ulike sporfeltsystemene hentet fra «Arbeid på signalanlegg 1 - Signalmontørfaget» læreboken for signalmontører i jernbanen[10], «Teori(Læremateriell) i sporfeltforståelse» av Rolf Gillebo og Jernbaneverkets Teknisk regelverk[6]. Videre har inspirasjon til tilstandsovervåking av sporfelte hetnet fra artikler på emnet fra England og Nederland([11],[12] og [13]). Datagrunnlag til klimaanalysen er hentet fra Metrologisk institutt.

1.6 Oppbygning

Kapittel 1 vil sette rapporten inn i en større kontekst, i tillegg til togdeteksjonens plass i signalsystemet. Kapittelet inneholder bakgrunn, oppgaveformulering/problemstilling, avgrensinger og beskrivelse av rapportens struktur.

Kapittel 2 beskriver sporfeltenes oppbygging og virkemåte, her vil vekselstrøm-sporfelt på 95/105 Hz beskrives, som nevnt i *seksjon 1.4*. Tilstandsovervåking som metode vil beskrives, i tillegg til relevant måleteori som kan anvendes i forbindelse med tilstandsovervåking.

¹¹Se figur 2.1

Kapittel 3 vil gjennomgå metodene og vurderingene som er brukt for behandling av data i denne rapporten. Litteratursøket utført i forbindelse med denne oppgaven vil bli beskrevet. Kvaliteten på informasjon fra Banedata og litteraturkilder vurderes i et pålitelighetsperspektiv. Feilkilder til brukte metoder og til innhentet data beskrives også i dette kapitlet.

Kapittel 4 presenter og beskriver resultatene av data hentet fra Banedata, sporfeltssimulatoren på Norsk jernbaneskole.

Kapittel 5 vil vurdere, analysere og diskutere resultatene som er funnet i *kapittel 4*. Diskusjonstemaene vil dreie seg om overvåkningssystemer, systemvurdering av sporfeltene med tanke på pålitelighet, hvordan tilstandsovervåkning av sporfelt kan gjøres mest mulig effektivt og for best utnyttelse av overvåkingen.

Kapittel 6 vil presentere hovedfunn og anbefalinger basert på *kapittel 2, 4 og 5*. Anbefalinger til hvordan tilstandsovervåkning best kan brukes til smart vedlikehold av sporfelt vil være et sentralt tema. I tillegg til hvilken nytteverdi tilstandsovervåkingen vil ha på jernbanedriften.

Kapittel 7 vil foreslå videre arbeid, inkludert relevante temaer som ikke fikk plass i denne rapporten, men som er aktuelle for problemstillingen. Men emner som ikke fikk plass på grunn av rapportens tidsbegrensning.

Vedlegg

Kapittel B inneholder tallgrunnlag for figurer og annen støttest data til oppgaven. Matlabkode for figurer generert for å illustrere prinsipper vil finnes her.

Kapittel C Viser tallgrunnlag for sporfeltfordelingen.

Kapittel D Viser tallgrunnlaget for rotårsaksanalysen, altså bakgrunnen for «critical incident»-tabellene og «pareto»-diagrammene.

Kapittel E Viser tallgrunnlaget for pivottabellene.

Kapittel F Viser kartgrunnlag som forklarer banestrekninger og målestasjoner i klimapåvirkningsanalysen av månedsverdier.

Kapittel 2

Teoretisk grunnlag

Dette kapitlet vil beskrive de aktuelle sporfeltsystemene som driftes i dag, vedlikeholdsteori og målemetoder som kan brukes i tilstandsovervåking av sporfelter.

2.1 Sporfelter

Denne seksjonen vil beskrive de ulike sporfeltypene som brukes av Jernbaneverket til togdeteksjon.

Det første sporfeltet ble utviklet av amerikaneren William Robinson i 1872[10, s. 151]. Den tekniske innretningen revolusjonerte datidens signalanlegg, som med sporfelter fikk muligheten til å automatisk bestemme hvor toget befant seg langs sporet. Dette la grunnlaget for et automatisk sikringssystem for jernbanen. Sporfeltene brukes av linjeblokksystemet i sikringsanlegget for å sikre at kun *et* tog til enhver tid har tilgang til en avgrenset del av sporet.

En stor del av sikkerheten i jernbanen ivaretas ved å hindre kollisjoner mellom rullende materiell, noe som krever kontroll med hvor togene befinner seg. Posisjonen til tog ble tidligere bestemt ved visuell kontroll av mennesker. Dette medførte relativt lav fart og liten trafikk for å ivareta sikkerheten. Med det nye systemet kunne signalsystemet automatiseres i kombinasjon med at kjøresignalene ble formidlet ved optiske signaler. I motsetning til tidligere metoder som brukte flaggsignaler og semaforer, hvor sistnevnte var i manuelt styrt fra stillverk[5, s. 13]. Men sporfelter og optiske lyssignal kunne både fart og kapasiteten økes på jernbanelinjene.

Sporfelter er en togdeteksjonsmetode som utfører en kontinuerlig deteksjon av tog. Dette impliserer at systemet til enhver tid registrerer tilstedeværelsen av rullende materiell. Deteksjonen utføres ved å sende strøm i skinnene, ved hjelp av en tilførselkrets. Strømmen som blir sendt i skinnene detekteres av et sporfeltrelé i returkretsen, som befinner seg i motsatt ende av sporavsnittet relativt til tilførselkretsen, illustrert i *figur 2.2*. I praksis detekteres tog ved kortslutning av reléets innganger, dette er en

følge av koblingen disse har til skinnestrengene, som kortsluttes av togets akslinger når det befinner seg på strekningen.

Felles for alle sporfelter er at de opererer på sitt respektive sporavsnitt, som vist i *figur 1.2*. I tillegg er sporfeltene analoge systemer, men gir et digitalt¹ resultat. Dette begrunnes med systemets evne til å gi enten fritt eller belagt spor, uten andre mellomliggende systemtilstander. De forskjellige typene sporfelter som brukes på norsk jernbane er gitt i *tabell 2.1*.

Alle sporfelter skal ifølge teknisk regelverk[6] detektere rullende materiell på et sporavsnitt selv under mest ugunstige forhold med laveste togshunt, høyeste tilførselsspenning og minste avledning, som skal resultere i belagt spor. Det følge av dette spesifikke krav til elektrisk motstand i akslingene som kortslutter skinnestrengene. Ved stasjoner skal shunten være $\leq 0,5 \Omega$, tilsvarende $\leq 0,2 \Omega$ for resterende linje[6]. Videre er det krav om at avledning fra sporet skal være $< 0,6 S/km$ på stasjoner og $< 0,5 S/km$ på resterende linje, hvor S er målt i siemens²[6].

Sporfeltkategori	Typebetegnelser
Vekselstrøm(AC)	95/105 Hz, 10/50 kHz
Likestrøm(DC)	—
Audiofrekvent	FTG S, TI 21

Tabell 2.1: Sporfelter i bruk i Norge[6]

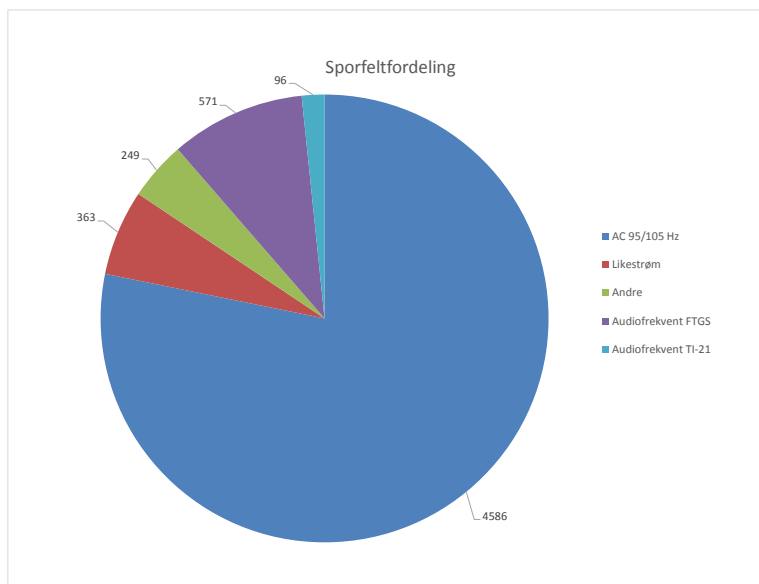
Det ble tidligere nevnt at *tabell 2.1* angir de sporfeltene som er i bruk i Norge i dag. De forskjellige sporfeltypene har ulike styrker og svakheter. De ulike sporfeltypene er utviklet for å takle forskjellige utfordringer, og er resultatet av tilpasning til nye tekniske løsninger i andre deler av jernbaneinfrastrukturen. Det er vekselstrømsporfelt på 95/105 Hz som er mest utbredt på norsk jernbane, derfor vil dette systemet beskrives mer detaljert enn de andre sporfeltypene, som angitt av *figur 2.1*.

Sporfeltenes generelle virkemåte

Som tidligere nevnt fungerer sporfeltene ved å detektere når toghjulenes akslinger kortslutter skinnestrengene. Når skinnestrengene ikke er kortsluttet impliserer det fravær av rullende materiell på det aktuelle sporavsnittet. I dette tilfelle får returkretsen spenning over inngangene, strømmen fra tilførselskretsen når derfor frem til elektromagneten i sporfeltreléet, som trekker reléankeret i stilling som indikerer fritt spor, se *figur 2.2*. Tiltrekking av reléankeret medfører derfor at (for)kontaktene sluttes.

¹Med digitalt menes at kun diskrete verdier vil vises, altså enten på eller av, 1 eller 0

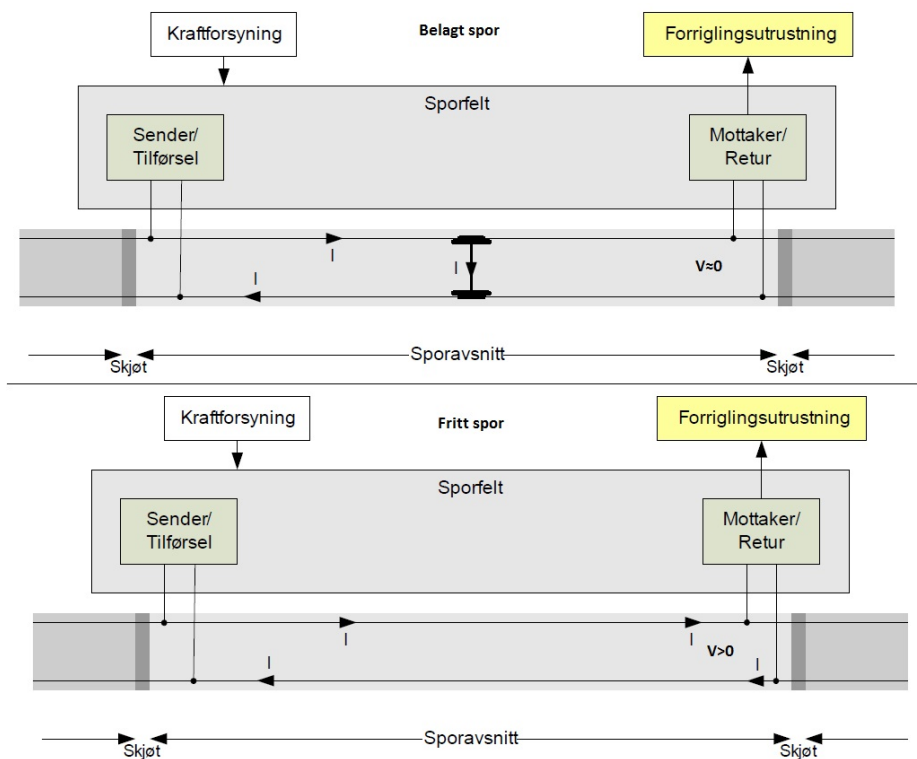
²Avledning [Siemens], $S = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} = \frac{\text{Strøm}}{\text{Spennning}}$



Figur 2.1: Fordeling av sporfelttyper, se *vedlegg C.1, figur: Olav Kallerud*

Tilstedeværelsen av rullende materiell vil som en følge av kortslutning mellom skinnestrengene, tvinge spenningen mellom disse til (\approx)null. Dette medfører tap av strøm til elektromagneten i reléet, og reléankeret faller av, som i *figur 2.2* ved belagt spor. Frafalt relé vil gi belagt spor, som viser stoppsignal. I tilfeller der strømtilførselen faller ut, vil også reléet falle av på grunn av gravitasjonen. Nevnte fenomen danner grunnlaget for systemets «fail-safe»-egenskap, som innebærer alle feil på reléet setter systemet i en sikker tilstand, som gir logisk «belagt spor» og dermed stoppsignaler. Videre betyr denne egenskapen at design av sporfelt er tuftet på at alle ukjente og uønskede situasjoner medfører en sikker tilstand i signalanlegget.

Det kreves altså en aktiv handling for å tiltrekke sporfeltreléet, altså spenning over terminalene til returkretsen og dermed sporfeltreléet. Dette reduserer sannsynligheten for farlige feil. Nevnte feiltype defineres som feil hvor sikringsystemet ikke virker som planlagt, det vil si at systemet gir kjøresignal inn på en strekning hvor det befinner seg tog, med andre ord fare for kollisjon og videre sikkerheten. Dagens signalsystem med undersystemet er designet for å være «fail-safe», i betydningen av å ikke gi sikkerhetsfeil men driftsfeil, ved uønskede hendelser eller svikt. Sikkerhetsfeil blir også omtalt som farlige feil.



Figur 2.2: Sporfeltets virkemåte [14, Redigering: Olav Kallerud]

Enkeltisolert- og dobbeltisolert sporfelt

Det første sporfeltet som ble konstruert av Robinson³ var enkeltisolert og benyttet likestrøm. Dette sporfeltsystemet avdelte sporavsnitt ved elektrisk isolasjon i den ene skinnestrengen og den andre hadde sammenhengende, uisolert elektrisk kobling mellom sporavsnittene. Sistnevnte fungerte som jordingsleder for systemet.

Ved sporfeltenes begynnelse ble enkeltisolerte sporfelt brukt med likestrøm som signalstrøm, noe som fungerte tilstrekkelig frem til elektrifisering av jernbanen. På banestrekninger hvor strøm ble brukt til fremføring av tog ble returstrømmen sendt den uisolerte skinnestrengen. Dette ga opphav utilsiktede påvirkninger på sporfeltstrømmen i den isolerte skinnestrengen. Fordi skinnestrengene fungerer som to parallelle strømledere, kan det oppstå store potensialforskjeller mellom disse, ved høye returstrømmer, noe som kan forstyrre sporfeltreléets normale operasjon.

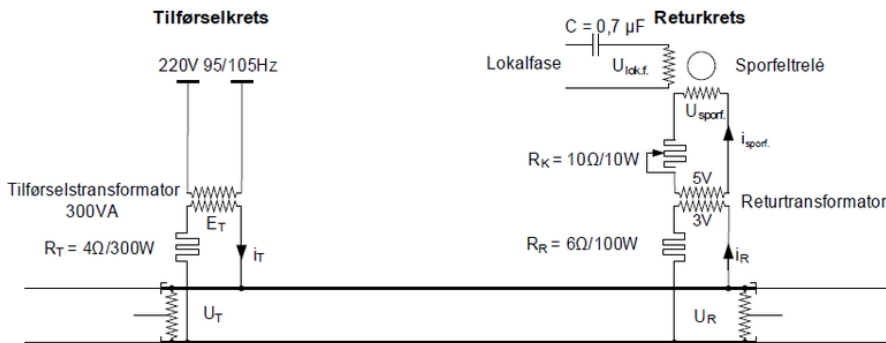
For å begrense potensialforskjellene ble det i 1903 utviklet vekselstrømsporfelt på

³Se seksjon 2.1 side 9

dobbeltisolerte sporavsnitt, altså elektrisk isolasjon i begge skinnestrengene[10, s. 174]. Problemet som oppsto med dobbeltisolerte sporfelt var ved fjerningen av den felles jordingsskinen. Tidligere med enkeltisolerte sporfelt kunne returstrømmen følge den uisolerte skinnestrengen for å sende denne videre til omkringliggende sporavsnitt. Returstrømmen måtte derfor overføres over sporavsnittene uten at sporfeltstrømmen fulgte med over de isolerte skjøtene. Problemet ble løst ved å lede skinnestrømmen gjennom en spole over hver isolerte skjøt. Dermed kan denne spolen ved korrekt størrelse, filtrere ut (altså stoppe) sporfeltstrømmen og slippe returstrømmen gjennom til omkringliggende sporavsnitt.⁴

Sporfeltenes lengde; endematede- og midtmatede sporfelt

For å spare penger ved å bruke færre komponenter per kilometer med spor, ønsker man å ha så lange sporavsnitt som mulig, helst tilsvarende lengde som blokkstrekningene. Lange 95/105 Hz-sporfelt medfører kostnadsbesparelser i form av redusert antall komponenter, både i innkjøp og vedlikehold.

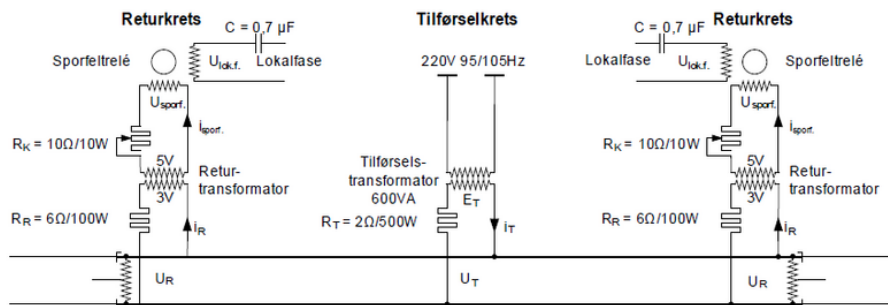


Figur 2.3: Endematet sporfelt[15].

Figur 2.3 viser den mest fundamentale måten å konstruere et sporfelt, altså som et endematet sporfelt. Denne typen sporfeltkonstruksjon består av en tilførselskrets og en returkrets. Det finnes derimot metoder for å lage lengre sporfelte, som ved midtmating, gitt i figur 2.4, som i praksis doblet lengden på sporfeltene. Dette systemet bruker en tilførselskrets og to returkretser, som reduserer antallet komponenter ved sporet. Men virkemåten er litt ulik fordi begge returkrets-reléene må tiltrekkes for at kjøresignal skal vises.

På grunn av sporfeltenes generelle virkemåte med deteksjonsområde langs hele sporavsnittets lengde, gjør at systemet er sårbart for støy. Lengden på sporfeltet er

⁴Mer om impedansspole side 19.



Figur 2.4: Midtmatet sporfelt[15].

proporsjonal med mengden elektrisk støy reléet opplever[10, s. 156]. På grunnlag av dette bygges ikke lengre vekselstrømsporfelt på denne måten, med unntak av ikke-elektrifiserte linjer. Disse er relativt lite støyutsatt i motsetning til elektrifiserte strekninger.

2.1.1 Vekselstrømsporfelt

Det er transformatoren som gjør vekselstrømsporfelter effektive. Oppbyggingen i transformatoren bygger på kraftoverføring mellom to spoler om en felles jernkjerne og vil naturlig filtrere ut likestrømskomponenten, dette forekommer ofte som støy sammen med vekselstrømmen. Det er lettere å overføre signaler over lengre avstander ved bruk av transformatorer[16, kap. 3.1]. Transformatoren virker også som et galvanisk skille i kretsen, som beskytter tilførsel- og returkretsen fra høye returstrømmer og andre uønskede strømpåvirkninger fra sporet.

Valg av strømart til sporfelter bør velges så den ikke interfererer med kjørestråmen eller noen av dens harmoniske overtoner.⁵

95/105 Hz — Vekselstrømsporfelt

Vekselstrømsporfelt ble innført fordi det tidligere enkeltisolerte, likestrømbaserte sporfeltet ga problemer på grunn av innføring av elektrisk trekkmateriell på jernbanen. Derfor måtte sporfeltfrekvensen endres for å kunne skille denne fra kjørestråmen, siden begge var likestrøm, altså 0 Hz.

Systemet er konstruert slik at polariteten til nabosporfelt i lengderetning er snudd, dette sikrer at feil på isolerte skjøter ikke medfører påvirkning av nabosporfelt, i form av tiltrekking av dette. Uten nevnte egenskap ville det vært fare for sikkerhetsfeil,

⁵Beskrives senere i dette kapittelet

med snudd polaritet gir det driftsfeil ved ødelagt isolert skjøl. Motsatt polaritet brukes fordi sporfeltreléene kun tiltrekker på en bestemt polaritet.

Frekvens

Frekvensen til sporfeltene er valgt til $95/105 \text{ Hz}$ fordi denne er har minst interferens med Kontaktledning (KL)-strømmen, og dens harmoniske overtoner[10, s. 174]. Kjørestrømmen som opererer på $16\frac{2}{3} \text{ Hz}$, og har harmoniske overtoner som er hele multipler av grunnfrekvensen, som angitt i *tabell 2.2*. Hvor nummer 5, 6 og 7 ligger tett opptil valgte sporfeltfrekvens, og kan skape forstyrrelser.

De harmoniske overtonene oppstår ved ulineær impedans, som kan oppstå i transformatorer og motorer. Hvis overharmoniske komponenter påvirker reléet kan disse gi bidrag til å sette spenning over reléets innganger, hvis det har riktig fase, og dermed kan bidra til å gi falske belegg. Ved forekomst av et stort antall overharmoniske komponenter til et signal, vil dette fremstå som et mer firkantet signal, i motsetning til en ren sinuskurve, som er utgangspunktet⁶.

Multipel	Frekvens[Hz]
1	$16\frac{2}{3}$
2	$33\frac{1}{3}$
3	50
4	$66\frac{2}{3}$
5	$83\frac{1}{3}$
6	100
7	$116\frac{2}{3}$

Tabell 2.2: Overharmoniske komponenter av KL-strøm.

Grunnen til betegnelsen $95/105 \text{ Hz}$ kommer av at enkeltspor benytter 95 Hz sporfeltstrøm[10, s. 174]. Videre, ved dobbeltspor brukes 95 Hz i hovedsporet og 105 Hz i parallellsporet, dette gjøres fordi det er hensiktsmessig å operere med felles returstrøm i parallelle spor, dette medfører at sporfeltstrømmen også går i begge sporavsnitt. Derfor er det påkrevd med forskjellige frekvenser for å skille de parallelle sporfeltenes strøm fra hverandre, når begge befinner seg i de samme elektriske lederne.

10/50 kHz — Vekselstrømsporfelt

Sporfelt med $10/50 \text{ kHz}$ har som navnet impliserer operasjon på veldig høyfrekvent strøm. Denne typen sporfelt brukes over korte avstander, derfor benyttes den ofte i

⁶Prinsippet vises senere i resultatene, *seksjon 2.3.4* på side 30

forbindelse med inn- og utkoblingsfelter for veisikringsanlegg[17]. Disse sporfeltene på 10- eller 50 kHz har ikke behov for isolerte skjøter, fordi den høye frekvensen naturlig dempes veldig fort i skinnene. Disse kan i tillegg brukes sammen med andre typer isolerte sporfelt, uten at de skaper uheldig interferens mellom systemene.

2.1.2 Likestrømsporfelt

Likestrømsporfelt brukes kun på enkeltisolerte sporfelt, dette var konseptet som ble brukt på de første sporfeltene konstruert av Robinson⁷. Dette systemet brukes kun på ikke-elektrifiserte banestrekninger og andre hensiktsmessige korte strekninger som på stasjoner.⁸ Dette er fordi likestrømsporfelt er som tidligere nevnt, veldig utsatt for støy fra KL-anlegget. Denne typen sporfeltene kan brukes på sporavsnitt som er opptil 8 km i utstrekning, på ikke-elektrifisert bane[18].

2.1.3 Audiofrekvente sporfelt

Audiofrekvente sporfelt skiller sporavsnittene fra hverandre ved hjelp av skjøteløse overgangssoner. Dette er en stor forskjell i motsetning til de andre sporfeltene i bruk som krever isolerte skjøter, dette medfører mye feil og er veldig vedlikeholdskrevende. Ut ifra navnet kan vi angi frekvensområdet disse sporfeltene opererer på som er hørbare frekvenser fra 1,5 – til 20 kHz[10, s. 192]. Konseptet fungerer tilsvarende som vekselstrømsporfelt men strømsignalet som sendes i skinnene er frekvensmodulert. Dermed gjør systemet mindre sårbart for elektrisk støy, fordi frekvenser fra andre sporfelt og uønskede strømmer blir filtrert bort.

TI 21

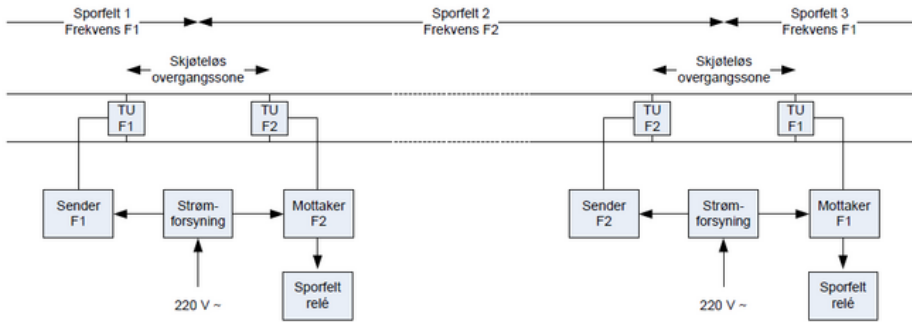
TI21 er typen sporfelt som benytter et strømsignal på 1,5 – til 2,6 kHz, dette spekteret er delt opp i frekvensbolker[19]. Tilførselkretsen sender signalet i retning av mottakerkretsen. I figur 2.5 kan mottakerkretsen observeres i motsatt ende relativt til senderen med en avstemt enhet, denne gir den aktuelle frekvensen høy impedans, som hindrer signalet med å gå i den retningen. Mottakerkretsen er avstemt med frekvens som tilhører senderen og er i stand til å demodulere signalet, som igjen sender det videre til sporfeltreléet. Maksimal lengde på denne typen sporfelt er 1100m[19]

FTG S

Denne typen sporfelt opererer på frekvenser fra 4,75– til 16,25 kHz[20]. Denne typen audiofrekvent sporfelt skiller sporfeltene fra hverandre med en «S-sammenbinder»[20]. Geometrien til komponenten gir navnet til «S-sammenbinderen», denne avgjør hvilken

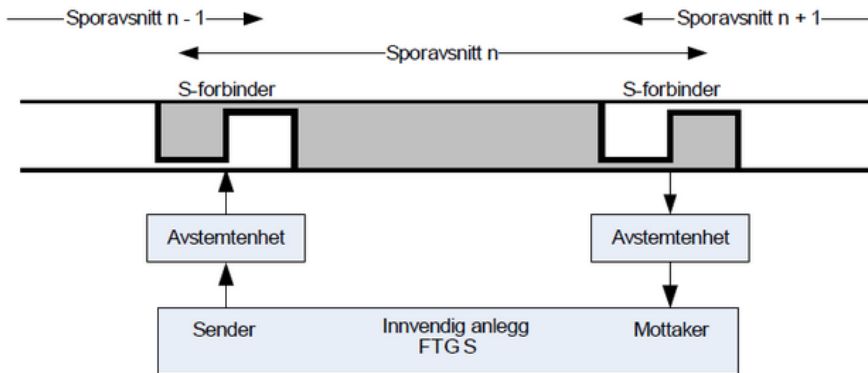
⁷Tidligere beskrevet på side 9

⁸Stasjonssporfelter har ofte veldig begrenset utstrekning og er derfor mindre utsatt for støy



Figur 2.5: Skjematisk oppbygning av TI 21, audiofrekvent sporfelt[19]

retning sender og mottaker er, som da henholdsvis sender og mottar signaler. Sammenbinderen fungerer ved hjelp av induksjon. FTG S-sporfelt kan ha en utstrekning på opptil 6,5 km[20].



Figur 2.6: Skjematisk oppbygning av FTG S, audiofrekvent sporfelt[20]

2.1.4 Komponentene i tradisjonelle sporfelt

Sporfeltrelé er en elektromagnetisk bryter som endrer tilstand ut fra en gitt spenning over terminalene. I sporfeltkretsen er det reléet registrerer kortslutninger mellom skinnene, hver av disse er koblet til hver sin terminal til sporfeltreléet gitt av *figur 2.3*, side 13. Hovedkomponentene i reléet er to elektromagneter og et reléanker, sammen fungerer dette som en bryter styrt av elektromagnetene. Reléankeret har mulighet til å rotere om en aksling, hvor ytterpunktene stoppes ankeret i enten tiltrukket eller frafalt stilling. Elektromagnetene er trekker til seg reléankeret hvis disse er spenningsatt og har korrekt faseforskyvning, og i dette tilfelle vil reléankeret slutte forkontaktene. Tiltrekking av reléet slutter en kobling som signaliserer fritt spor til forriglingsanlegget.

Trekraften til elektromagnetene i reléankeret er gitt av *ligning 2.1*[16]. På grunn av at sporfeltreléet er et tofaserelé, trekker reléet med størst kraft når det er 90° faseforskyvning⁹ mellom de to strømfasene, som betegnes ved «lokalfase» og «sporfase». Dette kommer vises av *ligning 2.1* hvor maksimal kraft oppnås ved $\alpha = 90^\circ$ ¹⁰.

$$F = k \cdot I_{lf} \cdot I_{sf} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.1)$$

Ligning 2.1 består av følgende deler, k er relékonstanten, I_{ene} angir henholdsvis strømmen i lokalfase og sporfase, α angir faseforskyvningen mellom de nevnte strømmene.

Lokalfasen er i normal operasjon alltid koblet til elektromagneten rundt skivekontakten. Det er sporfasen som eventuelt kortsluttes som en følge av samme fenomen mellom skinnestrengene. Når dette inntreffer får ikke sporfasespolen tilstrekkelig spenning over terminalene, reléet vil ikke være i stand til å tiltrekke reléankeret, dermed indikere belagt spor.

I motsatt tilfelle er ikke skinnestrengene kortsluttet og det er spenning over elektromagneten i reléet som er koblet til sporfasen. Dermed er begge elektromagnetene i reléet spenningsatt. Faseforskyvning mellom fasene genereres av en kondensator i lokalfasetilførselen¹¹, hvis denne faseforskyvningen er innenfor gitte grenser tiltrekkes reléet, og fritt spor indikeres. Det vil gi tilstrekkelig kraft for tiltrekk ned til 60° faseforskyvning[10, s. 178].

Det er flere typer sporfeltreléer i bruk av Jernbaneverket i dag. De reléene som er i bruk i dag har betegnelsene:

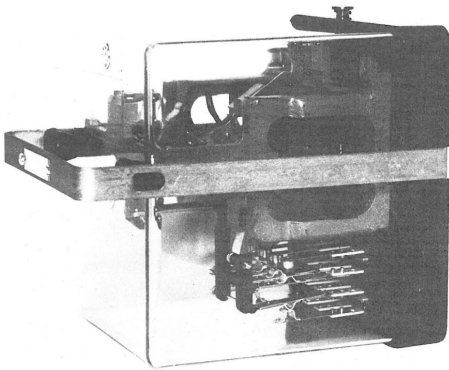
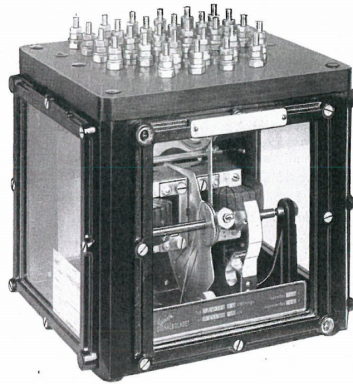
- Westinghouse VT1 Vane Relay (*Se figur 2.7a*)
- JRV relé (*Se figur 2.7b*)

⁹Faseforskyvning på $\frac{1}{4}$ av en periode

¹⁰ $\sin(90^\circ) = 1$, som er maksimal verdi av sinusfunksjonen

¹¹Se figur 2.3

Hvor VT1 er den nyeste typen som er mye lettere å bytte, enn den eldre av typen JRV. Førstnevnte kan byttes i en håndvending, ved å trekke i håndtaket til venstre i *figur 2.7a*. Sistnevnte må alle tilkoblingene på toppen av reléet skrues av, som vist i *figur 2.7b*.

(a) Westinghouse VT1 Vane Relay¹²(b) JRV relé¹³

Figur 2.7: Sporfeltreléer i bruk per i dag

Isolert skinneskjøl er et skille mellom skinnene i samme skinnestreng, laget av et elektrisk isolerende materiale. Disse skjøtene skiller sporavsnittene fra hverandre. (Disse isolerte skinneskjøtene brukes ikke av audiofrekvente sporfelter, som har andre metoder for å begrense sporfeltstrømmen til et sporavsnitt.)

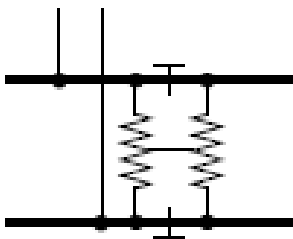
Spole i sporfeltsammenheng brukes denne komponenten i hovedsak som filterimpedans mellom sporfelter, for å blokkere sporfeltstrøm og å slippe gjennom returstrøm. Spolen er en frekvensavhengig elektrisk komponent og gir mulighet ut fra størrelsen, målt i «Henry», å designe et lavpassfilter[21, s. 548]. Dette filteret gir da mulighet til å blokkere høye frekvenser og slipper gjennom lavere frekvenskomponenter. Ligningen for en spole er gitt av *ligning 2.2*[21, s. 198].

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

I *ligning 2.2* representerer v spenning, L størrelsen på spolen målt i Henry, siste ledd er den tidsderiverte av strømmen med hensyn på tid.

¹²Bildet er hentet fra servicemanualen til Westinghouse reléet.

¹³Bildet er hentet fra databladet til JRV reléet, produsert av L.M. Ericsson, Signalbolaget, Stockholm.



Figur 2.8: Skjematisk tegning av impedansspole[23].¹⁶

Ved å utføre en Laplace-transformasjon av nevnte ligning, kan tidsvariabelen erstattes med en frekvensvariabel¹⁴.

$$V = L[sI - i(0^-)] = j\omega LI - LI_0 \quad (2.3)$$

I *ligning 2.3* representerer V spenning, L størrelsen på spolen, s laplacevariabelen¹⁵, $i(0^-)$ og I_0 initialstrøm i kretsen, j den komplekse variabelen og ω frekvensen.

Siste del av *ligning 2.3* viser at en konstant strøm vil medføre en kortslutning, det vil si slippe strøm uhindret gjennom på veldig lav frekvens ($\omega = 0 \text{ Hz}$). Deretter vil den gi mer og mer motstand ved høyere frekvens og størrelsen på parameteren L , som er størrelsen på spolen. Parameteren L vil avgjøre hvor grensen mellom frekvenser som slippes gjennom og blokkeres går.

Impedansspolene balanserer returstrømmen ved å fordele banestrømmen likt i begge skinnestrengene, som gjør at spenningen mellom skinne på et spor er tilsvarende null ($V \approx 0$). Sistnevnte egenskap gjør ved normal operasjon ikke sporfeltene, fordi de ikke gir noe potensiale mellom skinnene. En skjematisk tegning av en impedansspole er gitt av *figur 2.8*. Nevnte komponent løser problemene med store potensialforskjeller mellom skinnestrengene, som tidligere nevnt kan oppstå på enkeltisolerte sporfelt.

¹⁴ $s (= j\omega)$

¹⁵ For utledning av laplacevariabelen og -transformasjonen se «Reguleringsteknikk» av Balchen et al.[22, kap. 4]

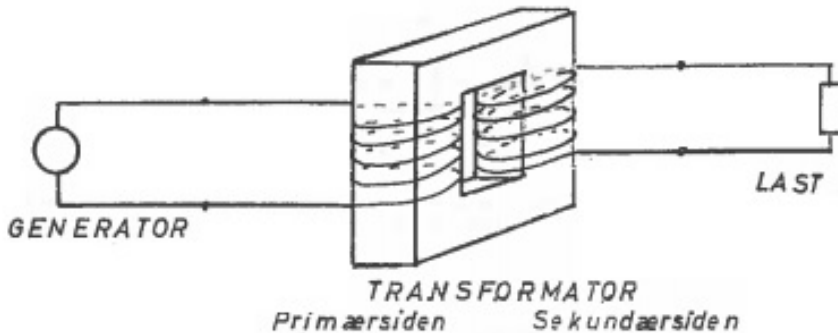
¹⁶ Tegningen viser en impedansspole som kobler sammen to sporavsnitt, et på hver side av de isolerte skinneskjøtene. De «T»-formede symbolene representerer isolerte skinneskjøter, sagtansymbolene representerer spolene med tilkoblinger og tynne strekene mellom sistnevnte er sammenkoblingen mellom disse. De tykke horisontale strekene er skinnestrengene, de tynnere vertikale er kobling til tilførsle/returkrets.

Elektrisk motstand eksisterer i store deler av kretsen i form av innsatte motstander og naturlig motstand i elektriske ledere. Motstand i ledere ignoreres ofte for kortere ledere, men bør tas i betraktning ved analyse av lengre elektriske ledere. Motstanden i en leder øker proporsjonalt med lengden på lederen. Måleenheten til elektrisk motstand er Ohm, denne enheten fungerer som et mål på begrensningen i en elektronstrøm.

De innsatte motstandene er til for å begrense strømmen for å beskytte tilførsel- og returkretsen. Med andre ord hindre at kortslutningsstrømmen blir for stor i tilførsel og retur.¹⁷

Transformator brukes til å endre spenningen til et strømsignal. Den består av to spoler viklet rundt en felles jernkjerne som vist i *figur 2.9*, hvor antallet viklinger på hver side bestemmer omsetningsforholdet. Dette gjør at strøm ikke kan gå direkte gjennom transformatoren, og fungerer derfor som et galvanisk skille.

De to spolene som brukes til å overføre spenningen i transformatoren kalles henholdsvis primærside og sekundærside, hvor primærsiden mottar strøm fra tilførselen og sekundær leverer transformert strøm til lasten. Spolen på primærsiden er viklet rundt jernkjernen og skaper et magnetfelt i denne, når strømmen passerer gjennom spolen. Dette induseres i spolen som befinner seg rundt sekundærsiden på grunn av nevnte magnetfelt, dette er illustrert i *figur 2.9*.



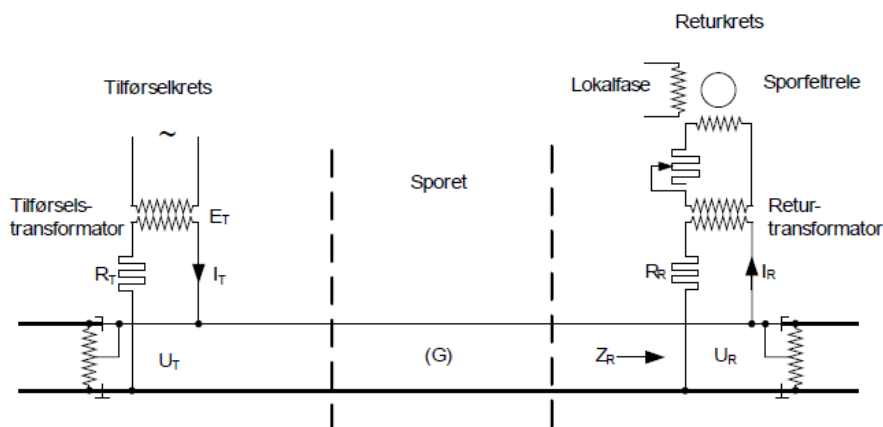
Figur 2.9: Skisse av transformator[16, Figur E.1.]

Det er plassert transformatorer i sporfeltkretsen, både i tilførsel- og returkretsen, som vist i *figur 2.10*. Disse er til for å transformere spenningen til passende verdier for overføring i skinnene, og videre passende for mottak i sporfeltreléet.

¹⁷Se R_T og R_R i *figur 2.10* på side 22.

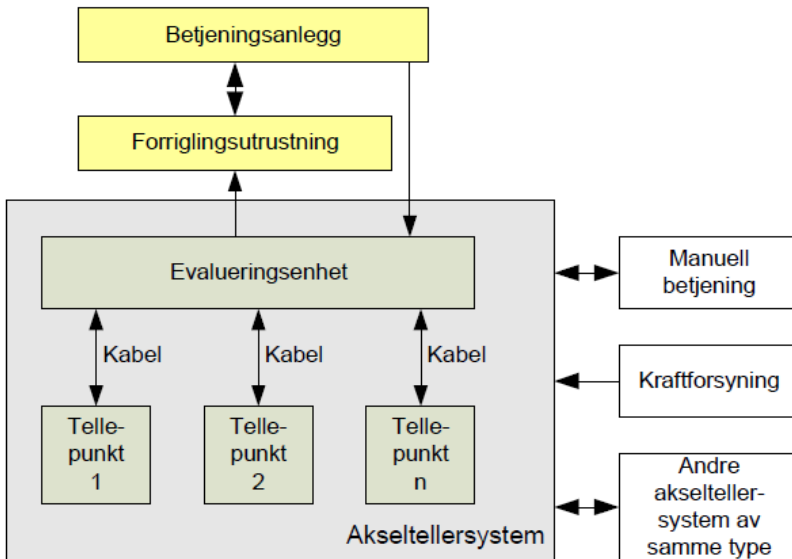
Størrelsen på transformatoren er gitt av størrelsen til jernkjernen, dette avgjør hvor mange magnetiske feltlinjer som kan passere gjennom den. En større strøm i primærviklingen vil resultere i økt flukstetthet i jernkjernen, dette gir til flere magnetiske feltlinjer. Ved maksimalt antall feltlinjer kalles jernkjernen mettet, dette metningspunktet avgjøres av størrelsen på jernkjernen. Ved metningspunktet induseres altså nært maksimalt med strøm på sekundærsiden. Hvis transformatoren er i metning vil feltlinjer søke ut i luften rundt jernkjernen og feltlinjene vil møte mye større motstand enn i kjernen. Transformatoren altså vil overføre spenning ved et tilnærmet lineært forhold frem til metningspunktet, hvor en ytterligere økning i strøm på primærsiden vil føre til en relativt liten økning på sekundærsiden av transformatoren.

I sporfeltene brukes magnetisk metning i transformatorene som en sikkerhetsbarriere for å beskytte tilførsel- og returkrets. Her er sporfeltreléet mest sensitiv for høye strømmen, som vil gi redusert levetid eller ødelegge denne komponenten.¹⁸



Figur 2.10: Sjematisk oppbygging av sporfeltet[24]

¹⁸Transformatorer i metning er ofte et problem i kraftindustrien fordi det begrenser kraftoverføringen, men sporfelter er det tilsvarende egenskap som beskytter tilførsel- og returkretsen mot store strømmen.



Figur 2.11: Skjematisk oppbygning av akseltellersystemet[25]

2.2 Akseltellere

Akseltellere er et digital togdeteksjonssystem, basert på punktdeteksjon av togets akslinger i form av toghjul. Dette systemet detekterer tog på bestemte punkter langs sporet, altså stedene der detektorene er plassert. Denne typen togdeteksjon skiller seg fra sporfeltene som indikerer tilstedeværelsen av tog kontinuerlig på sporavsnittet.

Selve deteksjonen utføres ved at tellesensoren montert på skinnen setter opp et magnetfelt over skinnehodet. Når magnetfeltet brytes, ved at et toghjul passerer sensorens plassering, sendes det et signal til en datamaskin ved siden av sporet som teller antallet toghjul.

Figur 2.11 viser skjematisk oppbygning av akseltellerne, hvor evalueringseenheten bruker telleenhetene til å bestemme når tog passerer inn og ut av en blokkstrekning. Logikken i akseltellersystemet fungerer ved at blokkstrekningen blir belagt ved at toghjul passerer en sensor, som forteller sikringssystemet at blokkstrekningen er belagt, og hvilken retning toget passerer. Systemet frigir ikke strekningen før antall hjul ut og inn på blokkstrekningen er likt.

Feilretting på systemet har begrenset geografisk omfang, dette kommer av den punktbaserte deteksjonen. Dermed er det kun sensorene i hver ende som må vedlikeholdes ved feil. Motsetningen er sporfeltene med kontinuerlig deteksjon, dermed kan også feil oppstå i hele sporavsnittets lengde. Akseltellersystemet bruker sensorer som utfører

to tellinger i hver ende av blokkstrekningen, for å bestemme retningen til toget. Dette gir

2.3 Måleteori

Denne seksjonen vil ta for seg målemetoder og tasting¹⁹. Disse emnene vil være avgjørende for hvilke resultater man kan få ut fra overvåkning av sporfelter. Det finnes store variasjoner i hvilke enheter som kan måles, hvordan og hvor målingene utføres. De generelle retningslinjene for målingsoppsettet er at de i liten grad bør påvirke enheten som måles, i tillegg bør oppsettet i seg selv kreve lite vedlikehold og tilsyn.

2.3.1 Målemetoder

Til måling av sporfelter mest interessant å måle elektriske karakteristikker, siden dette driver sporfeltene. Målbare enheter innfor dette feltet er strøm, spenning og impedans. Strøm måles i hovedsak ved å detektere et spenningsfall eller ved måling av effektene på et magnetfelt. Av potensielle målemetoder for nevnte fysiske enheter er målinger ved hjelp av:

- Motstandsmåling
- Hallgenerator²⁰

Motstandsmåling

Baserer seg på å sette inn en motstand i kretset på ønsket målepunkt, deretter å måle spenningsfallet over denne med en instrumenteringsforsterker. Ulempen med dette er endringer i kretsen ved å sette inn en motstand. Dette er ugunstig i et sikkerhetssystem som sporfeltene, fordi sikringsanlegget må endres og kontrolleres på nytt.

Hallgenerator

Denne sensoren setter opp et magnetfelt i nærheten av en elektrisk leder. Når en elektronstrøm²¹ passerer gjennom lederen og blir strømmen påvirket av magnetfeltet ved en kraft som trekker ladningene mot den ene sideflaten i den elektriske lederen. Ut fra dette dannes et potensiale på tvers av sideflatene i lederen som er proporsjonal mellom elektronhastigheten²² i lederen og feltstyrken. Ved kjennskap til feltstyrken i sensoren, kan det oppståtte potensiale måles, man har fra dette et mål på strømmen som går i lederen.

¹⁹en. sampling

²⁰en. Hall-effect sensor

²¹Elektrisk strøm

²²Strømstyrken

Fordelen med denne typen måling er at installasjonen av sensorene ikke påvirker systemet, da de kan monteres rundt eksisterende ledere, uten endringer i anlegget.

2.3.2 Indirekte måling

Denne fremgangsmåten kan brukes hvis enheten det er ønskelig å måle er vanskelig å måle eller er utilgjengelig. Dermed vil ønskelig enhet estimeres ut ifra en modell, i tillegg bruke andre måleenheter til å fremskaffe ønsket måling. Det er viktig med denne metoden at modellen som brukes har tilstrekkelig nøyaktighet.

Indirekte måling fungerer ved å observere en verdi og finne en annen verdi ut i fra et gitt forhold, som for eksempel Ohms lov, gitt av *ligning 2.4*[21, s. 52].

$$v = i \cdot R \rightarrow R = \frac{v}{i} \quad (2.4)$$

Ligning 2.4 representerer $R[\Omega]$ motstand, V spenning og I strøm.

2.3.3 Filtrering

Filtrering av signaler er nødvendig når signalene man vil måle skal ekstrahere uønsket støy. Samtidig må ikke filtrering brukes for å fjerne viktige signalkomponenter som påvirker sporfeltenes operasjon. Sporfelter kan påvirkes av returstrøm fra KL-anlegget, men oppbygningen av sporfeltene på 95/105 Hz er konstruert for å ikke interferere med noen av de harmoniske overtonene til KL-anlegget på $16\frac{2}{3}$ Hz[16, kap. 3.1]. Impedansspolene brukt mellom sporavsnitt brukes som et filter for å slippe returstrømmen gjennom og blokkere sporfeltstrømmen, dette er altså en filterfunksjon.

2.3.4 Tasting

Tasting²³ er en punktprøving av et signal, og utføres når analoge signaler skal representeres digitalt.

Fenomenet oppstår fordi det er praktisk umulig å representere et korrekt analogt signal i en digital datamaskinen. Tasting er altså prøver/målinger man tar av det analoge signalet, prøvene genererer en digital signalverdi av dette. Det digitale signalet blir derfor angitt i et endelig antall bit. Målet med tastingen er å ha muligheten til å gjenskape det analoge signalet så korrekt som mulig, fra det tastede digitale signalet.

Det digitale signalet er kun en tilnærming til originalen og vil i praksis aldri kunne gi en korrekt representasjon. Målet er derimot å skape en så god tilnærming som gjør at «viktig informasjon» fra originalsignalet ikke går tapt, som amplitude og frekvensinnhold.

²³en. sampling

Alle signaler kan representeres som en fourierrekke, det vil si en sum av sinuskomponenter med forskjellig frekvens. Der summen av alle leddene i rekken er lik det opprinnelige analoge signalet. Dette er gyldig fordi fourierrekken er definert som en uendelig sum av frekvenskomponenter. Hvor nøyaktig forierrekken representerer det analoge signalet er gitt med antall ledd fra fourierrekken som brukes.

Fourierrekker kan benyttes for å analysere frekvensspekteret til signalet. Dette kan videre brukes til å vurdere hvilke frekvenser som oppstår når signalet tastes. Kjennskap til disse tilleggsfrekvensene er viktig fordi det kan forveksles med det opprinnelige signalet.

Fourieranalyse gjør signalene lettere å jobbe med fordi hvert fourierledd har hver sin frekvens, det analoge problemet har dermed blitt digitalt. Derfor kan problemet behandles/løses ved hjelp av en datamaskin. Ved fouriertransformasjon av et tidsvarierende signal har man mulighet til å få vurdere frekvensspekteret til signalet. Dermed kan man analysere frekvensen, eventuelle variasjoner i denne og støy, som ikke vises tydelig ved kun å vurdere det tidsvarierende signalet.

Aliasing

Tasting av signaler er ikke problemfritt, et problem som ofte assosieres med tasting er aliasing. Hvis analoge signaler skal representeres digitalt vil man i utgangspunktet taste med så høy frekvens som mulig, for å sikre en god digitalt representasjon av signalet. I praktiske anvendelser medfører veldig høy tasting av analoge signaler et unødvendig høyt minnebruk, eller stor bruk av båndbredde til overføring av signalet.

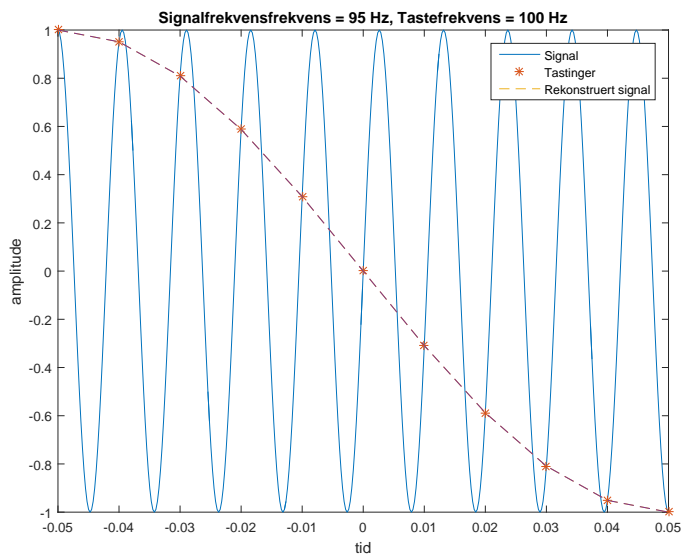
Tasting fører altså med seg spørsmålet om det finnes et optimalt forhold mellom tastefrekvens og minneforbruk. Hvor det viktigste poenget er muligheten til å gjenskape det analoge signalet så korrekt som mulig ved hjelp av det tastede digitale signalet.

En høy tastefrekvens i forhold til det punktet aliasing unngås defineres som et overtastet signal, dette krever stor lagringskapasitet og inneholder ofte mer informasjon enn nødvendig. Har derimot det analoge signalet for lav tastefrekvens kan informasjon gå tapt. *Figur 2.12* viser tasting og gjenskaping av det analoge signalet på bakgrunn av det digitale, tastefrekvensen er for lav og dermed vil dette fremstå som et signal med lavere frekvens enn det opprinnelige. Resultatet er altså en forvrengning av signalet, i form av feil frekvens. Sistnevnte problem med undertasting kalles nedfolding²⁴.

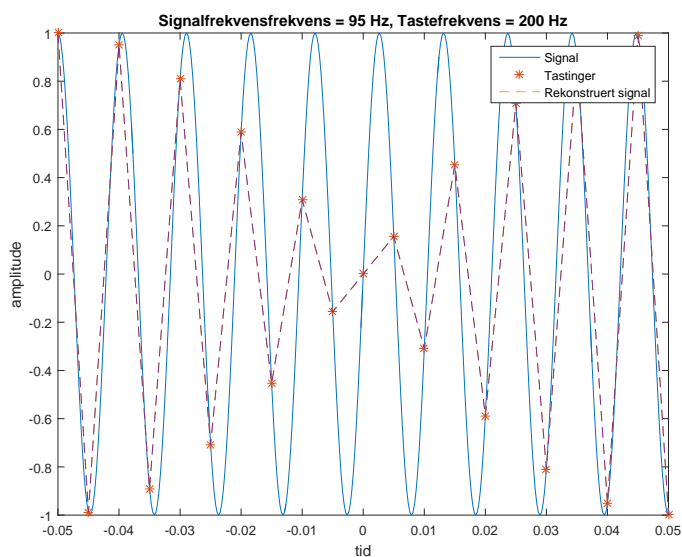
Aliasing betyr tilsynelatende eller forvekslet/forkledd som noe annet. Dette fenomenet medfører som tidligere nevnt et tap av informasjon. Dermed vil forsøk på å gjenskape signalet gi et ukorrekt signal, i form av en annen «tilsynelatende» frekvens, som

²⁴en. aliasing

illustrert i *figurene 2.12, 2.13, 2.14*. Nevnte figurer viser tasting av et 95 Hz -signal på ulike frekvenser, på henholdsvis 100 Hz –, 200 Hz – og 500 Hz .²⁵

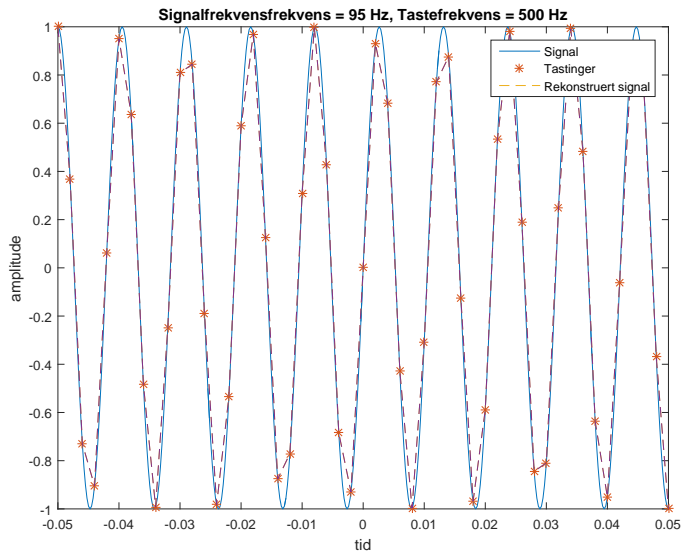


Figur 2.12: Illustrasjon av tastefrekvens på 100 Hz , *Figur: Olav Kallerud*

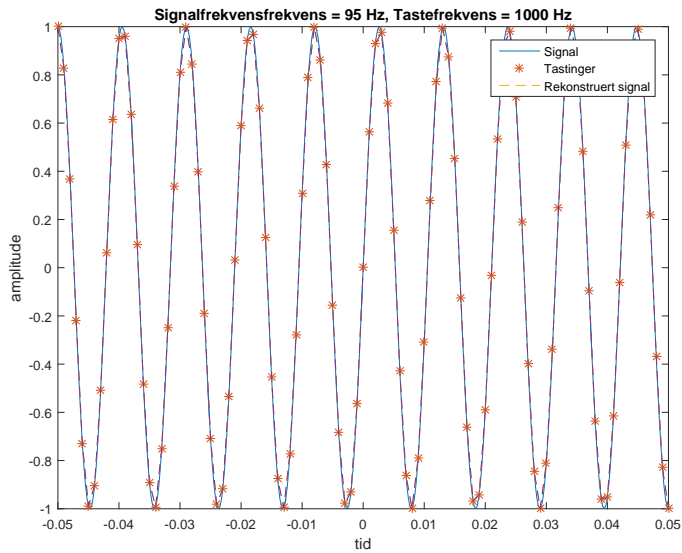


Figur 2.13: Illustrasjon av tastefrekvens på 200 Hz , *Figur: Olav Kallerud*

²⁵Matlabkoden for generering av figurene finnes i vedlegg B.1



Figur 2.14: Illustrasjon av tastefrekvens på 500 Hz, *Figur: Olav Kallerud*



Figur 2.15: Illustrasjon av tastefrekvens på 1000 Hz, *Figur: Olav Kallerud*

Shannons tasteteorem

Grensen der ved en gitt frekvens og høyere der ingen frekvensinformasjon går tapt, ved tasting av et signal bestående av en sinusbølge. Dette er representert ved en matematisk sammenheng som har gitt en grense hvor problemet med nedfolding kan

unngås.

Sammenhengen er gitt av høyeste frekvenskomponent i signalet og tastefrekvensen. Ulikheten som gir sammenhengen er gitt av Shannon tasteteorem gitt av *ligning 2.5*, som gir at tastefrekvensen minimum kan være to ganger høyere enn den største frekvenskomponenten i det tastede signalet[26, s. 71-72].

$$F_T > 2 \cdot F_{maks} \quad (2.5)$$

I *ligning 2.5* representerer F_T tastefrekvensen og F_{maks} den høyeste frekvenskomponenten, gyldighetsområdet for tasting av signalet er i tidsrommet $-\infty$ til $+\infty$ [26, s. 72].

Nyquistfrekvensen

Nyquistfrekvensen er gitt av *ligning 2.6* følger som et spesialtilfelle av Shannons tasteteorem²⁶. Der tastefrekvensen er nøyaktig lik to ganger største frekvenskomponent til signalet som tastes. Denne frekvensen er punktet hvor det er mulig å gjenskape det analoge signalet fra det tastede digitale, underliggende angir ligningen en frekvens hvor nedfolding ikke forekommer for det spesifikke signalet[27, s. 28].

$$F_N = F_T = 2 \cdot F_{maks} \quad (2.6)$$

I *ligning 2.6* representerer F_N Nyquistfrekvensen, F_T tastefrekvensen og F_{maks} den høyeste frekvenskomponenten til signalet.

Tastefrekvensen bør i praksis være mye høyere enn Nyquistfrekvensen, dette er for å overkomme ikke-ideell flankesteilhet ved bruk av praktiske antifoldingfiltre[26, s. 73].

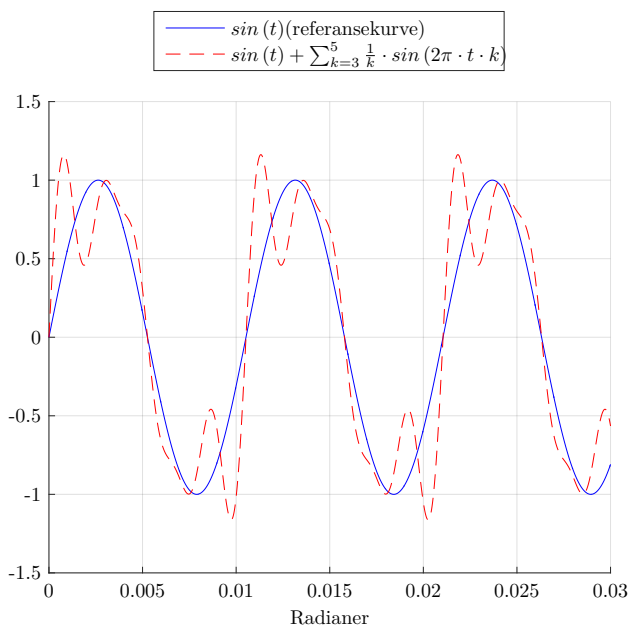
Tastefrekvens i praksis

Det var tydelige forskjeller på hvordan tastefrekvens rett ved og under Nyquistfrekvensen påvirket det tastede signalet. Ved å studere *figur 4.13* kan man observere at tastingene på 95 Hz ble påvirket av en annen frekvenskomponent, altså en periodisk kurve med lavere frekvens. I nevnte figur er denne lavere frekvensen vist på tilhørende frekvensspekteret, med toppen på 55 Hz.

Ved tasting blir altså signalet påvirket av tastingen, påvirkningen følger et fast sammenheng som kommer av følgende relasjon:

$$F_{Topp} = f_T - f_S \quad (2.7)$$

²⁶Se *ligning 2.5*



Figur 2.16: Sinuskurve med overharmoniske komponenter, figur: Olav Kallerud

I *ligning 2.7* angir F_{Topp} den tastegenererte frekvenstoppen, f_T er tastefrekvensen og f_S er signalfrekvensen. Videre kan denne effekten gitt av *ligning 2.7* observeres frekvensspektrene gitt i *figurene 4.13, 4.14 og 4.15*.

I *figur 2.16* kan effekten av overharmoniske komponenter som påvirker et rent sinussignal. Det er tydelig mye støy som påvirker signalet på grunn av de harmoniske overtonene.

2.4 Vedlikehold

Vedlikehold kreves for å opprettholde tekniske systemers pålitelighet og tilgjengelighet. Sikkerhetskritiske systemer som signalsystemet i jernbanen krever i tillegg vedlikehold for å ivareta sikkerheten ved fremføring av tog. Det er mange måter å utføre vedlikehold på, utvalget varierer på hvordan de ivaretar pålitelighet, tilgjengelighet og sikkerhet. Nevnte faktorer blir ofte betegnet av Reliability, Availability, Maintenance and Safety (norsk: Pålitelighet, Tilgjengelighet, Vedlikehold og Sikkerhet) (RAMS). De fire faktorene RAMS består av henger tett sammen og påvirker hverandre. For eksempel krever ofte høy pålitelighet og tilgjengelighet på systemene et omfattende vedlikehold.

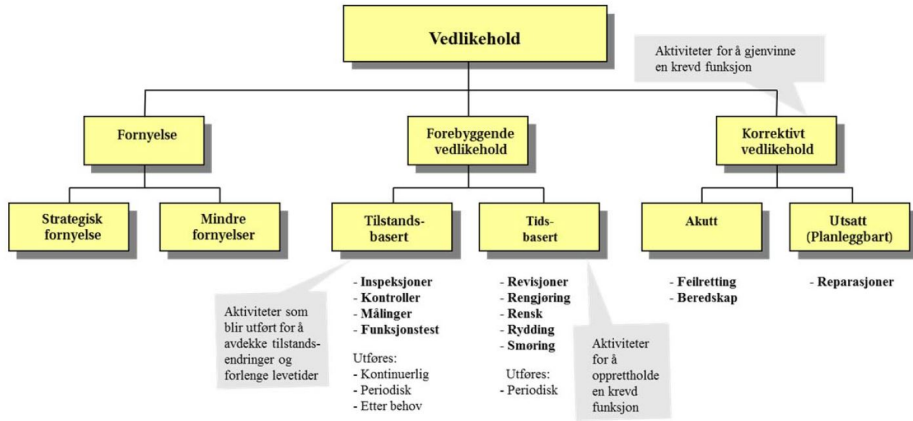
I jernbanesammenheng er sikkerhet første prioritet, så hvis sikkerheten står i fare for å ikke holde gitte mål, ivaretas sikkerheten på bekostning av påliteligheten til togene. Alternativet ville være å sørge for at togene kjørte uavhengig av feil på linjen, som ville gått på akkord med sikkerheten.

De ulike vedlikeholdstrategiene er ofte en overveiing mellom kostnader med å utføre vedlikeholdet og hvilken effekt det har på RAMS-elementene. For å sikre opprettholdelsen av RAMS-kravene er det forskjellige fremgangsmåter for å utføre vedlikehold. Fremgangsmåtene skilles fra hverandre ved bestemmelse av når vedlikehold utføres, hva som utføres og hvilken informasjon som foreligger av komponentene eller systemene som skal vedlikeholdes.

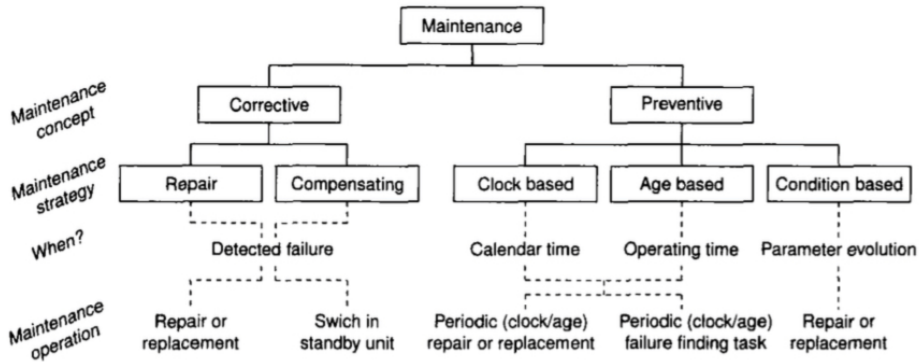
2.4.1 Vedlikeholdsmodeller

Det eksisterer flere vedlikeholdsmodeller, med dette begrepet menes hvordan vedlikehold planlegges og organiseres. Norsk jernbaneinfrastruktur vedlikeholdes på bakgrunn i Jernbaneverkets vedlikeholdsmodell gitt i *figur 2.17*, som er vedlikeholdsmodellen presentert i Jernbaneverkets vedlikeholdshåndbok[1].

En annen modell for vedlikehold presenteres i «*System Reliability Theory*» av Rausand og Høyland[9]. Denne alternative modellen gitt av *figur 2.18*. Hovedforskjellen ligger i Jernbaneverkets modell sidestiller forebyggende- og korrektivt vedlikehold med fornyelse. I motsetning til *Rausand og Høylands* modell i *figur 2.18*, hvor fornyelse brukes som et virkemiddel på nederste nivå under forebyggende- og korrektivt vedlikehold. Med andre ord bruker nevnte forfattere fornyelse som et alternativ til reparasjon. Dette gir grunnlag for å velge mellom alternativene ut i fra hva som er optimalt gitt hva som lønner seg både økonomisk og pålitelighetsmessig.



Figur 2.17: Jernbaneverkets vedlikeholdsmodell[1, Figur 2.1(s. 6)]

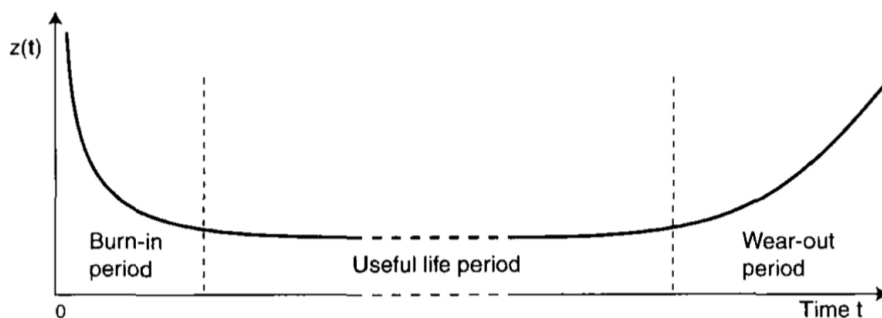


Figur 2.18: Alternativ vedlikeholdsmodell[9, Figur: 9.3, s. 363]

Fornyelse

Fornyelse som vedlikeholdsstrategi, defineres av Jernbaneverkets vedlikeholdsmodell gitt av figur 2.17, men av Rausand og Høyland defineres den ikke, se figur 2.18.

Denne typen vedlikehold går ut på å erstatte komponenter eller systemer, i praksis for å kompensere for komponenter som ikke lenger produseres. Denne typen vedlikehold er derfor systemer som ikke lenger utfører ønsket oppgave med tilfredsstillende karakteristikker. Men omfatter også komponenter som har en veldig høy feilrate, ofte på grunn av høy alder. Alternativt brukes dette til å erstatte komponenter som ikke lenger er økonomisk eller pålitelighetsmessig gunstig å reparere.



Figur 2.19: Badekarkurve[9, Figur: 2.5, s. 21]

2.4.2 Badekarkurven

En mye brukt modell for komponentens levetid er badekarkurven gitt av *figur 2.19*. Feilraten gitt av $z(t)$, beskrives av badekarkurven som er delt inn i tre faser. Den første delen av kurven beskrives som «*Burn-in period*» som beskriver feilraten ved med opphav i barnesykdommene til systemet, etter dette kommer «*Useful life period*» som er driftsperioden med relativt lav feilrate, til sist kommer «*Wear-out period*» som beskriver perioden hvor forventet levetid er over og feilraten øker.

Det er et generelt mål for komponenter å være så lenge som mulig i driftsperioden, denne forlenges ved vedlikehold av komponenten, altså utsette tredje fase av badekarkurven.

2.4.3 Vedlikeholdsstrategier

Tidsbasert vedlikehold

Vedlikehold som gjennomføres på bakgrunn av gitt kalendertid eller et tidsbestemt intervall defineres ved tidsbasert vedlikehold. Tidspunktet for vedlikehold blir satt på grunnlag av tid siden forrige gjennomførte vedlikehold, eller på bakgrunn av dato (kalendertid).

Denne vedlikeholdsstrategien er utbredt i oljeindustrien, som en følge av at vedlikeholdsstedet er utilgjengelig, som ofte er tilfelle på oljeplattformer og medfører store tap ved feil som følge av tapte inntekter ved nedetid. På grunn av oljeplattformenes plassering er det høye kostnader knyttet til konstant tilgjengelighet av vedlikeholdspersonell og skip til dette formålet. Derfor blir mye vedlikeholdsarbeid samlet til å utføres på et begrenset tidsintervall. Dette sparer kostnader fordi leie skip, utstyr og personell kun blir innenfor et begrenset tidsrom.

Driftsstans i oljebransjen medfører store tapte inntekter. Derfor blir store deler av vedlikeholdet utført i god tid før forventet levetid er over. For å sikre at komponentene ikke svikter før de får livsforlengelse ved hjelp av vedlikehold eller erstattes av en ny, før forventet levetid²⁷ er nådd. Ulempen med denne typen livsforlengende vedlikehold er en vedlikeholdsfrekvens som i de fleste tilfeller er unødvendig høy, og derfor kostbar. I enkelte tilfeller påfører også vedlikeholdet slitasje, hvis det innebærer demontering av komponenter og systemer. Strategien gir altså et stort antall arbeidstimer og komponenter risikerer å bli erstattet lenge før levetiden er over.

Generiske arbeidsrutiner er hovedmetoden for å utføre forebyggende vedlikehold på jernbanen i skrivende stund. Dette arbeidet består av inspeksjoner og testing av utstyr, som skal utføres til gitte datoer. Målet med dette er å utføre levetidsforlengende arbeider, for å utvide driftsperioden.²⁸ Generiske arbeidsrutiner er et typisk eksempel på tidsbasert vedlikehold.

Aldersbasert vedlikehold

Denne typen defineres ikke i *figur 2.17*, men kan vurderes som en del av tidsbasert vedlikehold. Denne vedlikeholdsstrategien knyttes opp mot alderen eller driftstiden til et system. Hvor driftstid kan omfatte antall hendelser ved antall omlegginger av en sporveksel, kilometer kjørt av et tog og antallet timer i operasjon. Dette krever omfattende kontroll med målinger av lenge eller hvor mye operasjon systemet har opplevd.

Dette vedlikeholdskonseptet brukes på biler, hvor bilen har et anbefalt serviceintervall ved et gitt antall kilometer kjørt. Dette brukes da som et indirekte mål på slitasje på bilens komponenter. Ut i fra hvilken service (nummer i rekken av servicer) som gjennomføres er det ulike slitedeler som byttes og kontrolleres. Idéen bak dette er servicevedlikeholdet skal sikre pålitelig operasjon av bilen frem til neste planlagte service.

Tilstandsbasert vedlikehold

Vedlikehold av denne typen blir utført med bakgrunn av observasjon eller måling av en eller flere parametere til et system. Hvis noen av parameterne har nådd en gitt grenseverdi iverksettes vedlikeholdstiltak. Derfor vedlikeholdes komponenten med utgangspunkt i komponentens målte tilstand, og da forhåpentligvis faktiske tilstand. Dermed tar vedlikeholdet høyde for komponentvariasjoner og ulik slitasje i motsetning til andre vedlikeholdsstrategier. Tilstandsbasert vedlikehold kalles også forutseende vedlikehold²⁹[9, s. 363].

²⁷Se «Weart-out period» i badekarkurven på figur 2.19

²⁸Forleng «useful life»-perioden gitt i badekarkurven, figur 2.19

²⁹(en. «predictive maintenance»)

Måling av tilstand kan bli utført kontinuerlig eller ved diskrete intervaller. Tilstanden kan enten måles av et automatisert måleoppsett, eller ved inspeksjon av vedlikeholdspersonell. Sistnevnte metode er i de fleste tilfeller kostbar i drift på grunn av behov for inspektører. Men et automatisert måleoppsett vil medføre en høyere investeringskostnad.

Fordelen med tilstandsbasert vedlikehold ligger i overvåkingen, og dermed oversikten infrastruktureier får over infrastrukturen som overvåkes. Overvåkingen vil kunne gi innsikt i komponentenes tilstand, slitasje og funksjonsnivå, i tillegg til lagrede historiske data fra hver av de overvåkede komponentene. Dermed mulighet for å få større innsikt i livsforløpet, videre å kunne estimere badekarkurven for komponenten og systemene som overvåkes.

Et praktisk eksempel på tilstandsovervåking er lufttrykkmåling av bildekk på nyere biler, som automatisk måler at lufttrykket er innenfor gitte grenser. Riktig lufttrykk hindrer unødvendig slitasje på bildekket. Sjåføren blir varslet av melding inne i bilen om lavt lufttrykk, som bør utbedres.

Hvis tilstandsovervåking brukes riktig vil det spares kostnader på sikt og øke påliteligheten til systemet, hvis riktige tiltak utføres på bakgrunn av målingene. Dermed gir dette et bedre grunnlag å bestemme når vedlikeholdet skal utføres. Dette blir alternativet til vedlikeholdsstrategier som ikke måler men har statiske modeller for komponenter med ulik levetid, med tilstandsovervåking vil disse modellene kunne oppdateres med korrekt tilstand for å overvåke livsløpet til systemet. Dermed vil vedlikeholdet utføres på bakgrunn av komponentens faktiske tilstand, ikke standardiserte estimeringer av levetiden, som er uavhengige av slitasje. Dette er veldig ulik ut fra hvor trafikk som forekommer på linjen, og hvilken type materiell som brukes. Med tilstandsbasert vedlikehold vil tidspunktet systemet byttes eller vedlikeholdes være nærmere det optimale, relativt til de andre vedlikeholdsstrategiene. Det vil si bedre utnyttelse av hver komponenter og muligheter for mer effektiv planlegging av vedlikeholdet.

2.4.4 Forebyggende vedlikehold

Vedlikehold som blir gjennomført på en komponent som fungerer etter hensikt, altså uten funksjonsfeil, blir omtalt som forebyggende vedlikehold. Denne typen vedlikehold søker å forlenge driftsperioden gitt av badekarkurven i *figur 2.19*. Vedlikehold består i å redusere eller fjerne begynnende feil eller svakheter, uten at denne feilen blir akutt.

2.4.5 Korrektivt vedlikehold

Når en komponent svikter eller ikke utfyller tiltenkt funksjon kreves korrektivt vedlikehold. Denne typen vedlikehold utføres ofte etter feil eller svikt i et system har oppstått[9, s. 365]. Feilen oppdages i mange tilfeller ved driftstans, noe som medfører nedetid og forsinkelser. Målet med denne typen vedlikehold innebærer å få systemet tilbake i normal drift.

Jernbaneverket opererer med to underkategorier for korrektivt vedlikehold, akutt og utsatt. De skilles i på ved «akutt» krever umiddelbart vedlikehold, ved «utsatt» får man en viss tid til å utbedre feilen. Denne klasseinndelingen brukes i Banedata, så alle registrerte feil enten er AKV eller UKV, for å definere hvilke type vedlikeholdsoppgave som skal utføres.

AKV

AKV er mest kritiske feilkategori, som representerer feil hvor sikkerhet eller punktlig-
het påvirkes direkte. Denne typen feil er ofte tidskrevende å vedlikeholde, fordi det ikke er mulig å planlegge. Motsetningen er å finne og løse problemet/feilen før det medfører driftstans. Dette betyr at vedlikeholdspersonell blir sendt ut for feilretting etter at den kritiske feilen har oppstått.

Denne typen feil medfører ofte driftforstyrrelse, men det er ikke alltid tilfelle. Feil oppdages i mange tilfeller av togleder som observerer belagt spor der de vet at det ikke befinner seg tog. Men det er mest sannsynlig at det oppstår en driftforstyrrelse på høytrafikkerte strekninger. Grunnen til dette er mindre tid fra feil oppdages, til vedlikeholdspersonell har tid til å utbedre den.

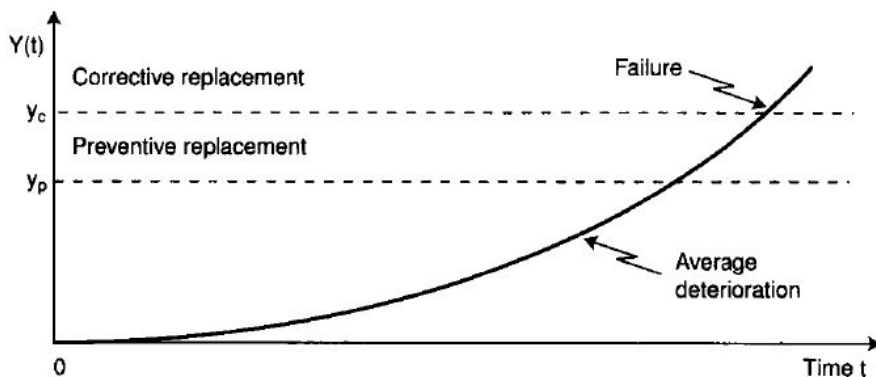
UKV

Feil registret som UKV havner i denne kategorien med korrektivt vedlikehold når det oppdages funksjonsfeil, men av ulike grunner kan vedlikeholdet utsettes en viss tid.

UKV som ikke utbedres i tide overføres til AKV. Dermed er det en stor fordel om så mange feil som mulig kan oppdages og kategoriseres som UKV. Dermed vil infrastruktureier ha tid til å utbedre den begynnende svikten før den gir utslag som påvirker punktligheten i jernbanen, altså flyttes til AKV. Typen vedlikehold som havner i denne kategorien er avhengig av en form for deteksjon av en variabel som kan beskrive problemet. Alternativt noen som ser og oppdager feil hvor det i tillegg er tid til å rette opp feilen før den blir akutt. Følgen av dette er UKV-registreringer stort sett registres ved generiske arbeidsrutiner.

2.4.6 «Reliability Centered Maintenance»(RCM)

Pålitelighetsstyrt vedlikehold er metoden Jernbaneverket bruker for å optimalisere det forebyggende vedlikeholdet[1, s. 26]. Dette vedlikeholdskonseptet skal sørge for optimalt forhold mellom akutt og forebyggende vedlikehold. Dette danner grunnlaget for generiske arbeidsrutiner, som er vedlikeholdsinspeksjoner og -arbeider som skal gjennomføres for å opprettholde ønsket pålitelighet og opptid for infrastrukturen.



Figur 2.20: Forebyggende- og korrektiv vedlikeholdssgrense[9, Figur: 9.15, s. 391]

2.5 Tilstandsovervåkning

Måling av parametere som kan beskrive funksjonsnivået til en komponent eller system kalles tilstandsovervåkning. Dette er for å hente inn informasjon om systemkriterier, slitasje og andre potensielle feil eller funksjonsreduksjon.

I dag er metoden for tilstandsovervåking i hovedsak manuell inspeksjon. Dette er kostbart fordi vedlikeholdspersonell bruker mange arbeidstimer på dette, ofte uten å utrette noe konkret, bare å bekrefte at en komponent fungerer. Med automatisert tilstandsovervåkning vil man kunne måle en eller flere parametere som kan beskrive tilstanden til et objekt, i tillegg til å gi alarm ved kjente feilnivåer registrert av målingene.

Tilstandsovervåkning av sporfelter

Den drivende enheten i sporfelter er strøm. Derfor er det naturlig å måle strømmen som driver sporfeltreléet, eventuelt kan en annen enhet måles indirekte av dette.³⁰

Målinger på sporfelter

Måling av variabler tilknyttet sporfelter kan utføres flere steder. For eksempel kan målepunktet på en elektrisk leder kan gi utslag hvis lederen er lang, fordi motstand i ledningen vil gi utslag på måleresultatet. Forskjellige deler av sporfeltkretsen kan være utsatt for ulike typer støy, det mest fremtredende eksemplet er på måling ved de ulike sidene (primær- og sekundærside) av en transformator.

Målestedet må velges på bakgrunn av hvilke parameter som skal måles. Måleenheten kan være utsatt for støy et sted, og essensiell informasjon kan være fjernet et annet sted. Derfor må målestedet ta hensyn til disse parameterne.

Det er mulig å kompensere for uønskede frekvenser, beskrevet i *seksjon 2.3.3*. Dette gjøres ved å måle en viss uønsket frekvens for deretter å trekke denne fra signalet som skal måles, ved hjelp av filtrering. Problemet med dette er potensialet for å utelukke deler av strømmen som påvirker sporfeltkretsen. Dermed vil filtrering av målesignalet kunne gi indikasjon på at en krets er fullt fungerende, men i virkeligheten kan det være en driftsfeil på grunn av en kraftig støykilde som påvirker operasjonen.

En annen essensiell del av måling på sporfelter, er hvilke informasjon om sporfeltene som kan hente ut ved målinger. Strøm vil kunne måles for å se overgangskurver mellom fritt og belagt spor, i tillegg til eventuell mellomfaser. Dette vil gi en dynamisk respons på strømmen ved sporfeltreléets overgang fra tiltrekk til frafalt eller omvendt.

³⁰Se avsnitt 2.3.2

Måling på impedans i kretsen vil kunne vise endrede karakteristikk på endret avledning, ødelagt skinneskjøt, løs kabler ol. Denne typen målinger kan utledes ved hjelp av indirekte målinger³¹. Endrete impedansverdier vil sannsynligvis ikke ha høy frekvens, men det vil være mulig å se utvikling over lengre tid.

Tilstandsovervåkning av andre infrastrukturobjekter

Det har tidligere blitt utført pilotprosjekter på sporveksler i Norge. Utover dette er det mulig å tilstandsovervåke de fleste av infrastrukturobjektene i jernbanen. Men det er naturlig å starte med de objektene som forårsaker flest feil eller mest timer med driftsfeil. De mest aktuelle andre objektene utover sporfelter å tilstandsovervåke er følgende:

- Sporveksel (- pilot på Trondheim stasjon)
- Sporvekselvarme
- Jording

Tilstandsovervåkning av sporveksler er tidligere installert og testet et tilstandsovervåkningssystem for sporveksler på Trondheim stasjon. Sporveksler er derfor et relevant system for sammenligning og erfaringsoverføring til tilstandsovervåkning av sporfelter.

Målingene på vekselen blir utført ved å måle strømtilførselen på drivmaskinene koblet til sporvekselen. Dette er en relativt treg bevegelse, dette gjør verifikasjon av tilstandsovervåkingen er lettere å etterprøve ved observering av vekselen. I tillegg har sporvekselen et veldig begrenset geografisk omfang.

For en sporveksel er strømforbruket i motoren proporsjonal med kraften som påføres sporvekselstungen. Derfor måles strømtilførselen til drivmaskinene som styrer sporvekslene. Dermed kan man detektere en sporveksel som ikke når ønsket posisjon, ved at den har en strømkurve som er større enn forventet, i tillegg til å kjenne motorens karakteristikk.

Tilstanden til sporvekslene bestemmes ved å sammenligne referansekurven for en sporveksel i god stand. På grunnlag av dette bestemmes type feil ut fra målingens avvik i forhold til referansen. Forskjellige typer avvik i strømkurven er opphav til ulike typer feil knyttet til sporvekselen. Eksempler på feil er manglende smøring, defekte tungeruller og fysisk hindring i vekselen.

³¹Se seksjon 2.3.2

Kapittel 3

Metode

Dette kapitlet beskriver fremgangsmåtene som er brukt på å innhente og bearbeide informasjon og data i denne oppgaven. Det vil også inkludere beskrivelse av de viktigste litteraturkildene som er brukt i rapporten.

Denne oppgaven bygger på følgende kilder til informasjon og data:

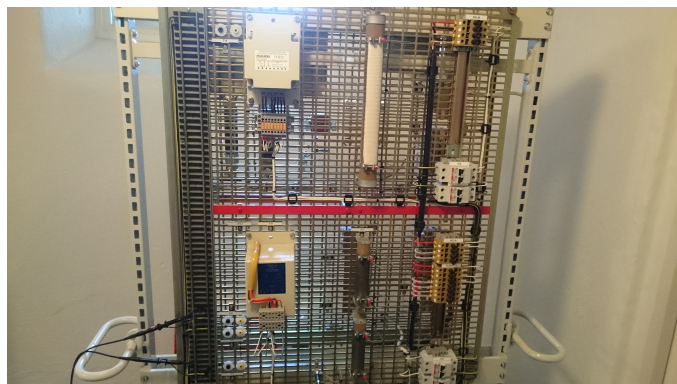
- Banedata
- Litteraturstudium
- Sporfeltsimulator

3.1 utfordringer med rapporten

For å kunne belyse problemstillingen og forsknings spørsmålene var det behov for innsikt i feil og problemer ved og rundt sporfelter. Dette ble innhentet fra fagpersoner i Jernbaneverket og fra Banedata, Jernbaneverkets database for feilregistrering og oppfølging av feil på infrastruktur. Det var behov for værd data til undersøkelser hvor feil skulle sammenlignes med klimapåvirkninger, disse dataene ble hentet fra Metrologisk Institutt. Til vurdering av muligheter og nytteverdi for tilstandsovervåkning var det behov for litteratur på området, ble studert ved å gjennomføre et litteraturstudium.

Hovedutfordringene har vært å bestemme utformingen av rotårsaksanalysen, i tillegg å vurdere hvilke tidsrom og geografiske områder klimapåvirkningsanalysen skal omfatte. Det kom tidlig fram, ved litteratursøk etter forskningsartikler og annen litteratur på sporfelter, tilstandsovervåkning og kombinasjonen av disse var veldig lite utbredt. De fleste artikler om dette er fra England, som bruker andre typer sporfelter enn Norge. Men har vurdert dette til anvendelig med modifikasjoner ut fra forutsetninger basert på forskjellene mellom sporfeltsystemene.

Det er utført målinger på en sporfeltsimulator, som står på Norsk Jernbaneskole på Grorud i Oslo. Dette er en modell av et sporfelt av typen $AC\ 95 - 105\ Hz$, med relé, tilførselskrets, returkrets og spor, hvor lengden av sporavsnittet er modellert med en elektrisk motstand for å illustrere motstanden som finnes i skinnene. I *figur 3.1* vises et bilde av simulatoren, med sporet til venstre på riggen i bildet.



Figur 3.1: Sporfeltsimulator på Jernbaneskolen, *Foto: Olav Kallerud*

Sporfeltsimulatorene gjør det mulig å gjøre målinger på et sporfelt uten å forstyrre togtrafikk med å måle på et i drift. Målet med å bruke sporfeltsimulatorene i denne rapporten er å illustrere måleprinsipper på en sporfeltskrets med $95\ Hz$ strømsignal. Hovedskille mellom simulatoren og en ekte sporfelt er at simulatoren ikke har en realistisk støypåvirkning.

3.2 Data, fremgangsmåte og prosedyrer

Denne seksjonen vil beskrive hvordan data ble samlet inn, og hvilke valg som er tatt i forbindelse med dette. Dataenes og metodenes pålitelighet vil vurderes, i tillegg er styrker og svakheter.

3.2.1 Banedata

Banedata er som tidligere nevnt Jernbaneverkets database for feilregistreringer på jernbaneinfrastrukturen. Databasen består av 32 kolonner, med blant annet dato for feil, når feilen er rettet, beskrivelse, feilårsak, feilkategori, infrastrukturkategori, om feilen medfører driftsforstyrrelse osv.

Data fra Banedata vurderes til å være pålitelige siden databasen driftes av infrastruktureieren, Jernbaneverket. Banedata inneholder data flere år tilbake i tid, men

gikk gjennom store endringer fra 2004-2006¹, derfor ansees ikke data, datert til før 2007 som pålitelige.

Utvalget av data brukt i denne oppgaven omfatter tidsrommet fra og med 2010 til og med 2015. Datasettet inneholder feil relatert til sporfelter og tilhørende reléer, dette er i hovedsak feilkodene for sporfelter(SPF) og sporfeltreléer(SFR), men også feil registrert på sporveksler og apparatskap er inkludert når de har påvirket sporfeltene. Dataene fra Banedata er hentet ut av systemet ved hjelp av Johanne Norstein Klungre i Jernbaneverket, i perioden fra februar-mars, 2016. Datasettet inneholder feil fra hele landet, innenfor angitte tidsrom.

Styrker og svakheter

Styrken til Banedata er at det fungerer som «kommunikasjonskanal» mellom de som planlegger vedlikeholdet og de som utfører vedlikeholdet, og på bakgrunn av dette loggfører all vedlikeholdsrapportering. Dette fungerer altså som innrapportering av feil, fordeling av vedlikeholdsoppdrag på bakgrunn av oppdagede feil. Systemet fungerer som grensesnitt mellom alle aktører i forbindelse med feilforbedring og -registrering. Banedata kan med stor sikkerhet brukes til å vurdere tidspunkt feil har oppstått. Mindre pålitelig, men brukbart er feilkategorier og årsaker som er registrert med feilen. Banedata er den informasjonen som finnes om infrastrukturfeil på sporfelter.

Ulempene med databasen er flere. For det første er det tilsynelatende ukonsekvent bruk av feilkoder. Dette gir redusert statistisk verdi og krever i noen tilfeller kvalitativ gjennomgang og retting av kvantitative data, noe som er veldig arbeidskrevende. I tillegg medfører dette en ny årsak mer upålitelige data, fordi korrigeringen blir sannsynligvis gjennomført av personer som ikke selv har førstehåndskjennskap til den aktuelle feilen.

Det virker å være store forskjeller på banesjefområdene som hvor nøye data på sporfelter blir utfylt.² I tillegg til dette er det store forskjeller til signalmontør til signalmontør på hvordan feil fylles ut, hvor mye som beskrives og hvilke kategorier feilen får, som en følge av at mange feil er potensielle kandidater for flere kategorier.

Datasettet som benyttes i denne oppgaven er som nevnt i tidsrommet, 2010-2015, som inneholder to feilkodesett. Grovt sett er det gamle feilkodesettet feil i perioden 2010-2013 og det nye fra 2014-2015. Forskjellen ligger i utskiftning av tre feilkategorier,

¹Ifølge Johanne Norstein Klungre i Jernbaneverket

²Dette kommer veldig tydelig fram på oversikten over alle instansene av sporfelter i Norge, finnes i dokumentvedlegget

som består av følgende:

Gammelt feilkodesett	Feilkode	Aarsak	Loesning
Nytt feilkodesett	Utstysrfeil	Konsekvens	Aarsak_nyFKS

Endringen av feilkategoriene har ikke endret antallet kategorier(kolonner) i Banedata, og de tre utskiftningene har erstattet korresponderende plasser i databasen. Det nye feilkodesettet gir en mer hierarkisk oppdeling av feilkodene, som gir større mulighet til å skille feilene, dermed kunne lese mer ut av disse.

3.2.2 Værdata

Målte værparametere er hentet fra Metrologisk institutt(MET), ved hjelp av instituttets klimadatabase som er tilgjengelig via e-portalen «eklima.met.no». På denne portalen kan historiske værdata fremskaffes fra alle Instituttets målestasjoner, dette inkluderer værstasjoner tilhørende Jernbaneverket og Statens vegvesen.

Arbeidet med å velge og finne baneområder i nærheten av en målestasjon som måler aktuelle parametere har vært krevende. Det er store ulikheter i hvilke parametere hver målestasjon registrer, og hvor lenge de har vært i drift. De prioriterte klimaparameterne har vært nedbør og temperatur, i tillegg til snødybde som sekundærprioritering, men sistnevnte måleverdi registreres på få målestasjoner. Derfor har tilgjengelige målinger på jernbanenære værstasjoner påvirket valget av strekningene som er analysert.

Geografisk inndeling

En enhetlig inndelingen av områder på jernbanen har vært til hjelp for å fremstille avgrensede geografiske områder. Det var i dette arbeidet ansett som mest hensiktsmessig å dele områdene inn i banesjefområder, som det finnes 17 av i Norge i skrivende stund, se *figur 3.2*. Banesjefområdene ble valgt på grunnlag av en overveiing av geografisk oppløsning og arbeidsmengde i forbindelse med bearbeiding av dataene. Valget falt på banesjefområder fremfor baneområder gir en finere oppløsning på jernbanenettet.

Styrker og svakheter

Fordelene med værdataene, er påliteligheten til målingene. Dataene hentet fra MET vurderes som pålitelige, siden instituttet er et statlig forvaltningsorgan som har lang fartstid med metrologi[29]. De fleste stasjoner har data på nedbør og temperatur, veldig få registrer snødybde.

Ulempen med værdataene er begrenset tilgjengelighet på måldata fordi det ikke finnes målestasjoner på alle steder man skulle ønske, i denne sammenhengen, langs hele jernbanenettet. I tillegg er det som tidligere nevnt begrensninger i hva hver



Figur 3.2: Geografisk plassering av bansjefstrekninger i Norge[28]

stasjon måler. Dette kom fram etter oppdagelsen at de fleste målestasjoner ikke registrerer snødybde. Det har også begrensninger i tid, i forbindelse med opprettelse og nedleggelse av målestasjoner. På toppen av dette er det perioder hvor noen målestasjoner ikke har samlet inn data.

Det er kun et mindre antall registrerte feil knyttet til begrensede geografiske områder, som gjør det problematisk med lite datagrunnlag ved vurdering av klimapåvirkninger. Overveingene baseres på minkende antall feil på mer begrenset geografisk område, mot økt usikkerhet i klimaparametere ved vurdering av større et område.

Nedbørsdata

Utgangspunktet for klimaanalysen var medianen av feil fordelt på alle månedene i året, over flere år. Medianen er brukt for å gi et mer riktig mål på målinger over flere år, siden denne funksjonen er mindre sensitiv for ekstremutslag, i motsetning til gjennomsnitt. Analysen som inneholder flere måneder og år utjevner verdiene, noe som gir et tap av informasjon, men muligheter til å se mer generelle trender.

I *tabell 3.1* er det angitt hvilket banesjefområde, målestasjoner og kilometermål på banen³ som er brukt på månedsbasert klimapåvirkningsanalyse. I figuren er vises data for snødybde i Trondheim med parentes. Plasseringene til målestasjoner og banestrekninger er illustrert på kartene funnet i *vedleggene: F.1, F.2, F.3 og F.4*.

Banesjefområde	Målestasjon(målestasjonsnummer)	Målestasjon koordinater	Fra km	Til km
Kongsvinger (og Gjøvikbanen)	Årnes(4920)	60.126, 11.3933	40	108
Dovrebanen Sør	Harmar - Stavsberg(12320)	60.818, 11.0697	100	157
Sørlandsbanen vest	Obrestad Fyr(44080)	58.6592, 5.5553	525	600
Dovre- (og Raumabanen)	Trondheim -Voll(68860)-(Leistrand(67150))	63.4107, 10.4538-(63.328, 10.2737)	500	534

Tabell 3.1: Data på målestasjoner og strekninger på månedsbasert analyse

For å få frem en finere oppløst graf enn månedsverdiene er døgnerverdier brukt til å analysere klimapåvirkning. Totalt antall millimeter nedbør og snittemperaturen for hver dag og antallet feil per dag sammenstilt, over en periode på en måned. Hvilket måned i datasettet er valgt ved å se hvilke måned som har registrert flest antall feil, for å skape et større statistisk grunnlag. Valgte målestasjoner og områder er gitt av *tabell 3.2*.

Banesjefområde	Målestasjon(målestasjonsnummer)	Målestasjon koordinater	Bane
Kongsvinger (og Gjøvikbanen)	Skedsmo(4260)	59.9775, 10.9777	Kongsvingerbanen
Oslo	Oslo - Blindern PLU(18701)	59.9423, 10.7201	Oslo
Bergensbanen Vest	Mjølnfjell(51800)	60.7022, 6.9373	Bergensbanen

Tabell 3.2: Data på målestasjoner og strekninger på døgnerbasert analyse

³Altså standard kilometermål på Jernbanen, fra 0 km på Oslo S, dette gjelder for alle baner unntatt Nordlandsbanen som starter på 0 fra Trondheim S

3.2.3 Litteraturstudium

Litteratursøket er basert på internettsøk med søkemotorene: «<http://www.oria.no>»⁴, «<http://www.google.com>», «<http://www.scholar.google.com>» og «ieeexplore.ieee.org». Søk i nevnte søkemotorer har vært utført ved bruk av følgende søkeord, og kombinasjoner av disse på sine respektive språk(norsk og engelsk): «Sporfelt», «Tilstandsovervåkning», «Track circuit» og «Conditional monitoring». Resultatet av søkene etter forskningsartikler resulterte i et begrenset antall artikler fra England. Artiklene funnet om tilstandsovervåkingen av sporfelter i England rettet seg i hovedsak mot audiofrekvente sporfelter av typen TI21, disse brukes også i Norge men er lite utbredt.⁵

Hoveddelen av *kapittel 2* som danner det teoretiske grunnlaget for videre diskusjon i *kapittel 5*, er basert på litteraturstudiet. Dette har vært utfordrende fordi litteratur om sporfelter er som nevnt veldig begrenset, og da spesielt om tilstandsovervåking av disse. Bøkene om sporfelter i litteraturgrunnlaget er funnet med hjelp av Vidar Larssen i Jernbaneverket, som har henvist til relevant litteratur. Dette har vært avgjørende for resultatet i oppgaven, i tillegg spart mye tid på leting etter relevant stoff på temaet. Bøker innen vedlikeholdsteori og måleteknikk gjeldende faglitteratur som brukes i pensum til emner på NTNU i sine respektive temaer.

Sentrale litteraturkilder

«**Teori i sporfeltforståelse**» av **Rolf Gillebo**[16] - Gir en grundig beskrivelse og forklaring på sporfelter og kjente feil og støykilder. Dette heftet er ikke en utgitt bok men et internt hefte i Jernbaneverket.

Arbeid på signalanlegg 1[10] - Denne boka er faglitteratur knyttet til utdanningen av signalmontører på jernbanen. Her beskrives signaltekniske konsepter og -begreper i detalj.

Systems reliability and safety[9] - Er en fagbok innen sikkerhet, pålitelighet og vedlikehold. Den beskriver prinsippene rundt RAMS og vedlikeholdsstrategier på en god måte. Boka er pensumlitteratur i blant annet emnet: «TPK4120 -Industriell sikkerhet og pålitelighet» på NTNU.

Teknisk regelverk [23] - Er en nettbasert samling dokumenter som angir dokumentasjon på alt av Jernbaneverkets anlegg, både prosjektering, vedlikehold og RAMS-krav. Det er Jernbaneverket som drifter samlingen. Innholdet ansees for å være veldig pålitelig siden infrastruktureier utgir informasjonen.

⁴Universitetsbiblioteket i Trondheims nettportal for litteratursøk

⁵Se vedlegg: C.1

3.2.4 Svakheter ved analysen

En svakhet i arbeidet er at forfatteren ikke har lyktes i å finne frem til tidligere, tilsvarende forsøk på å finne sammenhenger mellom sporfeltfeil, rotårsaker og andre faktorer, vurderinger rundt tilstandsovervåking tradisjonelle sporfelter. Hvis dette hadde vært tilgjengelig ville dette antagelig gitt mer innsikt i valg og kriterier for valg av tidsoppløsning og geografisk område, samt andre erfaringer ved en slik analyse.

Som nevnt innledningsvis er det lille som finnes av publiserte artikler som tar for seg sporfelter og tilstandsovervåking fra England, hvor togselskapene bøllegges for forsinkelser i togtrafikken. Dette er en sterk pådriver til å effektivisere vedlikeholdet og øke kontrollen på jernbaneobjektene som forårsaker mest forsinkelser, da ved tilstandsovervåking. Som en følge av stor engelsk innflytelse på området omhandler forskningen audiofrekvente sporfelt av typen TI21. Den største forskjellen på TI21 og 95 – 105 Hz er at førstnevnte er konstruert for å unngå påvirkninger fra returstrømmen (KL-anlegget), derav TI (Traction Independent). Returstrøm er en type støy som påvirker de tradisjonelle sporfeltene i Norge.

3.2.5 Analytiske tilnærminger

I analysen av feil mot klimaparametere hvor flere år vurderes er de to feilkodesettene kombinert. Dette lar seg gjøre uten tap av gyldighet fordi de endrede kategoriene ikke brukes i analysen, og dette ble utført før dette ble besluttet å ikke bruke disse kategoriene videre, kun tidspunkt oppstått, arbeidstype (WORKTYPE), altså AKV/UKV, og driftsforstyrrelse benyttes til inndeling.

Det er utført mindre endringer i form av utfylling av manglende felter i banedata, dette ble gjort før endelig fordeling ble valgt. De endrede feltene er kun der nytt- og gammelt feilkodesett er sammenstilt, men der endrede kategorier anvendes er feilkodesettene separert og ikke endret, altså opptrer i original form. Tidligere tomme felt er markert med grått i databasen, endrede felt på bakgrunn av tekstbeskrivelse i Banedata er markert med oransje.⁶

Sporfeltfordelingen

Sporfeltene registrert i Banedata var preget at store mangler i utfyllingen av typen sporfelter, i tillegg var notasjonen inkonsistent. Det er gjennomført et forsøk på å rettet opp manglende i tabellen, endringene er i hovedsak basert på kunnskap fra Vidar Larssen i Jernbaneverket. Betegnelsen på sporfelt med betegnelsen AC 95/105 Hz var representativ, men underkategoriene av typen (I, II, III, IV)⁷ er korrigert ut i fra trender sett i de utfylte delene av datasettet. Siden underkategoriene under

⁶Se vedlagt datagrunnlag fra Banedata

⁷Se teknisk regelverk for mer informasjon om underkategoriene[23]

$AC\ 95/105\ Hz$ ikke skal brukes videre i denne oppgaven ble dette vurdert som et akseptabelt estimat.

3.3 Bearbeidelse av data, figurer, tabeller og grafer

Bearbeidelse av Banedata og værdata er utført ved hjelp av regnearkprogrammet Microsoft(MS) Excel. Pivottabeller er brukt i nevnte regnearkprogram til å sammenstille og strukturere dataene fra Banedata. Pivottabeller brukes til å fremstille kubiske data.⁸ Dette gjøres ved å pivotere⁹ om en kolonne i databasen. Dette verktøyet har gitt muligheten til å fremstille utvalgte kategorier fra et større datasett som Banedata, på en oversiktlig måte.

I pivottabellene velger man kolonner i regnearket som legges i en av de følgende kategoriene: «Rows», «Columns», «Filters» og «Values». De feltene som er identiske for alle pivottabeller i denne rapporten, feltene bruker «Rows» med driftsforstyrrelse og deretter «WORKTYPE»¹⁰, «Values» som summerer innholdet i kolonnen med «Banesjef», siden dette er et felt alle feil har fylt ut. Sistnevnte variable bruke ikke til noen andre ting i rapporten. Dette ender i en variable som endres tabell til tabell, er «Column»-feltet, aktuell kategori brukt her er angitt i hvert enkelt av pivottabellene.

Figurer fra MS Excel har blitt eksportert i «.PDF»¹¹-format, som utføres ved å velge eksporter fra hovedmenyen. For deretter å bruke den «.PDF»-baserte figuren direkte i teksten.

Mathworks MATLAB er brukt til å lage grafer ut i fra gitte funksjoner. MATLAB er brukt til å bearbeide dataene hentet inn fra sporfeltsimulatoren på Norsk Jernbaneskole. Dataverktøyet ble brukt til å plote grafer og generere fouriertransformasjonen til målte verdier på sporfeltene.

Tabeller presentert i oppgaven med opphav i MS Excel er konvertert til rapporten ved hjelp av et tillegg til MS Excel kalt «Table to Latex»¹². Dette er et eget programtillegg som når det er installert ligger under fanen «Add-Ins». Tillegget utfører en enkel formatendring fra Excel-celler til \LaTeX -format, som denne rapporten er skrevet i. Figurer fra MATLAB er eksportert ved hjelp av et tillegg som beskrevet i *vedlegget B.3*.

Måleutstyret som er brukt er et oscilloskop til målinger på sporfeltsimulatoren på Norsk Jernbaneskole. Dette er et digitalt oscilloskop med muligheter for to parallelle

⁸Begrepet kubiske data betyr multidimensjonale data. Disse kan sjeldent gjengis en graf fordi dataene inneholder for mange variabler, og dermed kan de ikke presenteres på en oversiktlig måte

⁹Rotere

¹⁰De mulige verdiene her er AKV og UKV

¹¹Portable Document Format

¹²Tillegget kan lastes ned fra <http://www.ctan.org/pkg/excel2latex>

målinger. Oscilloskopet er av merket «TiePie Engineering», modell «Handyscope - HS3». Dette måleinstrumentet kan kobles direkte til en PC, hvor målingene registreres med medfølgende software. Måleutstyret ble lånt på Institutt for teknisk kybernetikk på NTNU, Trondheim.

Kapittel 4

Resultater

Dette kapittelet vil omfatte en rotårsaksanalyse, resultater av korrelasjon mellom klima og sporfeltfeil og målinger på sporfeltsimulator på Norsk jernbaneskole. Førstnevnte analyse vil finne fram til feil, årsaker og sammenhengen mellom disse, for å finne frem til rotårsakene for feil på sporfelter. Deretter vil det klimapåvirkninger og sporfeltfeil sammenstilles for å se hvordan klimaet påvirker sporfeltene. Målinger utført ved sporfeltsimulatoren på Norsk jernbaneskole er også presentert, for å vise effektene av måleprinsipper på sporfelter med 95 Hz-signalstrøm.

4.1 Rotårsaksanalyse

Analyse av rotårsaker til sporfeltfeil gjennomføres for å finne frem til utløsende faktorer for feil. Målet med analysen er bedret innsikt i hva som faktisk forårsaker feil, ikke bare der feilen oppdages eller kommer til syne. Rotårsaksanalysen vil starte med problembeskrivelse ved «critical incident»-tabeller. Deretter vil registrerte årsaker til feildataene analyseres ved pareto-diagrammer. Avslutningsvis vil analysen presentere «cause-and-effect»-diagrammer, for å beskrive feil og korresponderende årsaker som kan knyttes til disse.

4.1.1 Feilfrekvens

For å beskrive problemene brukes «critical incident»-tabeller bestående av registrerte feil, fordelt på feilkoder i Banedata.¹ Dette er for å kartlegge hvilke type feil som forekommer mest hyppig. Tabellene viser feilkoden og hvor mange ganger feilen har forekommet, tillegg er tabellen fordelt hierarkisk på driftsforstyrrelse, hvor henholdsvis 1 og 0 representerer med og uten driftsforstyrrelse. Nivået under er kolonner for fordelingen av AKV og UKV presentert for hver feilkodekategori.

¹De spesifikke feilkodene er «Feilkode» og «Utstysfeil», i henholdsvis nytt- og gammelt feilkodesett

Tabell 4.1: Critical incident-tabell av gammelt feilkodesett(2010-2013). *Tabell: Olav Kallerud*

Count of Banesjef	Column Labels						
Row Labels	AKV	UKV	0 Total	AKV	UKV	1 Total	Grand Total
834 Feilaktig togvegutløsning				1		1	1
Tungerulle fungerer ikke (blank)		1	1		1	1	1
831 Feilaktig kjøresignal				1		1	1
Jordfeil					1	1	1
944 Andre arbeider					1	1	1
806 Friksjon løs/stram	1		1	1		2	2
Feil på skilt					2	2	2
Tunge ute av posisjon i lengderetning	1		1		1	1	2
818 Avbrent lampe	3		3				3
931 Skinnevandring/skinnebrudd	1		1	3		3	4
824 Sporveksel/sporsperre ikke i kontroll	4		4	1		1	5
808 Låst i unormal stilling	2		2	6		6	8
823 Strombrudd	6		6	5		5	11
804 Treg/sitter fast/skåret	8	1	9	3		3	12
805 Slark i bolter	5	6	11	5		5	16
811 Brann/oppbrent	7	2	9	10		10	19
819 Jordfeil	6		6	13	2	15	21
833 Sporfelt ikke belagt av tog	8	2	10	16	1	17	27
809 Slitt - ute av justering	11	15	26	13	1	14	40
891 Umotivert signalfall	12	1	13	29		29	42
816 Lav ballastmotstand	25	1	26	20	3	23	49
892 Signal lar seg ikke stille	16	2	18	34	1	35	53
802 Deformering/bøyet/knust	26	10	36	19	1	20	56
803 Del løsnet	34	8	42	40		40	82
812 Kontaktfeil	56	5	61	59	3	62	123
817 Avbrent sikring	35	1	36	93		93	129
814 Løs ledning	77	5	82	72	1	73	155
801 Mekanisk brudd/sprekk	55	9	64	89	4	93	157
813 Ledningsbrudd	147	10	157	172	7	179	336
899 Ingen feil funnet	257	13	270	228	2	230	500
898 Andre feil	195	138	333	178	6	184	517
815 Kortslutning	1040	10	1050	1127	8	1135	2185
Grand Total	2038	240	2278	2239	45	2284	4562

Critical incident tabellene

Det er tydelig av *tabell 4.1*, at kortslutning representerer en stor andel av feilene, med rett i underkant av halvparten av disse. Videre følger «andre feil», med den høyeste andelen av UKV. «Andre feil» er en samlekategori for feil som ikke passer i noen av de andre feilkategoriene, fordi de fleste andre er direkte knyttet til spesifikke feilkategorier. Dermed er det sannsynlig at feil knyttet til utskiftninger og annen type vedlikehold faller inn under denne kategorien. På tredje mest forekommende feil er «Ingen feil funnet» som angir en feil som har forårsaket problemer, men feilen og grunnen til det ikke er funnet, deretter har feilen forsvunnet av seg selv. Sistnevnte fenomen omtales ofte som «blunkbelegg». De neste 7 kategoriene er forskjellige mekaniske feil som påvirker sporfeltene.

Tabell 4.1 viser at kortslutninger forekommer veldig ofte. På grunn av dette er nevnte kategori utdypet med årsaker i tabell 4.2. De to mest hyppige kategoriene i denne tabellen representerer samme årsak, altså metallspen fra skinne eller toghjul som kan løsne på grunn av slitasje. Dette kan føre til kortslutning av skinnestrengene eller isolerte skjøter. Tredje mest forekommende feilen er «andre årsaker», altså ikke-kategoriserbare årsaker. Den fjerde representerer «ukjente årsaker», dette er sannsynligvis som tidligere nevnt blunkbelegg. De to etterfølgende er «isolasjonsfeil» og «skadet isolert skjøt» som i mange tilfeller kan være det samme, fordi en skadet isolert skjøt også kan være en isolasjonsfeil.

Tabell 4.2: Utdyping av tabell 4.1, årsaker fra «815 Kortslutning», *Tabell: Olav Kallerud*

Count of Banesjef	Column Labels							
		0		0 Total	1		1 Total	Grand Total
Row Labels	AKV	UKV		AKV	UKV			
914 Falsk tilførsel				1		1	1	1
963 Kondensvann				1		1	1	1
951 Avsporing/påkjørsel/oppkjørsel	1		1					1
913 Strømbuud				1		1	1	1
952 Gnagere				1		1	1	1
935 Dårlig drenering				1	1	2	2	2
996 Snorydding	1		1	1		1	1	2
904 Mangler smøring/renhold	2		2					2
905 Korrosjon - rust/irr mm.	2		2	1		1	1	3
961 Overspenninger ved lynnedslag				3		3	3	3
964 Snø og is	1		1	3		3	3	4
936 Salt/forurensing	2		2	2		2	2	4
922 Betjeningsfeil	3		3	1		1	1	4
959 Andre utilsiktede skader	2		2	3		3	3	5
915 Salt/forurensinger	2		2	5		5	5	7
962 Flom/regn/ras ol.	1		1	6		6	6	7
942 Pågående arbeider - Elektro	2		2	6		6	6	8
954 Overspenninger ved KL-strøm	1		1	10		10	10	11
932 Manglende eller skadet skinnfeste	3	1	4	8		8	8	12
906 Mekanisk overbelastning	6		6	8		8	8	14
944 Andre arbeider	5		5	9	1	10	10	15
901 Materialfeil	7		7	10	1	11	11	18
969 Annet	9		9	12		12	12	21
911 Elektrisk overbelastning	6		6	17		17	17	23
953 Rystelser vibrasjoner	10		10	13		13	13	23
924 Dårlig skrudd	18		18	6		6	6	24
903 Unormal slitasje	8	1	9	18		18	18	27
917 Støv/skitt/annet belegg	18		18	13		13	13	31
941 Pågående arbeider - Linjen	8		8	25		25	25	33
943 Pågående arbeider - Entreprenør	18		18	31		31	31	49
921 Feil montert/justert	15	1	16	33	2	35	35	51
931 Skinnevandring/skinnebrudd	44	3	47	42		42	42	89
902 Normal slitasje	41		41	56		56	56	97
933 Skadet isolert skjøt	34		34	75		75	75	109
912 Isolasjonsfeil	52	3	55	75	2	77	77	132
999 Årsak ukjent	85		85	105		105	105	190
998 Andre årsaker	117		117	131		131	131	248
937 Metallspen (slidepen, borspen mm.)	162		162	125	1	126	126	288
916 Metallspen/borspen mm.	354	1	355	269		269	269	624
Grand Total	1040	10	1050	1127	8	1135	1135	2185

Tabell 4.3: Critical incident-tabell av nytt feilkodesett(2014-2015)². Tabell: Olav Kallerud

Count of Banesjef	Column Labels						
Row Labels	AKV	UKV	0 Total	1		1 Total	Grand Total
Rele - DSI - kontaktfeil		1	1				1
Rele - andre - kontaktfeil	1		1				1
Trykk knapp - Kontaktfeil	1		1				1
Rele - Sporfelt - feilaktig ikke frafalt				1		1	1
Avsporingindikator - defekt	1		1				1
Rele - Sporfelt - feilaktig ikke tiltrekt	1		1				1
Driv-/kontrollkontakter - isolasjonsfeil				1		1	1
Skilletrafo - defekt	1		1				1
Kontrollstenger - deformert				1		1	1
Skilletransformator ST-10 - defekt				1		1	1
Annet kommunikasjonsutstyr - defekt				1		1	1
Strømtilførsel - brudd	1		1				1
Kabelskjøt - brudd					1	1	1
Tilførselkrets - ladeutstyr - defekt	1		1				1
Deksel - Deformert/ Løsnet				1		1	1
Tilførselkrets - likeretter - brudd				1		1	1
Overdragtransformator - sikring - brudd				1		1	1
Tilførselkrets - transformator - isolasjonsfeil				1		1	1
10 KHz-generator - defekt				2		2	2
898 Andre feil		2	2				2
Sikring - brudd				2		2	2
Overdragtransformator - brudd				3		3	3
(blank)		2	2		1	1	3
Tilførsel-/returkrets - overspenningsvern - defekt				4		4	4
Driv/kontroll-linjaler/stenger - deformert	3		3	2		2	5
Tilførsel-/returkrets - motstand - brudd	2		2	4		4	6
Overdragtransformator - isolasjonsfeil				6		6	6
Tilførsel-/returkrets - transformator - brudd				6		6	6
Årsak ukjent				6		6	6
Kabelskjøt - isolasjonsfeil	1	2	3	6		6	9
Tilførsel-/returkrets - transformator - isolasjonsfeil	2		2	7	1	8	10
Klemlist, koplingspunkt - isolasjonsfeil	2	1	3	8		8	11
Kabel - isolasjonsfeil	2	4	6	9		9	15
Kabel - brudd	6		6	9	1	10	16
Klemlist, koplingspunkt - brudd	10		10	17		17	27
Tilførsel-/returkrets - sikring - brudd	11	1	12	24		24	36
Ledning - isolasjonsfeil	19	6	25	21		21	46
Sportilkopling - isolasjonsfeil	31	9	40	35	2	37	77
Sporfelt - ute av justering	4	70	74	5		5	79
Sportilkopling - brudd	42	9	51	36	1	37	88
	42	50	92	42	1	43	135
Ledning - brudd	65	5	70	76	2	78	148
Skinneskjøt - isolasjonsfeil	128	2	130	206	2	208	338
Ingen feil funnet - beskrives i notatfeltet	171	29	200	208	1	209	409
Utstysrfeil uten kode - beskrives i notatfeltet	179	54	233	298	5	303	536
Grand Total	727	247	974	1051	18	1069	2043

En fjerdedel av feilene i *tabell 4.3* er «Utstysrfeil uten feilkode», videre er omtrent tilsvarende størrelse på nummer to med kategorien: «Ingen feil funnet», noe som gjør feilanalysen av dette datasettet statistisk lite informativt. Grunnen til dette er at ingen direkte informasjon om hvilke type feil som befinner seg i disse kategoriene. En annen interessant observasjon er antallet ikke-utfylte felter, markert med «*blank*» (tomt

²Merk: «*blank*» (tomt felt) er faktisk ikke-utfylte felter i banedata, mens «(blank)» er utfyllt som dette i Banedata

felt) og «(blank)», dette kan være registrerte vedlikeholdsarbeider som derfor ikke har noen kontret feil eller bare manglende utfylling av kategorien. En tydelig strukturell endring i feilkodesettene er utstrakt bruk av flere lag med kategorier, i form av overordnet og spesifikk feilgruppe, for eksempel «Kabelskjøt - isolasjonsfeil» og «Sportilkobling - brudd».

Tabell 4.4: Utdyping av tabell 4.3, årsak fra «Utstyrfeil uten kode», *Tabell: Olav Kallerud*

Count of Banesjef	Column Labels						
	0		0 Total	1		1 Total	Grand Total
Row Labels	AKV	UKV		AKV	UKV		
Nettspenning borte	1		1				1
Vanninntreging	1		1				1
Brann				2		2	2
Gnagere	1		1	3		3	4
Korrosjon - rust/irr mm.	2	1	3	2		2	5
Betjeningsfeil	1		1	5		5	6
Overspenning ved KL-strøm	1		1	7		7	8
Dårlig tilskrudd	2		2	8		8	10
Overspenning ved lynnedslag	3		3	10		10	13
Elektrisk overbelastning	2		2	13		13	15
Feil montert/justert	11	1	12	7		7	19
Rystelser/vibrasjoner	10		10	15		15	25
Pågående arbeider	10	5	15	23		23	38
Normal slitasje	6	25	31	11	4	15	46
Støv/skitt/annet belegg	17	9	26	21		21	47
Støv/skitt/annet belegg	25		25	38	1	39	64
Årsak ukjent	20	7	27	43		43	70
Annen årsak - beskrives i notatfeltet	66	6	72	90		90	162
Grand Total	179	54	233	298	5	303	536

Utdypende årsaker av den mest forekommende feilkategorien fra *tabell 4.3*, «Utstyrfeil uten feilkode», vises i *tabell 4.4*. Lignende resultat som tidligere beskrevet i *tabell 4.3*, beskrives de to kategoriene med flest feil er «Annen årsak» og «Årsak ukjent», som er lite informative kategorier i en analyse. Kategorien «Støv/skitt/annet belegg» er tredje mest forekommende feil, dette kan både være relatert til kortslutninger av skinnestrenger og isolerte skjøter. Men sistnevnte kan også være rust og andre belegg på skinnestrengene, dette kan potensielt medføre farlige feil som følge av manglende kontakt mellom skinne og toghjul, altså dårlig kortslutning av skinnestrengene.

I *tabell 4.5* er en del av verdiene gruppert for enklere kunne sammenligne *tabell 4.1*, som åpner for å lettere vurdere nytt- og gammelt feilkodesett opp mot hverandre. Ved denne modifikasjonen genereres tabellen fra det nye feilkodesettet til noe mer lignende formen til det gamle feilkodesettet.

Sikkerhetsfeil er som nevnt i *kapittel 2*, relativt sjeldene i dagens signalsystem. Av *critical incident*-tabellene er det noen av feilkategoriene som gir indikasjon på dette, men det er ikke komplett fordi mange kan være skult i andre som også

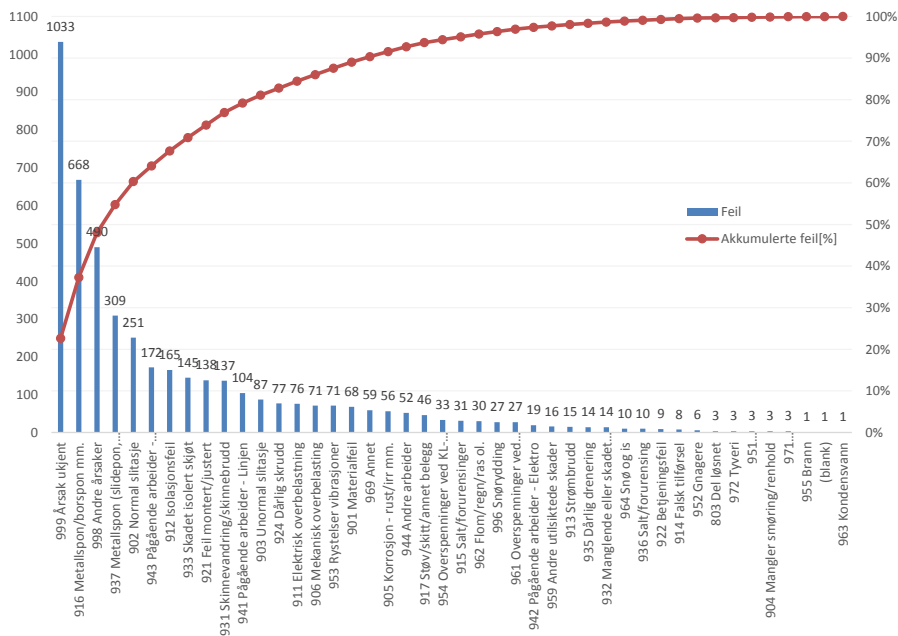
Tabell 4.5: Gruppering av kategorier i tabell 4.3, *Tabell: Olav Kallerud*

Count of Banesjef	Column Labels						
	0		0 Total	1		1 Total	Grand Total
Row Labels	AKV	UKV		AKV	UKV		
Skilletrafo - defekt	1		1				1
Rele - Sporfelt - feilaktig ikke tiltrekt	1		1				1
Avspøringsindikator - defekt	1		1				1
Deksel - Deformert/ Løsnet				1		1	1
Rele - Sporfelt - feilaktig ikke frafalt				1		1	1
Skilletransformator ST-10 - defekt				1		1	1
Rele - DSI - kontaktfeil		1	1				1
Trykk knapp - Kontaktfeil	1		1				1
Rele - andre - kontaktfeil	1		1				1
898 Andre feil		2	2				2
(blank)		2	2		1	1	3
Overdragstransformator - brudd				3		3	3
Årsak ukjent				6		6	6
Defeltes	4		4	10		10	14
Sporfelt - ute av justering	4	70	74	5		5	79
Blank	42	50	92	42	1	43	135
Brudd	137	15	152	176	5	181	333
Ingen feil funnet - beskrives i notatfeltet	171	29	200	208	1	209	409
Isolasjonsfeil	185	24	209	300	5	305	514
Utstysfeil uten kode - beskrives i notatfeltet	179	54	233	298	5	303	536
Grand Total	727	247	974	1051	18	1069	2043

inneholder mange driftsfeil. Av de mest tydelige sikkerhetsfeilene er kategoriene «feilaktig togvegutløsning», «feilaktig kjøresignal» og «Rele - feilaktig ikke frafalt». Disse feilene er potensielle sikkerhetsrisikoer men representerer en veldig liten andel av feilene.

4.1.2 Dataanalyse av feilgrunnlag

Dataanalysen av årsaker i denne seksjonen fremstilles ved hjelp av paretdiagrammer. Dette fungerer som en grafisk fremstilling av årsakene knyttet til registrerte feil, som er hentet fra datasettet fra Banedata. Histogrammet er sortert så de høyeste verdiene er plassert lengst til venstre, de angir antall feil på primæraksen tilhørende hver kategori. Punktgrafen viser akkumulert antall feil, i prosent på sekundæraksen, som har en støttelinje i figuren på hver tiende prosent. I tillegg vises antall feil til hver kategori på toppen av hver søyle.

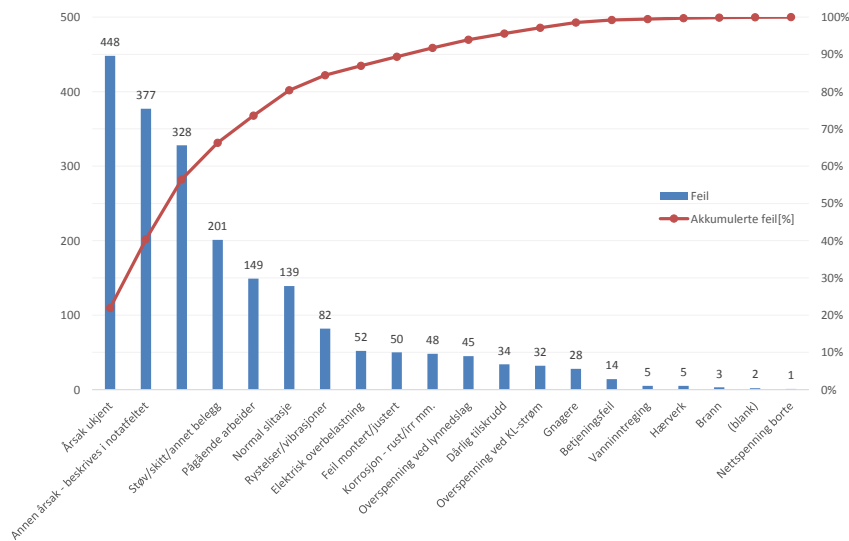


Figur 4.1: Paretdiagram med kategorien «Årsak»(registrert årsak) fra gammelt feilkodesett i Banedata, *figur: Olav Kallerud*

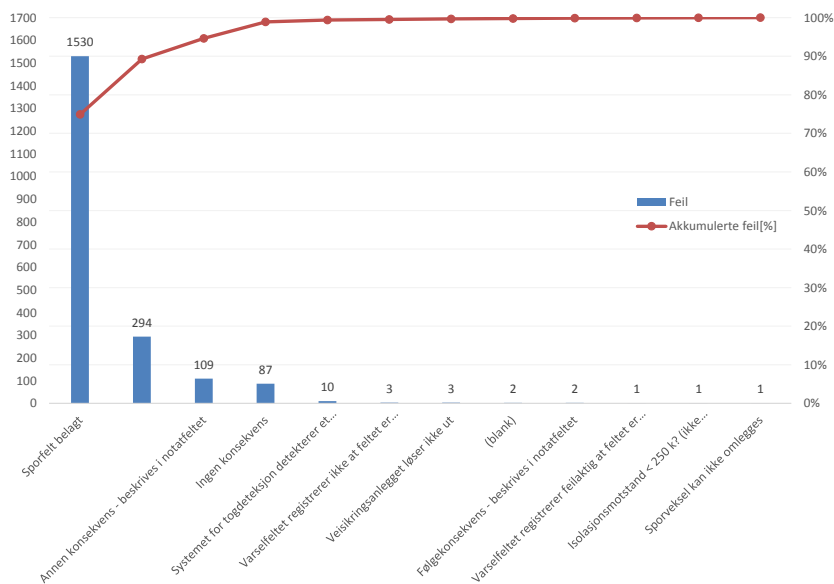
Figur 4.1 viser en rask akkumulering av antall feil på de første kategoriene. Hvor den mest representerte årsaken er «årsak ukjent». Videre kommer «andre årsaker», «metallspen» og «normal slitasje», hvor de to sistnevnte er håndfaste årsaker, mens den første er veldig vage.

I *figur 4.2* er «årsak ukjent» og «annen årsak» sterkt representert, tett fulgt av utfylte årsaker³. Videre i histogrammet kommer kategoriene «støv/skitt/annet belegg», «pågående arbeider» og normal slitasje.

³Tomt felt/ikke-utfylte felter



Figur 4.2: Paretodigram med kategorien «Aarsk_nyFKS» (registrert årsak) fra nytt feilkodesett i Banedata, figur: Olav Kallerud



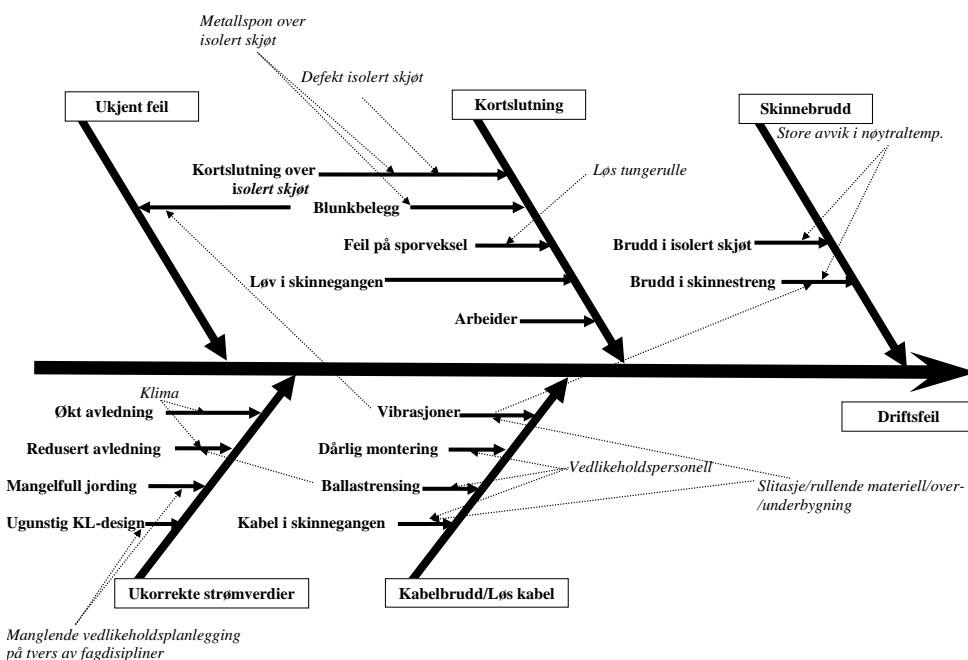
Figur 4.3: Paretodigram med kategorier fra «Konsevens» fra nytt feilkodesett i Banedata, figur: Olav Kallerud

Avslutningsvis i denne seksjonen er *figur 4.3* inkludert, som viser paretdiagrammet til «konsekvens»-kolonnen i Banedata, dette er inkludert fordi det reflekterer en mulig årsak til overrepresentasjonen av kategorien «kortslutning» fra «critical incident»-tabellen fra gammelt feilkodesett i *figur 4.1* fra forrige seksjon.

4.1.3 Rotårsakidentifikasjon

Identifikasjonen av rotårsaker bygger på feil- og årsakskartleggingen i de to tidligere seksjonene, 4.1.1 og 4.1.2. Analysen baseres på «cause-and-effect»-diagrammer, altså årsak og effekt, dette omtales også som et fiskebeinsdiagram, på bakgrunn av den grafiske formen. Fremstillingen viser hvilke feil og årsaker som påvirker hverandre i tillegg til sammenhenger som er funnet. Dette gjøres for å kunne få et overblikk årsaker, fordi flere feil kan skyldes felles årsaker.

Grunnlaget for «cause-and-effect»-diagrammet er feil og årsaker knyttet til feil registrert i Banedata og de to foregående seksjonene. Det vil presenteres diagrammer for driftsfeil og sikkerhetsfeil (farlige feil), siden disse to overordnede feilkategoriene har veldig ulike årsaker til feil. I tillegg til deres grunnleggende forskjellige påvirkning av sikkerhet og oppetid.

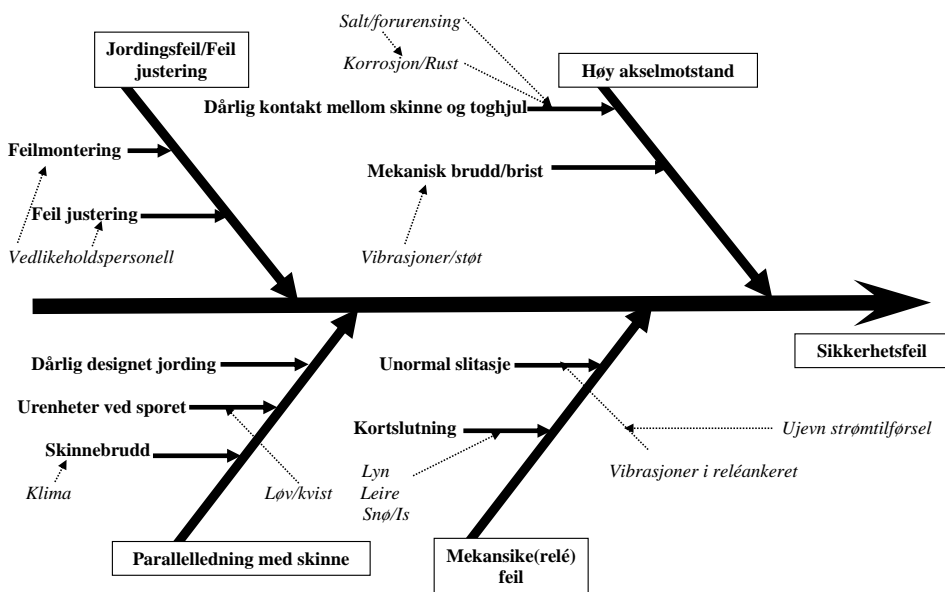


Figur 4.4: Cause-and-Effect-diagram med driftsfeil, [30, s. 123], modifikaasjon: Olav Kallerud

Driftsfeil er analysert i figur 4.4, som kan skape driftsstans. Fiskebeinsdiagrammet er bygget opp på bakgrunn av kategoriene i figur 5.1, med feiltype langs den tykke horisontale pilen, førsteordens årsaker er representert ved tykke piler som peker mot høyre inn til førstnevnte pil. Videre er høyere ordens årsaker som peker inn mot

førsteordens årsaker. Flere av førsteordensårsaker virker som høyere ordens årsaker for andre kategorier, disse har ikke fått egne «høyere ordens»-merker for å unngå doble instanser, så man ikke må lete etter flere forekomster av samme årsak.

Et eksempel fra høyere ordens årsaker vises ved kategorien «vibrasjoner» som er førsteordens årsak for «løs kabel» og høyere ordens årsak for «brudd på skinnetreng». En indirekte unntak fra dette er «klima» og «store avvik i nøytraltemperatur», som begge i grunn er klima men på grunn av den grafiske formen er vanskelig å representere enhetlig. Sistnevnte argument styrkes av at «store avvik i nøytraltemperatur» er en mer spesifikk betegnelse som årsak til feil enn «klima».



Figur 4.5: Cause-and-Effect-diagram med sikkerhetsfeil, [30, s. 123], modifikasjon: Olav Kallerud

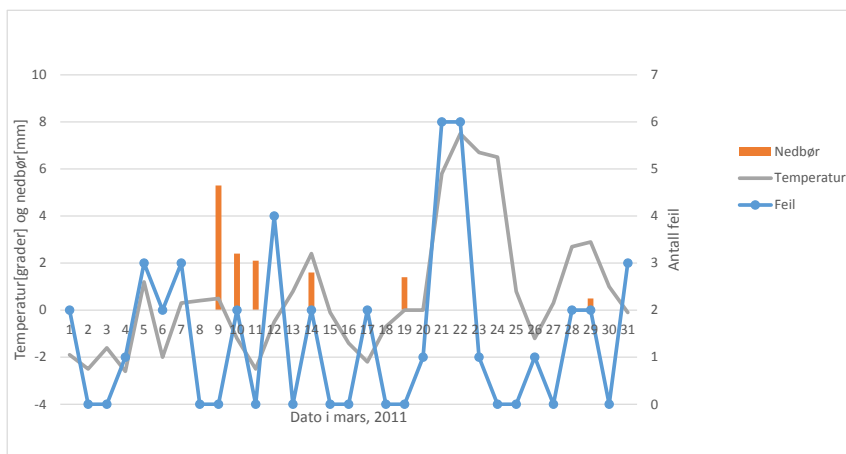
Figur 4.5 viser «cause-and-Effect»-diagrammet for sikkerhetsfeil. Denne typen feil er sjeldne i dagens signalsystem, og kan medføre farlige situasjoner som sammenstøt eller avsporinger. Typiske sikkerhetsfeil for sporfelter er å ikke indikere belagt spor når tog befinner seg på sporavsnittet. Årsaken til denne typen feil bunner i høy akselmotstand, ofte forårsaket av korrosjon av skinnehodet som hindrer elektrisk kontakt.

4.2 Klimapåvirkning

Døgnverdier

I denne seksjonen vil sporfeltfeil, nedbør og temperatur plottes i samme graf for å vurdere klimapåvirkningene på sporfelter. Døgnverdiene vil plottes med nedbør, temperatur og feil, månedsverdiene vil plottes med nedbør og feil og snødybde hvor det er tilgjengelig. Temperatur utelates i månedsfordelingene fordi disse verdiene er veldig utjevnet, i forhold til hvor volatil denne klimavariabelen virkelig er.

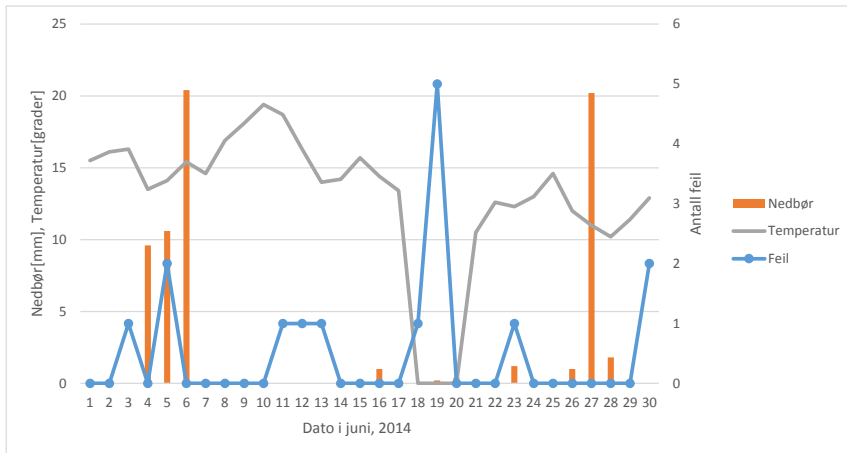
I *figur 4.6* viser feilene en svak korrelasjon med nedbøren, som er liten i det gitte tidsrommet. I samme figur kan de observeres mange feil er nyttet opp mot store temperaturendringer.



Figur 4.6: Døgnverdier av sporfeltfeil, temperatur og nedbør i banesjefområdet Oslo, *figur: Olav Kallerud*

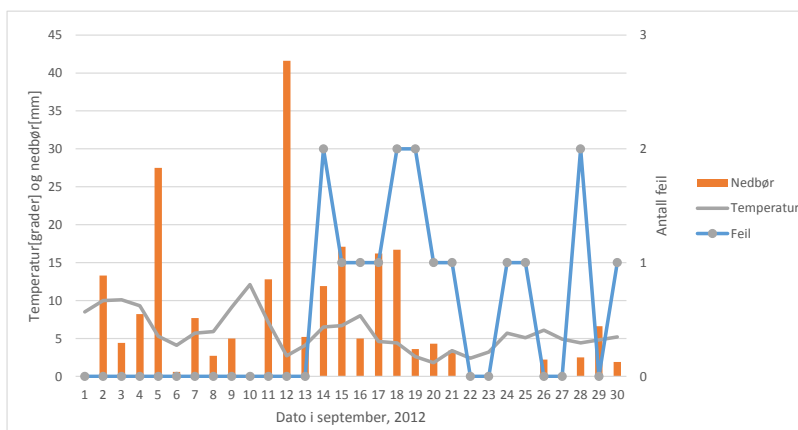
Tilsvarende grafer vises for Kongsvingerbanen i *figur 4.7*, det fremkommer ingen tydelige tegn på at figuren er påvirket av hverken temperatur eller nedbør. Det spesielle med denne kurven i juni måned er at tydelig flest feil forekommer de dagene der det ikke er registrert temperaturmålinger. Feilbeskrivelsene i Banedata er gjennomgått og har feilene følgende fordeling: to blunkbelegg, en kortslutning av isolert skjøt med bremsespon, en defekt isolert skjøt og en defekt limskjøt.⁴

⁴Feilene er beskrevet i Banedata, på Kongsvingerbanen innen det angitte tidsrom



Figur 4.7: Døgnverdier av sporfeltfeil, temperatur og nedbør på Kongsvingerbanen, figur: Olav Kallerud

Figur 4.8 viser en trend til feilene oppstår etter kraftig nedbør på over 40 mm på et døgn. Men det er totalt sett få feil representert. I tillegg virker grafen å være upåvirket av temperaturen. Det er veldig lite feil i starten av måneden, mens feilene oppstår når nedbøren forsvinner mot slutten av måneden.



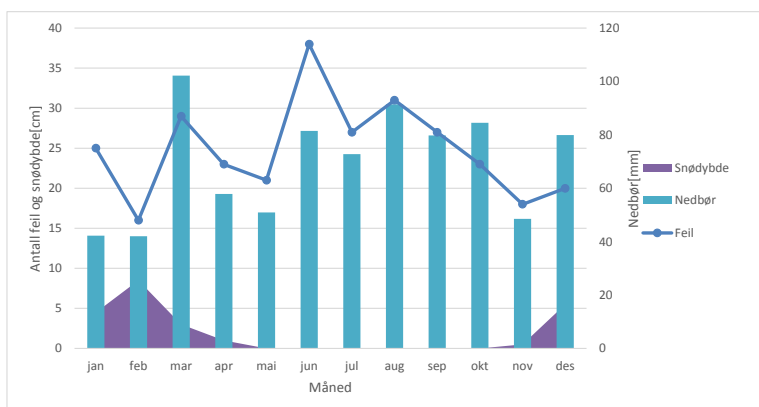
Figur 4.8: Døgnverdier av sporfeltfeil, temperatur og nedbør på Bergensbanen vest, figur: Olav Kallerud

⁴Observer manglende temperaturverdier fra 18-20 juni

Månedsverdier

Denne seksjonen tar for seg nedbørsmedianen av enkeltmåneder⁵ fra og med 2010 til og med 2015, på utvalgte baneområder.

Figur 4.9 er både nedbør og snødybde satt i samme graf som sporfeltfeilene, hvor feilkurven følger nedbørskurven i høy grad. Når snømengden er på sitt høyeste i februar, inntreffer også punktet hvor færrest feil er registrert. Men snømålingene er såpass begrenset mengde/utbredelse så påliteligheten til snømengdens påvirkning ikke er representativ, og kan være tilfeldig.

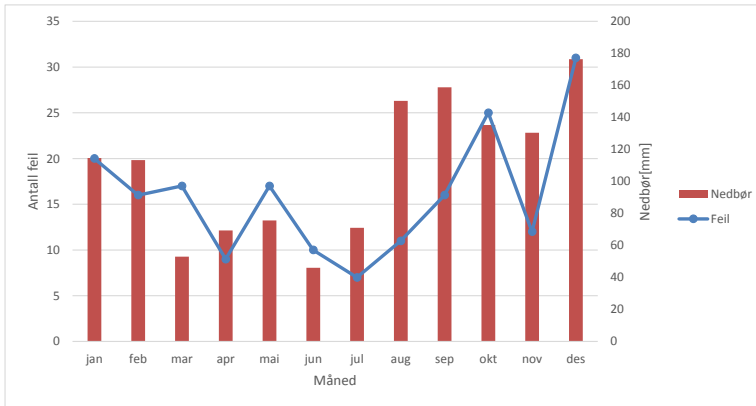


Figur 4.9: Sporfeltfeil, nedbør og snødybde på månedsbasis på strekningen Støren-Trondheim S⁶, figur: Olav Kallerud

På strekningen Egersund-Stavanger i *figur 4.10* forekommer det store mengder nedbør, som en følge av at dette er et kystnært og værutsatt område ved nordsjøen. Formen på nedbørsstolpene og feilkurven passer godt overens med hverandre i figuren.

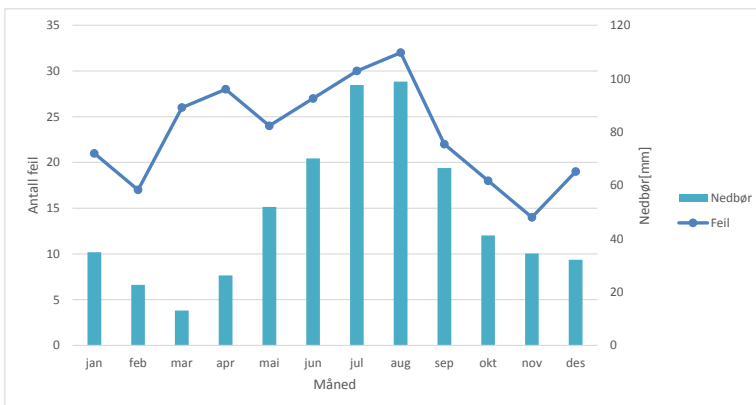
⁵Median av alle januar-måneder, alle februar-måneder osv.

⁶Se kartoversikt i figur F.1



Figur 4.10: Sporfeltfeil og nedbør på månedsbasis på strekningen Egersund-Stavanger⁷, figur: Olav Kallerud

Den sørlige delen av Dovrebanen langs Mjøsa er data fra strekningen Tangen-Moelv presentert i figur 4.11. Dette innlandsstrøket relativt lite nedbør i løpet av året, med en nedbørkurve som toppe seg på sommeren. Feilkurven og nedbørsstolpene er godt korrelert fra juni og ut året, men feilene gjør et hopp tidlig på våren som på det tidspunktet virker omvendt proporsjonal med nedbøren.



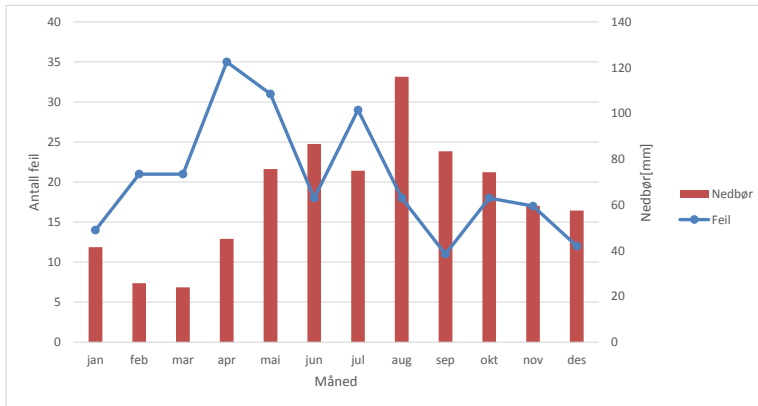
Figur 4.11: Sporfeltfeil og nedbør på månedsbasis på strekningen Tangen-Moelv⁸, figur: Olav Kallerud

Mot svenskegrensen på Kongsvingerbanen er nedbør og sporfeltfeil også analysert. Resultatet kommer frem av grafene i figur 4.12. Her observeres en omvendt proporsjo-

⁷Se kartoversikt i figur F.2

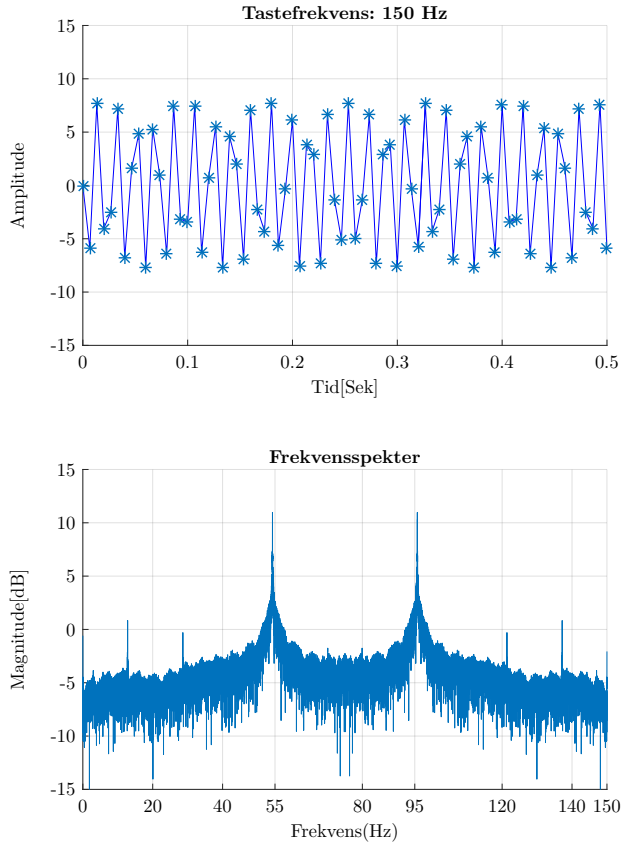
⁸Se kartoversikt i figur F.3

nal tendens mellom nedbør og sporfelt feil på våren, med en mer korrelert oppførsel senere på året.



Figur 4.12: Sporfeltfeil og nedbør på månedsbasis på strekningen Blaker-Åbogen⁹, figur: Olav Kallerud

⁹Se kartoversikt i figur F.4

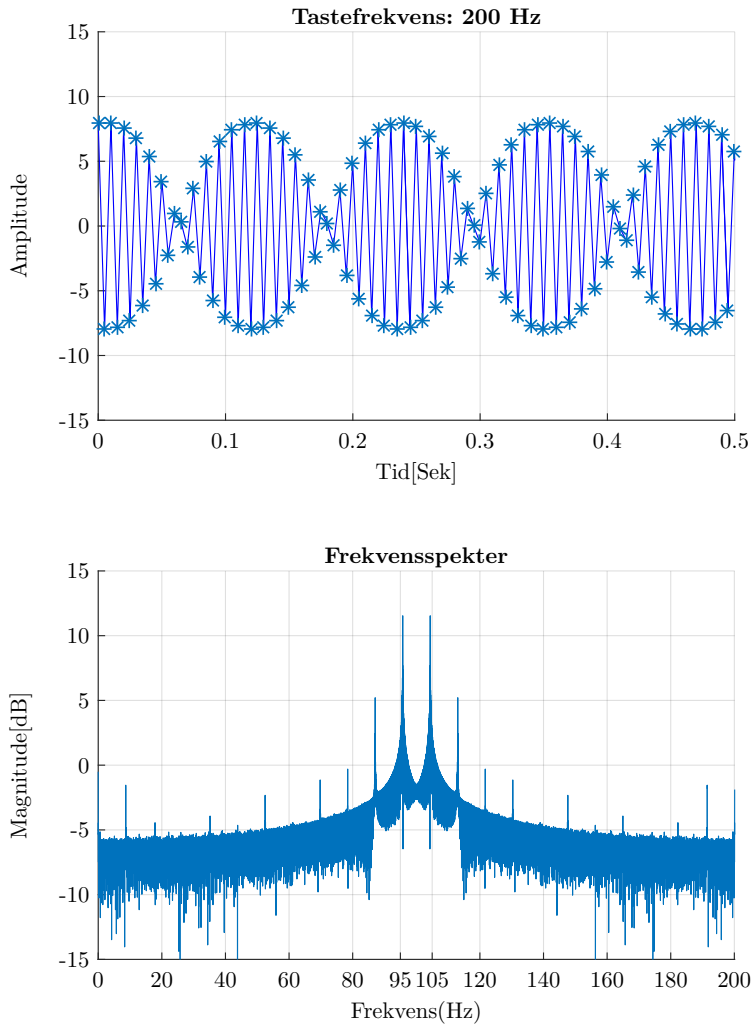


Figur 4.13: Måling på sporfeltsimulator med tastefrekvens under Nyquistfrekvensen, figur: Olav Kallerud

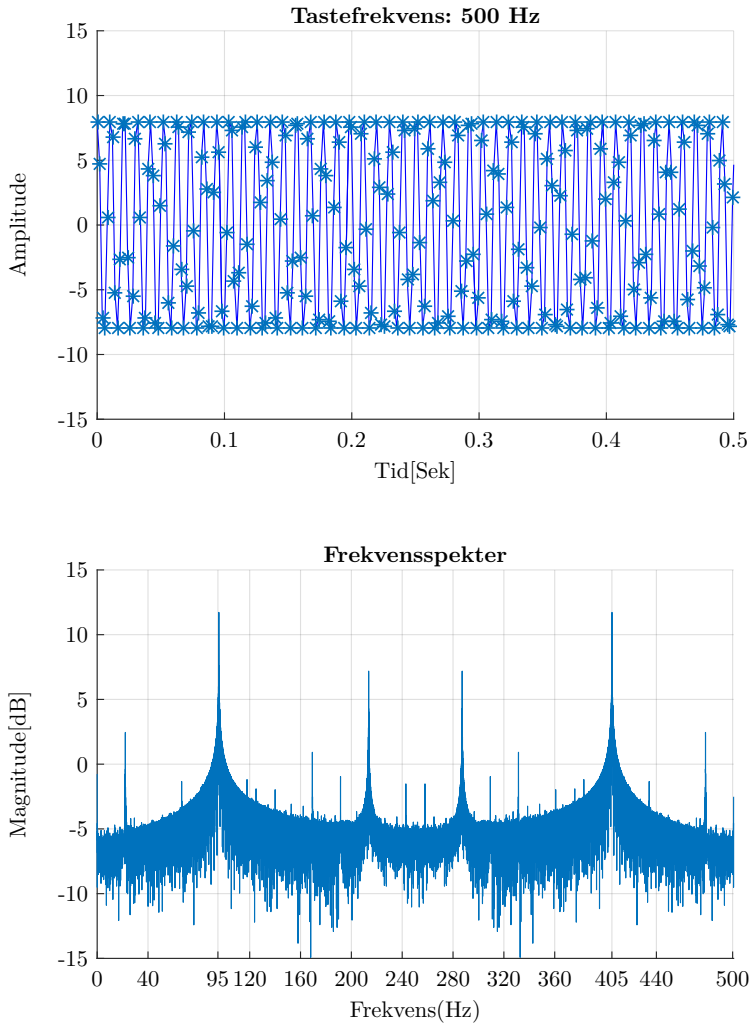
4.3 Målinger på sporfeltsimulator

De følgende målingene av sporfeltstrøm på 95 Hz er tastet med forskjellige tastefrekvenser; undertastet i figur 4.13, overtastet i figur 4.14 og med over dobbel nyquistfrekvens¹⁰ i figur 4.15. Figurene viser amplituden til det tidsvarierende signalet målt i volt, under dette presenteres korresponderende frekvensspekter.

¹⁰Se seksjon 2.3.4 på side 2.3.4



Figur 4.14: Måling på sporfeltssimulator med tastefrekvens rett over Nyquistfrekvensen,
figur: Olav Kallerud



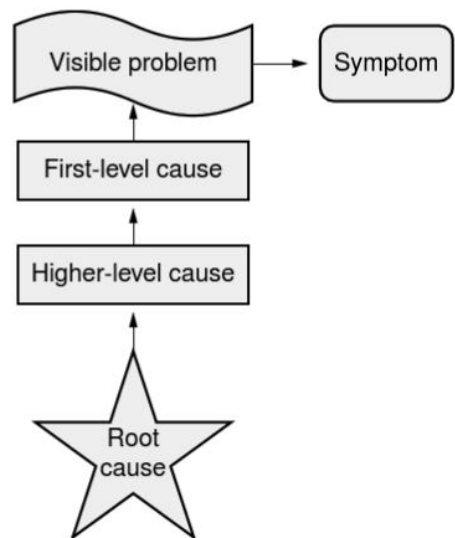
Figur 4.15: Måling på sporfeltsimulator med tastefrekvens 2,5 ganger Nyquistfrekvensen, figur: Olav Kallerud

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Rotårsaksanalyse

Det er ofte vanskelig å identifisere rotårsaker fordi de er ofte tidskrevende å finne og de ofte kan forveksles med andre feil og årsaker, som ikke er selve rotårsaken(e). Dette illustreres av *figur 5.1*, som viser den strukturelle oppbygningen av rotårsaker og feilåpenbaring. Poenget med figurene er å vektlegge argumentet med at mange årsaker kan være en tilsynelatende rotårsak, når det er andre elementer som ligger til grunn for feilene. Begrepene defineres i «Root Cause Analysis» av B. Andersen og T. Fagerhaug[30], ved at de ikke er årsaker med hvordan feilen åpenbares eller vises. Begrepene i *figur 5.1*, defineres av følgende begreper:



Symptom Dette ansees ikke som en faktisk grunn, men som et tegn på eksisterende problemer.

Figur 5.1: Rotårsaksoppbygning [30, s. 5]

Visible problem(Synlige/detekterbare problemer)
Feilåpenbaring/deteksjonen av et problem eller feil.

First-level causes(Førsteordens årsaker)
Årsaker som leder til til en feil/-problem direkte.

Higher-level causes (Høyere ordens årsaker)

Årsaker som leder til førsteordens årsaker. Men i seg selv ikke forårsaker noen problemer, men blir ledd i kjeden av årsak-effekt kjeder som leder til feil eller problemer.

Gjennomføringen av en rotårsaksanalyse er gjennomført for å få et bredere innblikk hvilke faktorer som ligger til grunn for feil som oppstår. Det er da naturlig en prioritert å finne årsakene til feil som forekommer ofte. Denne rotårsaksanalysen sikter på å beskrive både feilene og årsakene. Det vil også foreslås forebyggende tiltak til feilene, basert på kjennskap til rotårsakene. Ideen med dette er å kunne fjerne rotårsakene, som vil hindre at nye feil oppstår. Dermed fjerne grunnlaget for feilene.

5.1.1 «Critical incident»-tabeller

«Critical incident»-tabellene brukes å beskrive feilene som oppleves i forbindelse med sporfeltene. De er konstruert for å kaste mer lys over problemforståelsen av sporfeltfeil. Tabellene er delt opp i nytt- og gammelt feilkodesett i Banedata, med utdypning av de mest forekommende feilene med årsakene til hver av feilkodesettene. Disse vurderer separat for å få et større spekter av kilder, selv om de har samme opphav.

Det vises av *tabell 4.1* at «kortslutning», «andre feil», «ingen feil funnet», «løse kabler» og «skinnebrudd» er de mest forekommende feilene. Kortslutning altså den største feilkategorien, som representerer hovedprinsippet bak sporfeltenes virkemåte. På grunn av de hyppigst forekommende feilkategoriens vage feilindikasjon, er denne kategorien videre utdypet i *tabell 4.2*. I denne utdypingen ble feilene fordelt på årsaker til feil, for å kunne forstå hvilken type feil dette representerer. *Forklaringstabellen 4.2* viser flest feil knyttet til metallspen og ulike typer isolasjonsfeil, i tillegg til «andre årsaker» og «ukjent årsak». Ut i fra dette vises store problemer med kortslutning i forbindelse med isolerte skjøter, både skade i selve isolasjonen og ledning av strøm over skjøten i form av metallspen. Det er også muligheter for at metallspen kan ha bidratt til kortslutning på tvers av sporet, men dette kommer ikke frem av tabellene.

Feilkodene med flest feil i *tabell 4.3*, med det nye feilkodesettet er «utstyrfeil uten feilkode», «ingen feil funnet» og «isolasjonsfeil». Videre kommer «ledningsbrudd», ikke-utfylt kategori og «brudd i sporfelttilkobling». For å kunne redegjøre for de vage feilkategoriene i bunnen av *tabell 4.3*, ble den mest hyppige feilkategorien utdypet, i likhet med utdypingen av *tabell 4.3* som er utført i *tabell 4.4*. Sistnevnte tabell viser utdypingen til vage de feilkategoriene, hvor årsakene av mest forekommende feil er av typen «annen årsak» og «ukjent årsak» som hyppigste årsakskategorier. Tredje

kategori på listen, «støv/skitt/annet belegg», er mer informativ fordi den har en konkret årsak. På den andre siden representerer denne kun en liten andel av årsakene til feil totalt.

«Andre feil» og «Utstysrfeil uten feilkode» fra de ulike feilkodesettene kan sammenlignes, selv om de er i ulike feilkodesett. Mange av disse feilene er antageligvis vedlikehold, som ikke har egen feilkategori fordi det ikke er feil som oppstår. En annen mulighet er en lettvinnt løsning for å ikke fylle ut feilmeldingen korrekt, eller fordi det er for tidskrevende. Valget faller på å ikke gå videre inn på «andre feil», fordi denne kategorien inneholder et stort utvalg med feil.

Derimot er kategorien «ingen feil funnet» interessant i denne sammenhengen, fordi det er feil som tydeligvis har hatt negativ virkning på sporfeltene, men det er ikke funnet frem til hva det skyldes. Problemet her er den manglende evnen til å finne selve feilen og årsaken til feil, som medfører at ingen ting forhindrer at denne oppstår igjen. Når en feil av denne typen oppstår er det ofte et såkalt blunkbelegg, hvor finner man ikke hva som skapte problemer, fordi feilen har forsvunnet av seg selv. Sistnevnte feiltype er vanskelig å feilsøke fordi en del av feilsøkingen og opprettingen er indikasjon på fritt spor oppnår, men dette muligheten er naturlig nok ikke-eksisterende for blunkbelegg.

Felles for de to *tabellene*, 4.1 og 4.3, er de sammenfallende kategoriene blant de feilene med mest hyppig frekvens. Det er vises tydelig i *tabell* 4.3, at de største feilkategoriene «utstysrfeil uten feilkode», «ingen feil funnet» og «isolasjonsfeil», som sammenfaller i stor grad med *tabell* 4.1, men endret rekkefølge. Utstrekningen av feilkategoriene «andre feil» og «ingen feil funnet» bidrar til begrenset statistisk styrke til disse dataene, fordi det krever kvalitativ gjennomgang for å finne betydningen av dette.

Ved å foregripe begivenhetenes gang, presenteres her et paretdiagram Banedata-kolonnen Konsekvens. Paretdiagrammet med disse kategoriene er gitt i *figur* 4.3. Det ble nevnt på side 72 at «kortslutnings»-kategorien var spesielt høyt representert. Dette kan sammenlignes med konsekvensen «sporfelt belagt», i konsekvensparetdiagrammet. Dette er fordi «kortslutning» i gammelt feilkodesett gitt i *figur* 4.1, kan ha vært registret som «belagt spor», dette indikerer feilkategorien som antageligvis har blitt misbrukt som konsekvensfelt. Følgen av dette er et lite informativt feilkodesett. Siden «belagt spor» og «kortslutning» inneholder veldig store deler av hvert sitt feilkodesett. Dette baserer seg på prinsippet med hvordan sporfeltene bruker kortslutning til å gi belagt spor.

Videre viser *tabellene* 4.1 og 4.3, en veldig lav andel av UKV blant feilene. Mens driftsforstyrrelsene angitt i de samme tabellene viser en jevnt fordeling mellom feilene medfører driftsfeil eller ikke. Men denne indikasjonen på driftsfeil sier ingenting om

utstrekning i tid driftsfeilen har medført.

5.1.2 «Pareto»-diagrammer

Paretodiagrammet bygger på Paretoprinsippet, hvor teorien er at 80% av tilfellene (antall feil) skyldes 20% av (feil)kategoriene [30, s. 92]. Med andre ord vil majoriteten av feilene representeres ved et fåtall av feilkategoriene. Denne typen diagrammer gir en indikasjon på hvilke årsakskategorier som forekommer ofte. Dette er interessant fordi man ofte er ute etter årsakene som forårsaker flest feil. Videre er målet å finne generelle tiltak mot disse årsakene og dermed, med stor sannsynlighet redusere et stort antall feil.

Nevnte prinsipp gir utslag i Paretodiagrammet som et søylediagram over antallet årsaker, på sekundæraksen vises en graf med akkumulert antall årsaker. Disse to datasettene kombinert i en figur gir en god indikasjon på de mest forekommende årsaker. Hvis prinsippet følges, vil de to kurvene være omvendt proporsjonale. Histogrammet vil starte med en høy verdi og synke fort, og den sammenhengende grafen starter langt nede og øker raskt mot asymptoten på 100%.

I *figur 4.1* vises halvparten av antallet feil er knyttet til tre årsaker, «årsak ukjent», «metallspon» og «andre årsaker». I tillegg kommer fjerde største med «metallspon», som da sammenfaller med nest mest forekommende kategori. Derfor har en stor andel av årsakene til feil ingen konkret årsak, unntatt «metallspon», som gir en angripelig årsak til feilene.

I det nye feilkodesettet i *figur 4.2* er relativt likt som det gamle feilkodesettet, med «årsak ukjent» og «annen årsak». Deretter kommer feil med utfylte (blanke) felter, som nummer tre i rekken. «Støv/skitt/annet belegg» kommer som nummer fire, som kan sammenlignes med metallspon som er en tilsvarende kategori i det gamle feilkodesettet.

Hovedforskjellene i *figurene 4.1 og 4.2* er forskjellen på hvor mye feil som tilhører hver kategori, hvor gammelt feilkodesett har store forskjeller og nytt feilkodesett har en mye jevnere fordeling. Det som sammenfaller er de mest representerte kategoriene, som gjør at det kan konkluderes med hvilke årsaker som er mest fremtredende. De mest forekommende kategoriene er angitt i følgende liste:

- Årsak ukjent
- Annen årsak
- Metallspon
- Utfylt

- Pågående arbeider
- Normal slitasje

Av angripelige årsaker i denne listen er «metallspon» og «pågående arbeider». Resterende er vanskelige gjøre noe med, siden de to første i lista er udefinerte årsaker, utfyllt kan man anta er «årsak ukjent» eller vedlikeholdsarbeider, «normal slitasje» kan forbedres men dette vil sannsynligvis medføre endringer i materiellet som brukes og er lite aktuelt.

«Metallspon» forekommer som metallfragmenter fra toghjul ved bremsing eller akselerasjon, dette kan også komme fra skinnhodet spesielt i skjøter hvor toghjulet kan møte en ujevn overgang mellom to skinner. Den foretrukne måten å løse dette problemet er å montere permanentmagneter i skinnelivet i nærheten av isolerte skjøter¹. Dette vil trekke metallsponet vekk fra skjøten og i stor grad hindre eventuelle kortslutninger. Ulempen med denne fremgangsmåten fremkommer når magneten er dekket av metallspon og ikke lenger tar til seg mer av dette. Løsningen på dette er manuell rensing av vedlikeholdspersonell, som er tidskrevende fordi det krever tilgang til sporet og reise for personell til og fra den aktuelle isolerte skjøten.

«Pågående arbeider» kan løses ved mer spesifikk gjennomgang av arbeidsrutinene som foregår på jernbanen, med hensikt å ikke påvirke andre fungerende komponenter. Her kreves også større tverrfaglig forståelse av andre fag i jernbanen, både av internt- og eksternt vedlikeholdspersonell.

Det ble i forrige seksjon med «critical incident»-tabellene bruk paretodiagrammet i *figur 4.3* som vise fordelingen Banedata-kolonnen «konsekvens». Denne ble brukt for å forklare at feilkodesettene kan sammenlignes selv om feilkodene er endret. Altså feil i det gamle feilkodesettet, kan sammenlignes med konsekvens i det nye feilkodesettet.

Dette angir samtidig driftsfeil, altså en ikke-farlig feil, i motsetning til farlige feil.² Sistnevnte type feil er representert med 10 feil i *figur 4.3*, er forsvinnende lite i forhold til resterende feil som kategoriseres som driftsfeil, men samtidig representerer en risiko for personers liv og ødeleggelse av materiell i motsetning til driftsfeil. Sammenligningen med «kortslutning» og «sporfelt belagt» gjøres fordi førstnevnte medfører i mange tilfeller belagt spor, eller med andre ord, man får ikke indikasjon på belagt spor uten kortslutning.

Den kategorien med nest flest feilregistreringer har ikke notert noen konsekvens, ved en kvalitativ gjennomgang av disse består de i hovedsak av feil der ikke årsak eller utstysfeil heller er registrert. Utover dette er det feil med registrert utstysfeil som

¹I følge Vidar Larssen i Jernbaneverket

²Sikkerhetsfeil

«utstysrfeil uten feilkode», «sporfelt ute av justering» og «ingen feil funnet», men det er i grove trekk ikke registrert noe konsekvens der det ikke er registrert noen årsak.

Paretodiagrammene som helhet gir indikasjon på at de fleste feilene har en ukjent årsak.

5.1.3 «Cause-and-effect»-diagrammer

«Cause-and-effect»-diagrammene gir en grafisk fremstilling av årsaker og hva som påvirker disse. Hovedpoenget med denne fremstillingen er å knytte feilene opp mot rotårsaker. Diagrammet bygger videre på «critical incident» og «pareto-diagrammene» som beskriver feil- og årsaksfrekvens. «Cause-and-effect»-diagrammene er tett knyttet til *figur 5.1*, på side 71.

Sporfelter kan være utsatt for flere feil samtidig. Mange av disse kan skyldes samme årsak. I tillegg er noen strekninger påvirket, av hyppige feil, av samme karakter. Disse tilfellene kan feilene være fjernet med rotårsaken består. Alternativt kan det være flere latente feil som ikke gir utslag samtidig. Dette kan oppstå ved driftsfeil, dermed feilsøkes/utbedres feil frem til sikringssystemet kan stille kjøresignal igjen, når dette skjer vil resterende feil forblir ukorrigerte³.

Driftsfeilene i *figur 4.4* viser hvordan feil og årsaker henger sammen, og på hvilken måte de påvirker hverandre. Oppbygningen av diagrammet er beskrevet i *seksjon 4.1.3*. Av figuren kan det observeres at flere førsteordens- og høyere ordens årsaker påvirker flere elementer. Det vil si at samme årsak kan potensielt forårsake flere ulike typer feil. Driftsfeilene vil da resultere i stoppsignaler, med sikringsanlegget i en sikker tilstand. På folkemunne blir denne typen feil ofte omtalt som «signalfeil».

Figur 4.4 viser mange årsaker til feil skyldes andre fagdisipliner enn signal, som bane og elektro(KL). I hovedkategoriene er vibrasjoner, skinnnebrudd og ukorrekte strømverdier som følge av jording og KL-design. Nevnte kategorier kreves et sterkere tverrfaglig samarbeid for å tilrettelegg så fagdisiplinene ikke ødelegger for hverandre, men heller legger til rette for høy driftssikkerhet.

Et konkret eksempel vises det til ballastrensing som er et vedlikeholdstiltak som bedrer stabiliteten⁴, redusere avledningen ved å fjerne elektrisk ledende forurensning og bedre dreneringen fra sporet. Men den kan også rive av og løsne kabler/kabelfester koblet til skinnestregene og lignende, det vedlikeholder infrastrukturen men det påfører også slitasje. Poenget med eksempelet er at tverrfaglig samarbeid hvor typisk kabler i skinnegangen kontrolleres/rapporteres etter ballastrens. Altså at

³I følge Ben Tollefsen i Jernbaneverket

⁴Kan redusere vibrasjoner

de som utfører ballastrensingen kontrollerer og gjenoppretter eventuelt skade på infrastrukturen.

Sikkerhetsfeil er beskrevet av «cause-and-effect»-diagrammet i *figur 4.5*. De mest fremtredende årsakene til denne typen feil er definert som korrosjon og mekanisk brudd, begge kan gi effekten av fritt spor selv om tog befinner seg på strekningen. Andre feil som kan påvirke sporfeltet er lynnedslag, som kan få reléet til å låse seg i «fritt spor», dette kan observeres ved å studere kategorien for elektrisk overbelastning i *figurene 4.1 og 4.2*. Førstnevnte figur har også en egen kategori for «overspenning ved lynnedslag».

Ved å studere *figurene 4.4 og 4.5* kan årsakene til feil observeres. Driftsfeilene kan i stor grad reduseres ved å fjerne årsakene som er beskrevet, altså metallspen, vibrasjoner, bedre tverrfaglig prosjektering og vedlikehold. Sistnevnte begrunnes med at prosjektering og vedlikehold utført av andre fagdisipliner enn signal ofte påvirker sporfeltkretsene, sannsynligvis er de ikke oppmerksomme på potensielle påvirkninger på sporfeltene. Eksempler på dette er under- og overbygningens resonansfrekvens påvirker vibrasjoner i skinner og kabelfester, i tillegg er jording, impedansspoler og KL-design avgjørende for fungerende, feilfrie sporfelter.

5.1.4 Oppsummering av rotårsaksanalysen

«Critical incident»-tabellene for det gamle feilkodesettet i banedata⁵ viste en hovedvekt på feil relatert til «kortslutninger», «andre feil», «ingen feil funnet», «løs ledning/ledningsbrudd» og «mekaniske brudd». De tre første kategoriene er relativt like, statistisk sett, som alle har forårsaket stoppsignal. Et unntak er «andre feil» som fungerer som en samlekategori og er dermed ikke representativ. Videre er løse kabler og mekaniske brudd en stor feilkategori, sannsynlige årsaker til dette er temperaturpåvirkning og korrosjon, men også vibrasjoner kan påvirke disse feiltypene. Det nye feilkodesettet viser i praksis det samme, men med en omstrukturering av feilkodene ser dette litt forskjellig ut. Hovedforskjellen er at «kortslutning»-kategorien ikke eksisterer, dermed er en de ovenfor flyttet et hakk ned, og en underkategori av kortslutning kommet inn på tredje plass. Forskjellen på feilkodesettene ved den manglende kortslutningskategorien forklares med paretodiagrammet i *figur 4.3* for nytt feilkodesett, der konsekvens er en av de nye kolonnene i det nye feilkodesettet. Hvor en veldig høy andel representerer «sporfelt belagt», som kan assosieres med «kortslutning» i det gamle feilkodesettet.

For å skape kontekst til feilene ble paretodiagrammene brukt til å vurdere årsakene til de samme feilene som ble fremstilt av «critical incident»-tabellene. Paretodiagrammet for det nye feilkodesettet i *figur 4.1*, viser årsakene «årsak ukjent», «metallspen» og

⁵Se figur 4.1

«andre årsaker» som mest forekommende årsaker, disse representere omtrent 50% av feilene. Tilsvarende for det gamle feilkodesettet i *figur 4.2*, viser «Årsak ukjent», «annen årsak» og ikke-utfylt årsak som de mest forekommende med litt over 50% av årsakene. Samlet er det tydelig stor usikkerhet rundt hvilke årsak feilene som oppstår har. Spesielt den ikke-utfylte kategorien i nytt feilkodesett er statistisk ubrukelig.

For å samle trådene fra rotårsaksanalysen er «cause-and-effect»-diagrammer brukt⁶. Dette er brukt til å kvalitativt vurdere hvilke årsaker som henger sammen og de resulterende feilene. På bakgrunn av tallgrunnlaget i de to tidligere avsnittene er kortslutning og ukjent feil/årsak godt representert. Men disse diagrammene må vurderes og vidreutvikles på bakgrunn av utviklingen av disse kun er basert på banedata og teori, uten praktisk erfaring med sporfeltfeil.

Tiltak for å fjerne rotårsaker til de mest forekommende feilene er ikke rett fram. På bakgrunn av rotårsaksanalysen konkluderes det med at de fleste årsakene ukjent, videre er det vanskelig å gjøre noe med en årsak man ikke kjenner til. Det mest åpenbare tiltaket vil være å redusere vibrasjoner og andelen bremsespon/metallspon, i tillegg kommer mer tverrfaglig hensyn til sporfeltene fra andre faggrupper som påvirker sporfeltene i stor grad. Det er tydelig at tiltak må gjøres for å få mer informasjon og data på både feil og årsaker som forekommer på sporfeltene, siden dette i hovedsak er ukjent i dag.

5.2 Klimapåvirkning

5.2.1 Døgnverdier

Det antas kjent at elektriske egenskaper påvirkes av vann/fuktighet og temperatur. Det er derfor interessant å se på sammenhengen mellom sporfeltfeil og ytre påvirkninger fra klimaet. Temperatur og nedbør ansees å være de mest aktuelle klimavariablene å knytte opp mot sporfeltfeil.

Som en følge av rotårsaksanalysen har denne rapporten vurdert i hvilken grad klima påvirker sporfeltene. Dette vurderes fordi sporfeltene har stor geografisk utstrekning, med uisolerte ledere i form av skinnestrenger i hele sporavsnittets lengde. Det er derfor å vurdere muligheten for påvirkninger fra nedbør, snø/is og temperatur. Antagelsen i denne undersøkelsen har vært at sporfeltene vil oppleve flere feil i perioder med mye nedbør, fordi det er sannsynlig med mer strøml lekkasje fra sporfeltene på grunn av fuktige (og dermed strømluede) omgivelser.

Nedbør kan ha to helt forskjellige effekter på sporfeltene, fordi det på den ene siden kan vaske vekk urenheter/belegg, metallspon og lignende, som i forrige seksjon

⁶Se figurene 4.4 og 4.5

ble beskrevet som et stort problem. På den andre siden kan det som nevnt øke avledningen i sporet.

Sporfeltfeilene som er sammenstilt med nedbør på døgnoppløsning over en måned er gitt av *figurene 4.6, 4.7 og 4.8*. På nevnte grafer er det vanskelig å se trender fordi det inneholder få feil, fordi både tidsrommet og det geografiske området er veldig begrenset. Fordelen er at ingen ting er utjevnet på noen måte. Denne fremstillingen hadde også vært interessant ved å filtrere feilen på type feil, men dette ville ført til et enda tynnere feilgrunnlag.

Figur 4.6 er den mest interessante av de tre figurene med døgnverdier, fordi denne grafen viser en sammenheng med feil knyttet til temperaturforandringer. Store utslag på temperaturen, som fluktuerer rundt 0°C. Dette indikerer en sannsynlig snøsmelting når temperaturen endres, dermed vil snø og is smeltes. Men på grunn av de samme elementene kan bli liggende rundt sporet og gjør de i stand til å demne opp vann. Det er derfor sannsynlig at all smelting av snø medfører økt avledning som påvirker sporfeltstrømmen. Motsetningen vil være tørr is, som vil redusere avledningen. Dermed vil temperaturvekslinger som observeres i *figur 4.6* potensielt gi store forandringer i sporfeltstrøm over tid.

Sammenheng mellom klima og sporfeltfeil i *figur 4.7*, er ikke helt klar. Det spesielle med figuren er en tydelig økning i feil i en periode hvor temperaturmålinger ikke foreligger. Som nevnt i resultatene gitt av *seksjon 4.2*, består de 5 feilene i nevnte punkt i grafen to blunkbelegg, en kortslutning over isolert skjøt, en defekt isolert skjøt, en defekt limskjøt. Det har ikke lyktes å finne grunnen til manglende måling av temperatur på disse tidspunktene.

I *figur 4.8* ser det ut til å være en feil i Banedata, på grunn av at det ikke er registret noen feil før 14. den aktuelle måneden. Ved motsatt antagelse der alt er som det skal, er den første delen ikke påvirket av klima, siden ingen feil forekommer. Fra midten av måneden kommer det en del feil, etter et kraftig regnfall, etterfulgt av mindre men jevnt regn. Men utslagene er ikke tydelige nok til å kunne trekke noen konkrete slutninger ut av dette.

Figurene med døgnverdier gir en indikasjon på sensitivitet for feil ved temperaturendringer rundt 0°C, videre fremkommer det ingen klar indikasjon på sammenheng mellom klima og sporfeltfeil på døgnbasis.

5.2.2 Månedsverdier

Fordelen med å se på månedsvise feil i motsetning til døgnverdier, som i *seksjon 5.2.1*, er at de månedsvise inneholder mange flere feil. Ulempen er utjevningen av verdiene, siden medianen tas av nedbørs- og temperaturverdiene. Fordelen er en

større mengde feil som fjerner i stor grad forekomsten av tilfeldige feil, selv om det samme prinsippet kan fjerne interessant informasjon.

På strekningen Støren-Trondheim vist på *figur 4.9*, vises månedsverdiene av snødybde, nedbør og sporfeltfeil. Med unntak av januar følger sporfeltfeilene endringene i nedbør per måned. Nedgangen til venstre i grafen, ved februar, kan beskrives ved mye snø som kan redusere avledningen, fordi omgivelsene er relativt tørre som en følge av snøen. Men det er såpass lite datagrunnlag som inneholder snø, at det er vanskelig å trekke noen generelle slutninger ut av dette.

Innlandsområdene som er sammenstilt med klima og sporfeltfeil er strekningen Tangen-Moelv, sør på Dovrebanen, og Blaker-Åbogen, på Kongsvingerbanen, representert henholdsvis med *figurene 4.11 og 4.12*. Disse to figurene har en del likhetstrekk, ved at begge har en omvendt proporsjonal oppførsel mellom nedbør og feil på våren, deretter en mer proporsjonal effekt mellom de to på sommer og høst. Feiltoppen på våren kan forklares med mye snøsmelting, som kan avdekke forurensning som er lagret og akkumulert i snøen gjennom vinteren. Videre at feilene følger nedbøren senere på året, når smelteeffektene avtar. Til sammenligning viser observasjonene forøvrig at *figur 4.11* er bedre korrelasjon på sommeren og høsten enn *figur 4.12*.

Egersund-Stavanger er en strekning som er sammenstilt i *figur 4.10*, som er et kystnært område. I motsetning til de andre tidligere nevnte strekninger med månedsverdier er dette et tradisjonelt snøfattig område. Feilkurven følger nedbørmengden i stor grad, selv om økningen i nedbør i månedene august og september øker mer enn feilene, men feilene viste også tydelig økning i samme periode. Denne strekningen kan oppleve saltvann som blåses inn over sporet, ved kraftig vestavind uten nedbør, medfører feil på sporfeltene⁷. Dette kan på kort sikt skape økt avledning og kortslutninger på grunn av saltvanns relativt gode ledningsevne, på lang sikt vil det skape økt korrosjon. Det er ikke funnet noe datagrunnlag som støtter denne påstanden, men anbefales som videre arbeid.

Det ser ut til at sporfeltfeil påvirkes av nedbør, spesielt i perioder med mye snøsmelting hvor sannsynligheten for mye vann i sporet er overhengende. På grunn av dette er flere av grafene omtalt i denne seksjonen en feiltopp på våren, og deretter korrelasjon mellom feil og nedbør på sommer og høst. Døgnverdigrafene viser på det grafen fenomenet forekommer at det er en økning i feil ved temperaturrendringer som fluktuerer rundt 0°. Grafene som tar for seg døgnverdier over en måned har det gjennomgående problemet med at de har veldig få feil.

⁷I følge Erik Magnus Einarsen i Jærbanen, Jernbaneverket

5.3 Vedlikeholdsstrategier

AKV til UKV, eller forebyggende vedlikehold

Ved å studere *tabellene 4.1 og 4.3* observeres en overrepresentasjon ved feil av typen Akutt Korrektivt Vedlikehold (AKV). Grunnen til dette er at Utsatt Korrektivt Vedlikehold (UKV) i hovedsak blir registrert på bakgrunn av generiske arbeidsrutiner⁸, som gir vedlikeholdspersonell tid til å utbedre feilen før den medfører driftstans.

Inspeksjon av infrastruktur er veldig ressurskrevende, hvis dette utføres av mennesker er dette lite effektivt. Bruk av personell til inspeksjoner medfører at inspeksjonene utføres relativt sjeldent, noe som medfører et at mange feil ikke oppdages og blir AKV-er, dermed et lite antall UKV. Dette kommer som en følge av at UKV-er i hovedsak oppdages på ved denne typen inspeksjoner.

Innledningsvis ble den relative fordelingen av AKV og UKV nevnt, som er gitt av *figurene 4.1 og 4.3*. Andelen av UKV i disse tabellene er veldig liten, fordi de rapporteres av generiske arbeidsrutiner, togleder eller TXP⁹. De nevnte aktørene melder flest feil i Banedata¹⁰, de kun har forutsetninger for å oppdage feilene å registrere uforutsette stoppsignal. Med andre ord har togleder og TXP kun mulighet til å rapportere feil som har oppstått.

Det blir referert til NSI-63 benytter seg av 95/105 Hz-sporfeltene i en rapport fra Statens jernbanetilsyn om sikkerhet og pålitelighet[2, s 32], som et system hvor det er veldig vanskelig å detektere feil. Feilåpenbaringen på anlegget kommer til syne ved uforventet stoppsignal eller ikke-planlagte belegg. Nevnte måte å detektere feil medfører mye driftstans, og derav forsinkelsestimer. En åpenbar ulempe med denne «run-to-failure»-tankegangen forårsaker mye AKV. Dette er resultatet av en tids-/aldersbasert vedlikeholdsstrategi, hvor majoriteten av feil er såkalt «run to failure», altså feildeteksjon ved at feilen oppstår, som medfører AKV. Løsningen av dette vil være å erstatte flere AKV-er med UKV-er, dermed øking av frekvensen på inspeksjonene av sporfeltene. Men dette ville gått hardt utover kostnadene og økt antallet linjevisitasjoner¹¹ som følge av ved vedlikehold betraktelig.

Tilstandsbasert vedlikehold vil være et effektivt alternativ til tids-/aldersbasert vedlikehold. Denne tilnærmingen kan sammenlignes med å ha generiske arbeidsrutiner utført med veldig høy frekvens, eller ha en signalmontør som til enhver tid kontrollerer og inspiserer et sporfelt, i tillegg til å ha kontroll på tidligere oppførsel og trender.

⁸Tidsbestemte inspeksjoner av vedlikeholdspersonell, se seksjon 2.4.3 på side 34

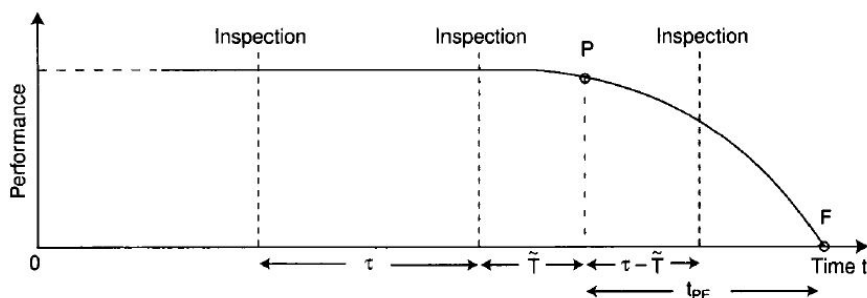
⁹Togekspeditør

¹⁰Hentet fra datasettet fra Banedata

¹¹Dette krever ofte linjekapasitet

PF-intervall

På bakgrunn av forrige avsnitt tar dette diskusjonen over til å se på teorien bak konseptet med inspeksjon av et objekt, det er da interessant å se på tiden mellom en begynnende feil kan detekteres og feilen medfører funksjonssvikt, henholdsvis definerer UKV og AKV. I nevnte konsept betegnes begynnende feil som P (potential failure), en funksjonsfeil betegnes med F (functional failure)[9, s. 410]. Tidsdifferansen mellom de to nevnte punktene betegner «PF-intervallet»; som da definerer tiden fra en startende feil oppstår(P) til feilen oppstår(og er akutt)(F), som vist i *figur 5.2*. Av nevnte figur observeres at hyppigere inspeksjonsintervall(τ) vil øke sannsynligheten for å minimere $\tau - \tilde{T}$, dermed detektere feilen i PF-intervallet. Deteksjon av en startende feil før punktet F vil gi en UKV-feil, tiden til utbedring av tilstanden er da gitt av $t_{PF} - (\tau - \tilde{T})$, før den blir akutt (AKV).



Figur 5.2: PF-intervall-modell[9, Figur: 9.17, s. 395]

Som tidligere nevnt blir inspeksjon av sporfeltene utført for sjeldent, dette medfører at $\tau - \tilde{T} > t_{PF}$, som medfører at funksjonsfeil oppstår og gir driftsfeil, før den oppdages.

Angitt i *figur 5.2* er konseptet med at PF-intervallet har en gitt lengde avhengig av feilen, altså uavhengig av vedlikeholdsstrategien. Dermed bør PF-intervallet være like stort som tiden det tar å utbedre feilen, ved kortere PF-intervall i forhold reparasjonstid vil tilstandsovervåkingen ha tilsvarende mindre nytteverdiverdi. På en annen side vil all form for varslings av en fremtidig feil gi en fordel fremfor å ikke få det. I tilfellet en feil oppdages som UKV, vil vedlikeholdspersonell rykke ut for å rette feilen, men den blir akutt(AKV) før de når frem eller klarer å fjerne denne, vil situasjonen uansett bedre dagens situasjon. Sistnevnte argument holder fordi den opplevde nedetiden reduseres.

Tilstandsovervåking vil kunne tilby historiske data for senere analyse. Dette vil være en stor forbedring ved bruk av feilstatistikk basert på Banedata som er gir grunnlag for kvalitative vurderinger utført av vedlikeholdspersonell. Feilmeldingene

vil altså medføre en mer standardisert identifisering av feil, basert på kjente og etterprøvbare kriterier, forutsatt et automatisk gjenkjenningssystem av feil basert på målingskurvene.

Ved implementering av et tilstandsovervåkningssystem burde hver detekterbare feil ha et estimert PF-intervall, altså basert på typen feil, i tillegg til estimering av hvor langt feilen har kommet i feilforløpet.

5.4 Tilstandsovervåkning

For å tilfredsstillere kravet om pålitelighet og oppetid kreves endringer og forbedringer i vedlikeholdsstrukturen. For å gå dypere i forslagene med endringer i vedlikeholdsstrategi fra forrige seksjon trenger man et automatisert alternativ til inspeksjon av utstyr og komponenter, der inspeksjoner erstattes av automatiserte målinger. Automatisering av inspeksjoner vil gi muligheten til å innhente store mengder informasjon om infrastrukturen. Dette kan gi mer kontroll over infrastrukturen som overvåkes, fordi man vil få mye informasjon, med hyppigere intervall i sanntid fra komponenter og systemer langs linjen. Måten disse dataene hentes inn og analyseres er avgjørende for mye effekt som kan hentes ut av et tilstandsovervåkingsystem.

5.4.1 Tidligere bruk av tilstandsovervåking

Sporveksler

Det ble nevnt i innledningen til denne rapporten at et pilotprosjekt på tilstandsovervåking av sporveksler i Norge har vært gjennomført, på Trondheim Sentralstasjon. Systemet ble testet for å få kontroll over de infrastrukturobjektene som medfører flest feil. Sporveksler og sporfelter er de infrastrukturobjektene som er mest utsatt for feil.

Det er interessant å se på erfaringer fra sporvekselovervåkingen, for eventuell videre bruk i et system for sporfeltovervåking. Men det er store forskjeller i virkemåten til disse to infrastrukturobjektene, blant annet geografisk omfang og operasjonstid^{12,13}.

Tilstandsovervåkingen av sporveksler bruker strømforbruket i drivmaskinen som et mål på tilstanden til objektet, som nevnt i *seksjon 2.5*. På bakgrunn av strømmålingen kan det registreres om sporvekseltungen er blokkert av et fremmedlegeme¹⁴, dårlig smurt eller andre feil eller mangler. Hver av disse feilene vil ha en karakteristisk signatur på strømkurven, som vil skille seg fra referansekurven til drivmaskinen i normal og feilfri operasjon.

En viktig egenskap med måling av strøm i drivmaskinen er at den detekterer de «viktigste» feilene som er forbundet med sporveksselfeil. Målingene av sporvekselstrømmen brukes til å produsere en «smøregraf» som indikerer en treg veksling med lang omleggingstid. Dermed kan langtidseffektene av smøring måles, i tillegg få et konkret mål på effektene av å smøre sporvekslene. Dette konseptet, i tillegg til fremmedlegemer i vekselen som blokkerer sporvekseltungen, er det lett å etterprøve

¹²Tid brukt til å endre systemet fra en tilstand til en annen, altså veksling fra et spor til et annet eller tid fra tiltrekk til frafalt (eller omvendt) sporfeltrelé

¹³Mer om denne overvåking kan leses i artikkel om POSS[12]

¹⁴Som snø/is, kvist/løv eller malm og lignende fra godstransport

og kontrollere dette ved manuell inspeksjon på grunn av begrenset geografisk omfang, og mekanisk oppførsel i større grad enn elektronisk oppførsel.

5.4.2 Hva og hvor bør det måles?

Kortslutning er som kjent hovedprinsippet bak sporfeltenes virkemåte, derfor er det naturlig å måle elektriske egenskaper i sporfeltkretsen. Av elektriske egenskaper finnes strøm, spenning, motstands, induktans og kapasitans, hvor de tre første er knyttet sammen med Ohms lov gitt i *ligning 2.4*, de sistnevnte er komplekse enheter av elektrisk motstand.

Måling av elektrisk strøm er den mest utbredte måleenheten av nevnte elektriske enheter, dette gjennomføres lettest ved hjelp av en transduser. Det mest utbredte målesensoren er en hallgenerator, som måler strømmen i en elektrisk leders påvirkning på et magnetfelt, sensoren setter opp¹⁵. Fordelen med denne sensoren er at endringer i sikringsanlegget kan unngås ved montering av sensoren fordi denne kobles på rundt en eksisterende strømløper. Dette er en veldig viktig egenskap, som få andre målemetoder kan tilby.

Tilstandsovervåkning vil kunne gi veldig forskjellige resultater ut fra hvor det måles. De ulike stedene hvor målinger utføres på sporfelter har bakgrunn i *figur 2.3*, videre diskusjon vil referere til plasseringer i nevnte figur.

Målinger utført i sporet, på sekundærsiden av tilførselstransformatoren eller primærsiden av returtransformatoren, vil gi en direkte måling på strømmen som går i sporfeltet. Dette gir har både positive og negative sider, på den ene siden vil det vise hva som mates inn i returkretsen uten noen form for filtrering eller begrensnings. På den andre siden er målingen veldig utsatt for store strømmer. Sistnevnte krever ofte dyrt måleutstyr for å kunne måle med en viss nøyaktighet både for små og (veldig) store strømmer. Det krever også kraftig og dyrt utstyr bare for å tåle påkjenning av de strømmene som potensielt kan gå i skinne. Det er antageligvis ikke veldig interessant å måle store returstrømmer, kun å vite om det er tilstede eller ikke.

Videre er det målinger av tilførsel- og returkrets alternative steder å utføre målinger. Av disse er det intuitivt best å måle på returkretsen, for å se hva som påvirker sporfeltreléet, som igjen bestemmer sporfeltets oppførsel. Den største ulempen med dette er at målingen utføres på sekundærsiden av returtransformatoren, som er relativt liten, altså lav kapasitet og går fort i metning. Dette argumentet vil skjule strøm over en viss størrelse når transformatoren går i metning.¹⁶

¹⁵Se seksjon 2.3.1 på side 25

¹⁶Beskrevet under «transformator» i *seksjon 2.1.4* på side 21

Tilførselskretsen er mulig å overvåke, selv om denne kretsen påtrykker spenning til sporfeltkretsen. Målingene vil tilsvarende som returkretsen være beskyttet av (tilførsels)transformatoren, mot store returstrømmer. På grunn av transformatorens vil primærsiden endres ut i fra hvor mye strøm som trekkes fra sekundærsiden¹⁷, dermed vil endringer i spenningen i sporet være mulig å fange opp i tilførselskretsen. Fordelen med å måle i tilførselskretsen i forhold til returkretsen er at transformatoren i førstnevnte er større enn i sistnevnte. Dette gjør mer strøm nødvendig for å få tilførselstransformatoren til å gå i metning. Dermed vil mer kunne måles i tilførselskretsen, fordi mer strøm slipper gjennom transformatoren. Om dette gir muligheten for et større spekter av feiltyper må testes eksperimentelt før konklusjoner kan trekkes fra dette.

Fordelen ved måling av returkretsen er som nevnt, indikasjon på det samme som reléet opplever. Tilførselskretsen kan gi gode målinger, men disse målingene er ikke det samme som påvirker sporfeltreléet, er teller negativt. Løsningen bør være å måle begge steder, for å kunne kombinere fordelene med begge målestedene. Fordelen med dette er muligheten til å mer nøyaktig kunne spesifisere hvilke type feil som oppstår ved å kombinere målingene av disse. Konkrete eksempler på kombinasjonsmålinger vil være å måle en forventet strøm i tilførsel, men lavere enn forventet i retur, som kan indikere høy avledning fra sporet. Videre vil høy tilførselsstrøm uten returstrøm kunne indikere kortslutning av skinnestrengene, ved kun å måle returkrets, vil denne typen feil kun resultere i ingen eller veldig lav strøm.

Målt sporfeltstrøm vil endre seg ut fra hvor på sporfeltet kortslutningen befinner seg. Dette har sin naturlige forklaring med strømbegrensning som følge av naturlig motstand i skinnene. Hvordan denne endringen måles avhenger også av hvor målingene utføres.

Den enkleste formen for et automatisert målesystem vil å måle verdier veldig lav frekvens, mye lavere enn signalfrekvensen. Dette ville vært en direkte utvidelse av dagens inspeksjoner, altså ingen utvidet funksjonalitet bare høyere inspeksjonsintervall, uten linjevisitasjon. For eksempel målingene vil kunne fange opp endringer i avledning og andre langtidseffekter som kan føre til feil. Ved denne typen målinger vil det være fordelaktig å utføre målinger både i tilførsel- og returkrets. For å kunne detektere så mange feilsituasjoner som mulig, ved å sammenligne måleverdier i de respektive kretsene.

Videre ved et måleoppsett basert på tasting ved en frekvens høyere enn signalfrekvensen vi fler typer feil kunne måles. Dette vil etter forfatterens kunnskap øke muligheten utover dagens inspeksjoner av anlegget, som kun måler enkle strømverdier, tilsvarende forslag i forrige avsnitt. Dermed vil transiente strømverdier måles og

¹⁷Sekundærsiden er mot sporet

knyttes til spesifikke feil, som ikke vil fanges opp av lav-frekvensmålinger. Denne fremgangsmåten vil ha mest igjen for å måles i returkretsen, men tilførselskretsen har som tidligere nevnt større transformator og i stand til å måle høyere strømmer uten metning.

Ved å implementere sistnevnte system med muligheter for å fange transient oppførsel av strømsignalet i både tilførsel og retur. Med dette vil man kunne inkludere målinger av langtidseffekter som nevnt tidligere. Men kombinasjon av disse målingene vil kreve et mer avansert analyseverktøy for å detektere og kombinere flere målinger for å gi indikasjon på spesifikke feil, både på kort- og lang sikt.

For å utnytte innsamlet data bør et analysesystem anvendes, dette bør ha en maskinlæringsdel som kan automatisk knytte banedataelementer mot målinger på aktuelt område. Datasystemet bør være i stand til å foreslå sammenhenger i potensielle feilkurver, for deretter å vurderes av en fagekspert for godkjenning av sammenheng. Fordelen med dette er at systemet vil kunne foreslå ukjente feil og sammenhenger. For å best kunne forstå feilen og optimalisere vedlikeholdet, burde analysesystemet kunne estimere PF-intervallet på bakgrunn av målt karakteristikkk og estimert feil. Dette vil gjøre det lettere å planlegge og prioritere vedlikeholdsoppdrag.

Behov for filtrering av signalet

Det kan være interessant å filtrere strømsignalet. Dette har både fordeler og ulemper, man kan fjerne viktig informasjon og dermed gi et uriktig bilde av situasjonen. Alternativet er at uinteressant støy som ikke påvirker sporfeltets operasjon eller indikerer noen form for funksjonsnedsettelse fjernes, noe som gjør det lettere å vurdere hvilke effekter som påvirker sporfeltkretsen.

Ved å velge ut hvilke frekvenser man ønsker å inspisere kan være interessant når man leter etter strøm på spesifikke frekvenser, knyttet konkrete feil. Dette stiller krav til god kjennskap til alle feil, i tillegg til at disse har et kjent og relativt konstant operasjonsfrekvens.

Ulempen blir framtidene hvis det foreligger for liten kunnskap om frekvenssegenskapene knyttet til feilene. I tillegg står man i fare for å fjerne viktige frekvenskomponenter, spesielt uten å være klar over tapet av informasjon. Ved praktisk implementasjon av filtre får man en glidende kurve som gir et mindre skarpt kutt i frekvensspekteret, som videre gir en glidende overgang til de fjernede frekvensene. I motsetning til et ideelt filter, som kutter frekvenser med et perfekt skarpt filter. Men andre ord vil et filter i praksis få med noen frekvenskomponenter på «andre siden» av grensefrekvensen¹⁸, hvor et ideelt filter ikke har denne egenskapen.

¹⁸en. cutoff frequency

For å få innblikk i påvirkningen på sporfeltreléet kan filtreringen fjerne alt som ikke har effektfull påvirkning på sporfeltreléet. Dette kan gjøres ved å måle hvilken faseforskyvning sporfeltfasen har i forhold til lokalfasen. Som tidligere nevnt trekker sporfeltreléet til med mest kraft ved 90° faseforskyvning, selv om det er tilstrekkelig helt nede i 60° faseforskyvning.¹⁹

En gunstig måte å vurdere frekvenser er å bruke en fouriertransformasjonen for feilanalyse. Teknikken genererer et frekvensspekter av signalet, transformasjonen blir ofte implementert av en «Fast Fourier Transform»(FFT). Sistnevnte implementering er skapt for å effektivt generere fouriertransformasjonen i en datamaskin. Fordelen med dette, forutsatt tilstrekkelig oppløsning er at ingen frekvenser undertrykkes i motsetning til filtrering. Dermed kan alle frekvenser vises i spekteret. Dette kan gi muligheten til å identifisere feil på bakgrunn av frekvens, som da vil forekomme som en frekvenstopp i spekteret.

5.4.3 Når og hvor ofte bør måles?

Designet av tilstandsovervåkingen må konstrueres så ønsket informasjonen om systemet kan observeres og lagres. Det antas at tilstandsovervåkingen som helhet har økonomiske begrensninger, som gjør at det ikke er ubegrenset lagringskapasitet og -tastefrekvens. Forutsatt at økningen av de nevnte parameterne, øker kostnadene. For å bøte på denne begrensningen må man bruke metoder for å begrense lagring og tastefrekvens.

Innledningsvis vil man taste signalet så ofte som mulig, dette vil altså gi en mest mulig korrekt representasjon av signalet. Motvekten er lagringsplass, som ved optimalisering med hensyn til dette, vil gi en veldig lav tastefrekvens. Den nedre grensen vil være begrenset punktet hvor det oppstår aliasing, som er beskrevet i *seksjon 2.3.4* på side 26. Dermed har man øvre grense på lagring (eller båndbredde), nedre bestemmes av grensen hvor aliasing unngås.

Nedre grense som bestemmes av aliasing er angripelig som konsept. Problemet som oppstår for å bestemme denne grensen er hvilke frekvenser man er interessert i å måle. Den høyeste frekvensen som skal måles må derfor defineres. Som en følge av dette må den høyeste frekvensen til «interessant støy» finnes, dette støyet er da noe som beskriver en eller flere typer feil.

Målinger utført på sporfeltsimulatoren ved Norsk Jernbaneskole illustrerer aliasing i *seksjon 4.3* på side 67. I nevnte seksjon beskrives signaleffektene ved lav, middels og over middels høy tastefrekvens, av *figurene 4.13, 4.14 og 4.15*. Frekvensspekterene i disse figurene angir hvilke frekvenser som registreres av samme signal med ulike taste-

¹⁹Se seksjon 2.1.4 på side 18

frekvenser. På grunn av manglende reele støykilder som finnes på ordinære sporfelter i drift er ikke signalet tastet for høyere frekvenser enn 500 Hz på sporfeltsimulatoren.

Nyquistfrekvensen som er omtalt i *seksjon 2.3.4*, er definert for et rent sinussignal. Dette byr på en del praktisk utfordringer fordi få reele signaler er rene sinuskurver. Derfor bør det målte signalet analyseres nøye for å finne den høyeste frekvenskomponenten i signalet for å bestemme tastefrekvensen. I tillegg bør alt potensielt også analyseres med tanke på hvilke frekvenser som påvirker sporfelten, for å kunne måle dette. For eksempel danner generatorene kjøre- og sporfeltstrøm genererer en nær ideell sinus, vil denne forvrenges og få harmoniske overtoner som resultat av ulineære impedanser, som i transformatorer og andre elektroniske komponenter. Derfor må tasting utføres med tanke på disse støyeffektene, men med fordel bruke Nyquistfrekvensen som et utgangspunkt.

I *seksjon 2.3.4* på side 26, vises effektene av ekstra frekvenskomponenter til (sporfelt)signalet. Dette er effekter som kan oppstå på sporfelter i drift, men som ikke kommer frem i sporfeltsimulatoren. Videre er effektene av ulik tasting (inkludert aliasing) beskrevet i *figurene 2.12, 2.13, 2.14 og 2.15*. Hvor første tydelig er aliasing, andre figur gir korrekt frekvens etter tasting men grafisk effekt opptrer i signalet siden denne er såpass nære signalfrekvensen.²⁰ Tredje figur er nære en komplett representasjon av signalet, men de kuttete toppene gir opphav til en indusert tastefrekvens i frekvensspekteret. Den fjerde figuren viser en visuelt komplett representasjon av det tastede signalet. Det er viktig å merke seg at det kun er den første figuren som er påvirket av aliasing, altså den opprinnelige signalfrekvensen er permanent tapt etter tasting.

Øvre begrensning av tastefrekvensen er lagringen, alternativt båndbredden til overføring av registrerte data. Det må være kapasitet både til å lagre og håndtere data, denne kapasiteten koker ned til ren matematisk optimalisering med parametere pris per lagringseenhet, og tilsvarende for båndbredde.

Det finnes metoder for å «komprimere» registrerte data, for å unngå lagring av store mengder uinteressante data. Blant disse teknikkene kan systemet lagre datapunkter inntil signalet når en gitt grense eller oscillerer med en viss amplitude og frekvens. Ved å buffere data over et kortere tidsrom vil systemet bestemme om bufferen skal lagres på grunn av interessante hendelser, gitt av satte kriterier med software. Dermed vil lange perioder med stabil og feilfri operasjon kunne unngå lagring. For å få en komplett historikk kan dette representeres med tilsynelatende lavere frekvens med konstant måling. Men med alle typer komprimering av data vil det alltid være en fare for å slette data som kan brukes og analyseres. Derfor krever det nøye gjennomgang av forkastelseskriteriene til bufferen i et slikt komprimeringsystem.

²⁰Beskrevet i *seksjon 2.3.4*

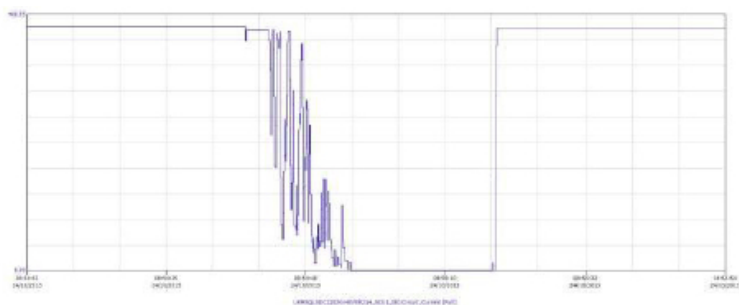
5.4.4 Forslag til feilkarakteristikker basert på strømkurver

Målet med tilstandsovervåking er å få hyppig oppdatering på tilstanden til infrastrukturen, altså en økt informasjonsmengde. Utvidet tilgang på data i seg selv er ikke nyttig ved mindre man kan analysere og tolke resultatene til verdifull informasjon, altså kunne lese feilsymptomer ut av strømkurvene. Neste seksjon vil derfor komme med forslag til hvordan ulike feil kan registreres med karakteristiske strømkurver, gitt av tilstandsovervåkingen.

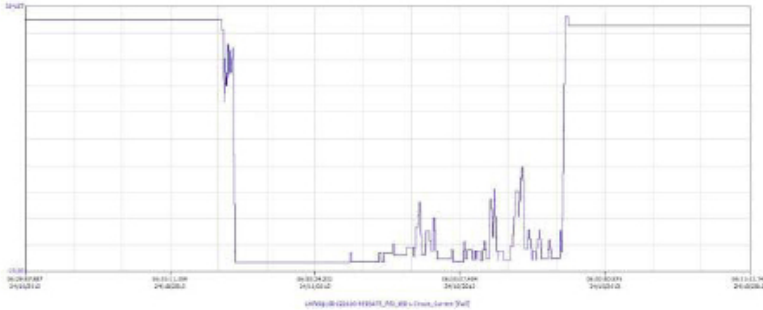
En målt strømkurve i returkretsen vil generelt sett indikere driftsfeil hvis det er forstyrrelser av strømmen der strømmnivået er høyt, altså når frem til og spenningssette sporfeltreléet. Ved lavt strømmnivå, hvor sporfeltreléet ikke får tilført strøm vil en forstyrrelse og støy indikere en sikkerhetsfeil. Første argument begrunnes med at sporet i utgangspunktet er fritt, fordi kurven «hviler» på høyt strømmnivå som indikerer ingen kortslutning. Kurven vil fra det høye strømmnivået gi utslag ned til mindre strøm hvor sporfeltet kan gi belegg om dette går langt nok ned. Det andre argumentet begrunnes med motsatt tilfelle som det første, at sporfeltet trekker naturlig til lavt strømmnivå som indikerer belagt spor. Dermed vil strømmen få utslag opp til høyere strøm som kan gi fritt spor, selv om sporfeltet er belagt.

I artikkelen «Experiences in failure prevention of track circuits» av Dr. Chris R. Bell[13], beskrives strømkurvekarakteristikker på bakgrunn av spesifikk feil målt med tilstandsovervåking. Artikkelen beskriver karakteristikk for sporfelt som drives av 50 Hz AC med «Westinghouse - VT1»-reléer, på DC-kjørestrom med 25 kV [13, s. 1,2]. Alle kurvene vist i denne seksjonen hentet fra nevnte artikkel, viser et filtrert signal som kun tar med strømmer som vil påvirke reléoperasjonen. Målingene er utført med en strømtransduser(hallgenerator) satt på rundt en leder, med tastefrekvens på 1 kHz .

Forurensning på/ved skinnestreng



Figur 5.3: Skinneforurensning[13, s. 5]



Figur 5.4: Skinneforensning[13, s. 5]

Figur 5.3 og 5.4 viser forurensning i skinnegangen. Disse figurene viser strømkurvene med tilsynelatende tilfeldig hvitt støy²¹. Resultatet av denne typen feil/forstyrrelse kan gi lang overslagstid på reléankeret og ustabil operasjon. Denne typen feil kan resultere i både driftsfeil og sikkerhetsfeil.

Forensning av sporet kan oppstå i form av løv og kvister i skinnegangen, korrosjon på skinnhodet og andre ledende gjenstander i forbindelse med skinne, et eksempel er jernmalm fra godstransport. Denne typen feil er utsatt for farlige feil, altså feil som medfører en sikkerhetsrisiko.

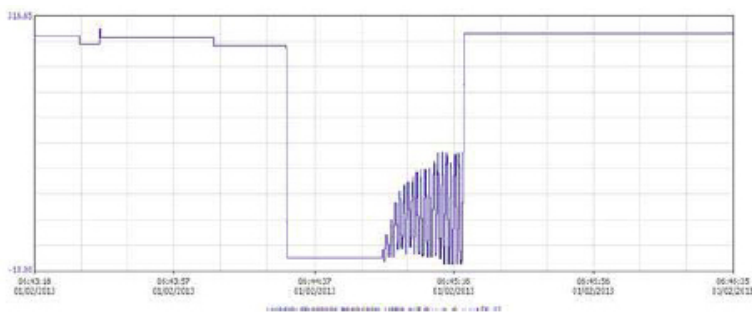
Risikoen oppstår ved for dårlig kontakt mellom skinnhode og toghjul, som følge av korrosjon eller for lett tog som reduserer kontakten mellom skinne og toghjul. Alternativt hvis det oppstår elektrisk ledning av sporfeltstrømmen langs med skinnene, som følge av fremmedlegemer i skinnegangen og andre typer forurensning, eller jordingsfeil.

Løs skinneforbinder og kabelfeste

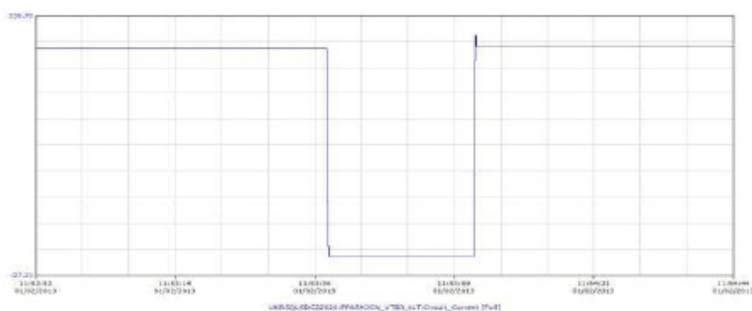
Formen til strømkurven som registreres ved denne typen feil har en relativt strukturert form. Sannsynligvis oppstår oppførselen observert på figur 5.5 ved vibrasjoner i kabelens festepunkt, som en følge av resonansfrekvenser mellom over-/underbygning og togsett, ved passering av tog. Derfor oppstår vibrasjoner med jevn frekvens/amp-litude. I figur 5.5 bærer preg av løs skinneforbinder/kabel mot slutten av sporfeltet, relativt til togets retning. Figur 5.6 viser samme sporfelt og måling som figur 5.5 etter utbedring av problemet ved å stramme skinneforbinderen[13, s. 5].

Elementer i forbindelse med sporet kan bli utsatt for og skape vibrasjoner, i tillegg kan de gi effekter på veldig forskjellige måter i forbindelse med sporfeltene. De mest åpenbare feilene er vibrasjoner i kabler som forårsaker ustabil operasjon av

²¹en. random noise/white noise



Figur 5.5: Løs skinnforbinder før feilforbedring[13, s. 5]



Figur 5.6: Løs skinnforbinder etter feilutbedring[13, s. 5]

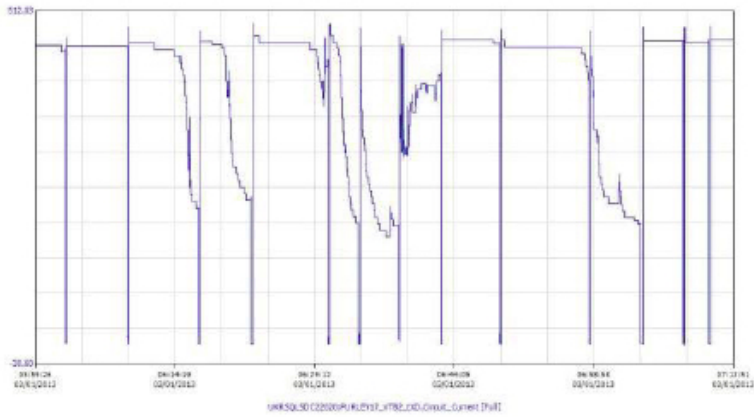
sporfeltreléet. Reléet kan trekke til og falle av med høy frekvens, hvis en løs kabel(-feste) vibreres med en gitt frekvens. Dette kan gi vekselvis kontakt og ikke-kontakt, dermed av og på med strømmen. Årsaken til løse kabler kan komme av dårlig montering, eller av at vibrasjoner rundt resonansfrekvensen til kabelfestet, kan riste disse løse. Resultatet fra dette skaper ytterligere vibrasjoner som varierer ut i fra passering av ulike tog, i tillegg til tyngden og farten til disse.

Kortslutninger av skinnestrengene

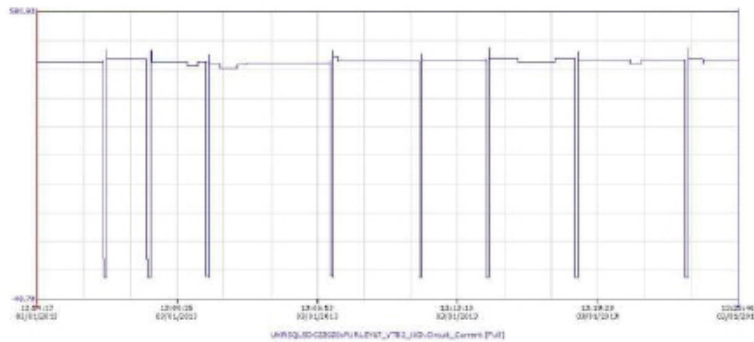
Strømkurven i *figur 5.7* viste seg å komme fra en rusten wire liggende i skinnegangen, som forårsaket driftsforstyrrelser, i form av store avvik i strømmen som nådde frem til reléet. Ved fjerning av nevnte wire ble normal operasjon opprettet, som vist i *figur 5.8*.

Ødelagt impedansspole

Figur 5.9 og *5.10* viser strømkurvemåling av et sporfelt over en hel dag, kurvene viser henholdsvis en feilende impedansspole og en reparert, vel fungerende impedansspole. Det er tydelig mye støy i *figur 5.9* hvor impedansspolen var ødelagt/overbelastet,

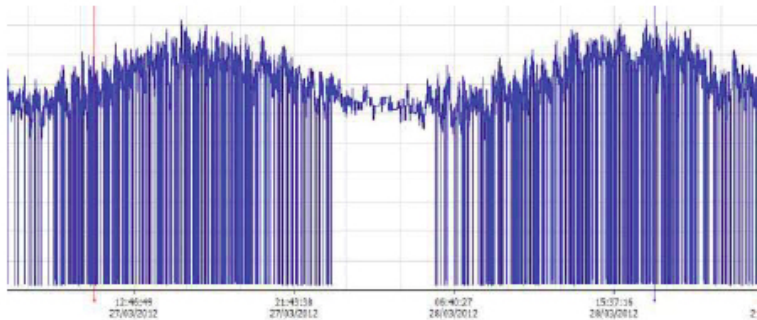


Figur 5.7: Metallgjenstander i skinengangen[13, s. 6]

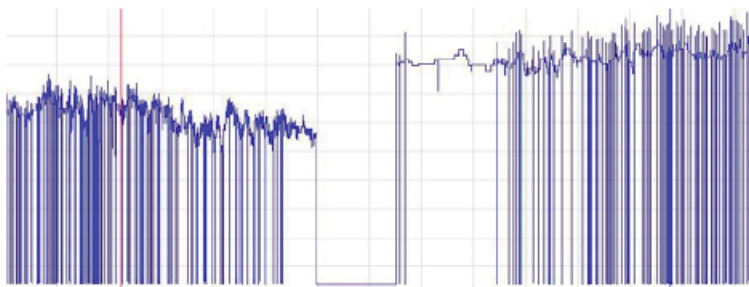


Figur 5.8: Etter fjerning av metallgjenstander i skinengangen[13, s. 6]

videre viser *figur 5.10* strømkurven etter utbedring av feilen, som inneholder tydelig mindre støy og jevnere operasjon.



Figur 5.9: Feil på impedansspole[13, s. 6]



Figur 5.10: Etter utbedring av feil på impedansspole[13, s. 6]

Andre kjente feil

Bremsespon er en årsak til kortslutning, som kan gå på tvers av sporet eller over isolerte skjøter.²² Bremsespon oppstår ved kraftig bremsing av rullende materiell, som kan gjøre at metallfragmenter blir liggende over isolerte skjøter, som kan gi driftsfeil. Metoden for å unngå problemer med bremsespon, er som tidligere nevnt, å montere permanentmagneter i forbindelse med isolerte skjøter, disse vil trekke til seg metallspen og dermed fjerne det fra å lede strøm over isolerte skjøter. Ulempen med denne teknikken er at de krever manuell rensing av vedlikeholdspersonell når permanentmagneten er «full» av metallspen.

Blunkblegg er betegnelsen på belegg av sporfelt som oppstår og forsvinner uten at feilen finnes frem til, eller årsaken oppdages. Denne typen feil vil sannsynligvis bli mye mer belyst ved kontinuerlig måling av sporfeltstrømmen. Dette fenomenet kan i praksis være de fleste av tidligere nevnte feil. Det antas at den eneste måten å få kjennskap til og spesifisere denne typen feil, og rette den er ved tilstandsovervåking.

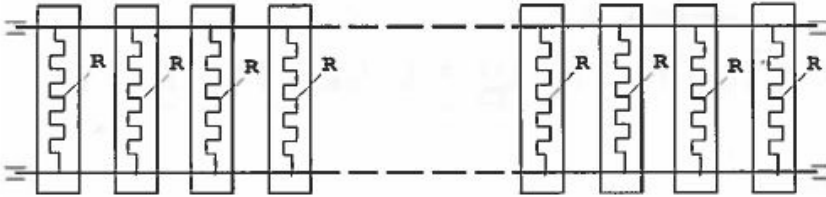
Endringer over tid

Til nå har i hovedsak potensielle feil med høyfrekvente karakteristikk blitt diskutert. Endringer og forringelser av elektriske egenskaper i kretsen som endres over tid, som til slutt fører sporfeltet ut av operasjonområdet vil sannsynligvis ikke fanges opp av et system som kun vurderer høyfrekvente transienter. Målinger av kretsens karakteristikk har da mulighet til å kontrollere verdiene ut i fra målinger ved montering av systemet og grenser gitt av teknisk regelverk.

Avledning i sporet betegnes som en strømlekkasje til omgivelsene fra sporfeltstrømmen. Dette er knyttet opp mot elektriske egenskaper til elementene i overbygningen og eventuell forurensing i skinnegangen, og i noen tilfeller også underbygningen. I

²²Bremsespon(/metallspen) er diskutert i seksjon 5.1.1 og 5.1.2, på henholdsvis side 72 og 74

«Condition Monitoring of Audio Frequency Track Circuits»[11], beskrives at det sporfeltstrømmen reduseres omtrent med 10% ved regnvær, med unntak av veldig små regnbyger. Altså øker avledningen med mer fuktig vær, dette er beskrevet i *seksjon 5.2*. For eksempel relativt liten og langvarig endring av avledning etter regnvær kan være et tegn på for dårlig drenering i området sporavsnittet befinner seg. I tillegg øker ofte avledningen med forurensing av ballasten, dette gir mer permanent endret avledning.



Figur 5.11: Sviller modellert som ohmske motstander mellom skinnestrengene[10, s. 160]

I *figur 5.11* vises svillene modellert som parallellkoblede motstander mellom skinnene, det antas at denne motstanden er avhengig av fuktigheten i bakken. Dette vil være mest effekt der tresviller brukes, som kan trekke til seg vann. Betongsviller være påvirket av dette, som i motsetning til tresvillene har innstøpt armering, som kan lede strøm. Ved Ohms lov gitt i *ligning 2.4* kan den resulterende motstanden beregnes, basert på motstandsnettverket gitt i *figur 5.11*. På bakgrunn av motstandsendringen i kretsen kan dette brukes til å modellere avledningen når man kjenner strømmen.

$$\frac{i}{v} = \frac{1}{R_{res}} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_k} \quad (5.1)$$

I *ligning 5.1* representerer i strøm, v spenning, R elektrisk motstand og k er antallet sviller på sporavsnittet, som er avgrenset av isolerte skjøter i hver ende.

På bakgrunn av *ligning 5.1* kan vi konkludere med at den totale motstanden i parallellkoblingen av sviller, som får redusert den elektriske motstanden. En måte å redusere denne avledningen på kan være ballastrensing, som vil øke motstanden mellom skinnestrengene.

5.4.5 Tilstandsovervåking av rotårsaker

Ved tilstandsovervåking vil det være aktuelt å tilstandsovervåke rotårsakene til feil, i tillegg til symptomer/synlig feil, som gitt i *figur 5.1*. Dette vil være aktuelt og nødvendig når tilbakevendende problemer oppstår, hvor feilen utbedres men årsaken tydelig forblir urørt.

Dagens problem med foreslått overvåkning av rotårsaker, er for lite kjennskap og kontroll over disse, som vist i «pareto»-diagrammene 4.1 og 4.2. For å få tilstrekkelig kunnskap om disse rotårsakene kreves det sannsynligvis et samspill mellom vedlikeholdspersonell og tilstandsovervåkning. Dermed vil en kombinasjon av å overvåke rotårsaker og spesifikke feil på sporfeltene kunne gi alarmer både når feil oppstår og når andre «rotårsak»-situasjoner inntreffer. Sistnevnte vil kunne indikere økt sannsynlighet, og behov for forebyggende vedlikehold for å unngå en gruppe feil, basert på alarmnivå på en gitt rotårsak.

5.5 Analyse-system

Som nevnt innledningsvis i *seksjon 5.4*, medfører tilstandsovervåkingen en kraftig økning i informasjonsmengden systemet gir om egen funksjonsnivå. Det må derfor finnes strukturer som kan benytte seg av denne informasjonen, uten dette vil tilstandsovervåkingen være av mindre verdi men ikke nytteløst. Tilstandsovervåking vil kunne fungere og være veldig nyttig selv uten et høynivå analyse-system, fordi man kan tolke strømkurver uten et analyse-system på toppen. Det er fordi tilstandsovervåkingen i seg selv vil gi økt innsikt i sporfeltens oppførsel og utvikling, som i dag er utilgjengelig og kun delvis skaffes ved inspeksjoner. Med et analyse-system vil man kunne optimalisere vedlikeholdet i mye større grad. Fordi man kan benytte seg av mange informasjonsskilder til analyse og prediksjon av feil og årsaker.

Når det innhentes informasjon om et teknisk system, blir dette fort uhåndterlige mengder data for manuell analyse og beslutning. Dette gjelder spesielt når det oppstår Internet Of Things (IOT)-lignende systemer, altså store mengder målinger og datamateriale. Dette medfører store sensornettverk, som eksempelvis sporfelter og sporveksler, som krever analyse og tolkning, som antageligvis for jernbaneobjekter ville kreve en person per objekt for analyse og vurderinger, noe som er urealistisk i kostnadsperspektiv. Den siste tiden har mulighetene for å tolke og bruke all denne informasjonen blitt omtalt som BigData-analyse, altså strukturering, tolkning og visualisering av store mengder data.

Foruten tilstandsovervåking som er på vei inn nå, finnes det store mengder data som er koblet til jernbanens infrastruktur. Alt fra feil, forsinkelsestimer, togtrafikk og klimadata, kan kombineres for å skape et mer effektivt vedlikehold. Mye av informasjonen finnes men den må brukes, på riktig måte. I tillegg vil denne typen system kunne standardisere og sentralisere mye av vedlikeholdsplanleggingen og kontrollen med infrastrukturen. Det vil gi mer generisk vedlikehold uavhengig av hvilken region i landet feilen oppstår på. Et tillegg til nåværende informasjonsmengde kunne det være interessant å tolke feil på bakgrunn av frekvensspekteret av sporfeltstrømmen. Forslaget kommer på bakgrunn av kurvene presentert i *seksjon 5.4.4*, hvor en mengde av feilene ser ut til å ha karakteristikk på gitte frekvenser. En slik frekvensanalyse

kan gjennomføres med en fast fourier transform(FFT)²³, denne operasjonen vil gi et frekvensspekter som kan tolkes, tilsvarende spekter er gitt i resultatene fra målingene på sporfeltsimulatoren gitt av *figurene 4.13, 4.13 og 4.13*.

Et interessant bruksområde er kartlegging av rotårsaker med et analysesystem. Langtids systematisering av alle tilgjengelige data kan foreslå for systemekspert at det oppstår en spesiell type feil hver gang en bestemt værissituasjon forekommer, eller en feil skjer på et gitt sted når en spesifikk type tog passerer. Disse typen sammenhenger er veldig vanskelig og ikke minst tidskrevende å finne manuelt, fordi datamengden og mulige kombinasjoner er enorme. Bruk av prediksjonsanalyse vurderes som mest virkningsfullt for å desimere sannsynlighet for spesifikke typer feil, da som et ledd i beredskapsplanlegging av vedlikeholdspersonell.

²³FFT er også nevnt på side 87

Kapittel 6

Konklusjon

6.1 Rotårsaksanalyse og klimapåvirkninger

Det er tydelig at sporfeltfeil og tilhørende årsaker til disse ikke blir funnet. Dette kommer tydelig fram av rotårsaksanalysen. Den mest konkrete hovedårsaken til sporfeltfeil registrert i banedata er på grunn av kortslutninger ved metallspen. Videre er støv/skitt/belegg, løse kabelfester og defekte isolerte skjøter sterke bidragsyttere til feil, men dette kommer i skyggen av de uten feilidentifikasjon. I det gamle feilkodesettet var omtrent halvparten av feilene representert ved «kortslutning», disse har blitt sammenlignet med nytt feilkodesetts «konsekvens»-kolonne, som kan forklare feilene som angis av «belagt spor». Kortslutning og belagt spor kan forveksles, fordi de betyr det samme men på forskjellig abstraksjonsnivå. Det nye feilkodesettet har ikke «kortslutning» som en så stor feilkategori som det gamle feilkodesettet, men førstnevnte har en mye jevnere fordeling blant de mest forekommende feilene. Men felles for begge feilkodesettene er en veldig høy representasjon blant banedataelementer uten kjente feil, eller årsak. Sistnevnte knyttes ofte opp mot begrepet «blunkbelegg», hvor driftsfeil forekommer men feilen forsvinner før den blir utbedret, dermed forblir feil og årsak ukjent. På grunn av effekten av blunkbelegg er denne typen feil vanskelig å feilsøke, og man har ikke kontroll på hva eller hvor svikten har vært, eller om den kommer igjen. Derfor bør det komme på plass en mer konsistent feilregistrering, og økt fokus på identifikasjon av feil og årsaker til disse, i mange av tilfellene kreves et tilstandsovervåkningssystem for å løse dette.

Ved vurdering av klimaparameteres påvirkning på sporfeltene ble det registrert en sammenheng mellom nedbør og sporfeltfeil med månedsvis fordeling tok medianen over flere år. Trenden var en feiløkning tidlig på året relativt til nedbøren, senere på året fulgte feilkurven og nedbøren hverandre i stor grad. Dette viser en sammenheng mellom nedbør og sporfeltfeil, ulikheten i kurvene på starten av året forklares med snøsmelting som øker avledningen. Analysen av nedbør og temperatur på døgnbasis over en måned, viste nedbøren ingen tydelig innvirkning på feilraten, men i disse figurene er det et veldig lite antall feil. Temperaturkurven i samme analyse viste en

feiløkning der temperaturen fluktuerte rundt frysepunktet, men dette var kun en figur som hadde temperaturvariasjoner i dette området. Det ble registrert en nedgang i feil ved registrert stor snødybde, men dette er ikke et representativt resultat på grunn av lite datamengde på snøverdiene og bør undersøkes videre.

6.2 Tilstandsovervåkningens nytteverdi

6.2.1 Hva kan oppdages med tilstandsovervåkning?

Med den enkleste formen for tilstandsovervåkning kan det innhentes stasjonære målinger av sporfeltstrømmen. Altså en ren automatisering av inspeksjoner av sporfelter med målinger av strøm, uten å måle transient oppførsel. Dermed kan inspeksjoner og generiske arbeidsrutiner gjennomføres på sekunder men minimalt med personell, og uten linjevisitasjon. Dette vil kunne måle feil på strømverdiene, avledning, brudd og kortslutninger av forskjellige slag. Dette systemet vil for eksempel på tilsvarende måte som sporvekselovervåkingen bestemmer når de må smøres¹, kunne bestemme når ballasten bør renses for å redusere avledningen i sporet.

Hvis funksjonaliteten i forrige avsnitt utvides, med å øke frekvensen på målingene så de kan fange opp høyeste ønskelige frekvens, altså strømmens transiente oppførsel i feilsituasjoner. Ved å øke frekvensen som nevnt, vil et mye større spekter av feil kunne oppdages. Men dette krever at karakteristiske strømkurver kartlegges og knyttes til spesifikke feil. Ved stasjonære målinger vil dra stor nytte av å måle både i tilførsel og returkrets, for å kunne bruke stasjonære målinger og forskjellen på disse, dette sammenlignes med langtidstrender og grenseverdiene i tekniske regelverk. Videre vil transientmålinger i returkretsen være best egnet til å detektere begynnende feilsituasjoner, fordi den den målte strømmen vil være tilsvarende den sporfeltreléet opplever. Alternativet er tilførsel som vil kunne måle et større strømmen på grunn av større transformator mellom sporet og målingen. Totalt sett vil en kombinasjon av stasjonær og transient analyse av sporfeltstrømmen gi maksimal effekt av tilstandsovervåkingen, dette er fordi de forskjellige metodene måler ulike effekter og egenskaper ved sporfeltkretsen.

Tilstandsovervåkingen vil lette arbeidet til vedlikeholdspersonell utfører inspeksjoner, som ikke vil ha behov for tilgang til sporet i form av linjevisitasjon for å identifisere mange typer feil. Dermed ikke ta linjekapasitet. Overvåking av sporfelten vil i mindre grad bruke tid på å kontrollere fungerende komponenter på jakt etter feil, i motsetning til manuelle inspeksjoner. Forebyggende vedlikehold (og UKV-er) vil planlegges på bakgrunn av varsling fra tilstandsovervåkingen. Ved dette vil rutinebaserte handlinger automatiseres, mens mer krevende analytiske feilrettinger

¹Se seksjon 5.4.1, på side 84

utføres av vedlikeholdspersonellet. De får altså ved tilstandsovervåkning tilgang til et effektivt verktøy for å finne feil på sporfelt.

Effektivisering av feilretting vil også gjøre ved identifikasjonen av feil på et tidligere stadium, dermed vil feil med andre opphav enn i «signal», kan korrekt fag-gruppe kalles ut uten inspeksjon av signalfaget på forhånd. Hvis signal må rykke ut først for å konstatere at feilen ligger til en annen faggruppe, vil feilrettingen ta nær det doble av tiden. Noe som kan skje i mange tilfeller med dagens system. Dette kan unngås hvis feilen identifiseres ved tilstandsovervåkning på forhånd.

Det viktigste tilstandsovervåkingen vil tilby er å gi informasjon i sanntid fra sporfeltene. I tillegg kan det innhentes oversikt over feil (og årsaker) som tidligere var ukjente og veldig tidskrevende og vanskelige å oppdage. Blant disse har blunkbelegg som i lang tid har vært et problem på jernbanen, vil nå kunne identifiseres med tilstandsovervåkning. Problemet med denne typen feil er at det som indikerer feilen, stoppsignal, forsvinner uten at feilen identifiseres. Med tilstandsovervåkingen vil det kunne måle strømkurve selv om stoppsignalet er borte, dermed vil man sannsynligvis kunne få en indikasjon på hva feilen kommer av ved å analysere strømkurven.

Videre bør et tilstandsovervåkingssystem bedømmes ut i fra kostnader og besparelser dette medfører. Det er klart at et system for å overvåke de fleste sporfelter i Norge vil koste, men det vil i utgangspunktet være en engangskostnad ved installering. Dette vil spare kostnader i form av færre inspeksjoner/linjevisitasjoner, som er en tids- og dermed kostnadskrevende post. De store linjene koker ned til en engangsutgift med tilstandsovervåkning mot en løpende utgift med vedlikeholdsinspeksjoner, og sannsynligvis flere feil. Derfor må viktigheten av høy oppetid, -pålitelighet og -kontroll på sporfeltene inn i ligningen. Men dette må være en vurdering fra infrastruktureier, altså hvor mye har økt pålitelighet og kontroll overinfrastrukturen verdt. Med det mål å nå satte pålitelighets- og punktlighetsmål, når reduksjonen i nevnte faktorer forårsakes i stor grad av sporfeltene.

6.2.2 Analyse av tilstandsovervåkningsdata

For å få best mulig utnyttelse av et tilstandsovervåkingssystem for sporfelter bør det fungere i samarbeid med et analyseprogram for analyse av feil, som også kan gi advarsler, forslag til oppfølgingspunkter og alarmer. Dette systemet bør ha evnen til å identifisere feil basert på strømkurver som varsler en operatør ved detektering av mulige feil. Operatøren burde kunne hente ut fullstendig historikk på strømkurven, inkludert registrerte feil på denne. Med muligheten til å kombinere dette med maskinlæring vil systemet analysere feilene kontinuerlig for å kunne gi bedre forslag og analyser videre. Et forslag til dette er å kunne knytte strømkurver opp mot feil registrert i Banedata.

Både forslag til feil og kurven burde være tilgjengelig for vedlikeholdspersonellet som utbedrer feilene, ikke bare forslag til feilen. Dette er for å bruke systemet som et hjelpemiddel for vedlikeholdspersonell til å utbedre feil så raskt som mulig. Det burde videre ikke genereres arbeidsordre direkte på bakgrunn av en slik automatisk analyse, men forslag til dette burde genereres og deretter vurderes av en fagspesialist før den sendes ut for utbedring. Hvis ikke vil det være fare for at vedlikeholdspersonellet mister tilliten til systemet.

6.2.3 Kombinasjon av tilstandsovervåkning og andre datakilder

Bruk av analyseverktøy til å predikere feil vil øke nytteverdien av tilstandsovervåkingen, ved å i større grad ha mulighet til å gi en prediksjon feil fordi mer informasjon sammenstilles. Hovedgrunnlaget i et slikt system vil være tilstandsovervåkingen, men også andre databaser med forsinkelser, værddata og andre parametere kan kombineres med et slikt system. Ved å inkludere maskinlæring til systemet for å kombinere Banedata-elementer med strømkurver som oppstår på det aktuelle sporfeltet til samme tid. Dermed kunne lære og foreslå sammenhenger mellom ulike datakilder som kan indikere begynnende feil. Prediksjonene av feil på bakgrunn relevante databaser, hvor gitte kombinasjoner av data kan gi økt sannsynlighet for enkelte typer feil, dermed kunne dynamisk styre beredskap av vedlikeholdspersonell. Dette kan brukes ved å øke sannsynligheten til feilprediksjon, basert på tilstandsovervåkingssystemet.

Kapittel 7

Videre arbeid

Dette kapittelet inneholder forslag til elementer av denne rapporten kan forfølges videre for å utdype problemstillingen ytterligere, som på grunn av rapportens tidsbegrensninger ikke ble inkludert her.

Denne rapporten skulle opprinnelig analysere pilotsystemet på sporfelter som blir installert i Oslo- og Trondheimsområdet, siden rapporten var for tidlig ute til å kunne gjennomføre dette anbefales dette som videre arbeid. En spesifikk vurdering av pilotsystemet, og hvilke feil og analyser som kan gjennomføres på bakgrunn av de innsamlede dataene fra dette systemet. Basert på teorien fremlagt i denne rapporten, vil dette resultere i en mer konkret rapport.

I tillegg til hvordan ulike sporfeltjusteringer og støy påvirker sporfeltene, for å kunne gi målinger med forslag til hvordan spesifikke feiltyper gir utslag på strømkurven. I tillegg vil det være interessant å modellere støyen som påvirker sporfeltene, for å kunne si mer om støyen og hva som forårsaker den. Videre gjennomføre en grundig analyse av registrerte feil sammenlignet med målt sporfeltstrøm, med ulike tastefrekvenser. Dermed kunne få et eksperimentelt forslag til tastefrekvens og strømkurver med feilindikasjon.

Banedata inneholder informasjon om en registrert feil medfører driftsstans, altså ikke hvor mye nedetid feilen medfører. Derfor er det interessant å knytte feil opp mot forsinkelsestimer, men dette vil inkludere å sammenligne ulike datasett. For å se på hvilke feil som forårsaker flest forsinkelsestimer, ikke bare hvilke feil som forekommer mest hyppig som i denne rapporten.

Rotårsaksanalysen i denne rapporten er veldig generell, så man kan med fordel gi en analyse av mer spesifikke feilkategorier. Videre på dette kan klimaanalyse på månedsbasis brukes for å på mer spesifikke feilkategorier, siden noen av de mest belastede strekningene har veldig mange registrerte feil. Dette vil mer vanskelig å utføre tilsvarende for døgnverdier fordi de har veldig få registre feil, dermed vil

feilutvalget være for lite til analyse. Klimaanalysen er det ikke funnet tid til å vurdere effekten av kraftig vestavind på Jærbanen, som skal medføre mange sporfeltfeil. Men dette er et spesielt fenomen som bør vises mer oppmerksomhet.

Referanser

- [1] Jernbaneverket. *Vedlikeholdshåndbok*, 2011. Besøkt, mars 2016. URL: <http://www.jernbaneverket.no/globalassets/documents/sty-dokumenter/kompetansekrav-signalfag/601058-000.pdf>.
- [2] Statens jernbanetilsyn. Vurdering av pålitelighets- og sikkerhetsanalyser av sikringsanlegg, 2001. 2. Utgave. Besøkt april, 2016. URL: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/124949/103262_ocr_red.pdf.
- [3] Samferdselsdepartementet. Forskrift om togframføring på det nasjonale jernbanenettet (togframføringsforskriften), 2009. Besøkt, mai 2016. URL: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2008-02-29-240/KAPITTEL_1-2#KAPITTEL_1-2.
- [4] Jon Gulowsen og Helge Ryggvik. *Jernbanen i Norge 1944-2004*. Vigmostad og Bjørke, 2004. Del 2.
- [5] Thor Bjerke et al. *Banedata 2013*. Norsk Jernbaneklubb og Norsk Jernbanemuseum, 2013. Data om infrastruktur til jernbanene i Norge.
- [6] Jernbaneverket. Teknisk regelverk: Togdeteksjon. Besøkt januar 2016. URL: <https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon>.
- [7] Jernbaneverket. Slik fungerer jernbanen, 2012. Informasjonshefte.
- [8] Jernbaneverket Infrastruktur. Nasjonal signalplan 2015, 11 2015. Dokumentnummer: IUP-00-A-04278, besøkt april 2016. URL: <http://www.jernbaneverket.no/globalassets/documents/ertms/nasjonal-signalplan.pdf>.
- [9] Marvin Rausand og Arnljot Høyland. *System Reliability Theory*. Wiley, 2004. 2. Utgave.
- [10] Henning Johansen et al. *Arbeid på signalanlegg 1 - Signalmontørfaget*. Yrkesforlaget, 2011. 1. Utgave.
- [11] P.F. Weston et al. Conditional monitoring of audio frequency track circuits. *IET Conference Publications*, 2008. Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age, 2008. ICRE 2008.

- [12] F.R. Redeker. Poss: Railway condition monitoring developed by a maintainer. *IET Conference Publications*, 2011. Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011), 5th IET Conference.
- [13] Dr. Chris R. Bell. Experiences in failure prevention of track circuits. *IET Conference Publication*, 2014. Railway Condition Monitoring (RCM 2014), 6th IET Conference.
- [14] Jernbaneverket. Teknisk regelverk: Illustrasjon av sporfeltets virkemåte. Besøkt, januar 2016. URL: https://trv.jbv.no/w/images/6/69/JD550_07_fig003.png.
- [15] Jernbaneverket. Vedlegg a: Justeringsregler vekselstrømsporfelt 95/105 hz. Besøkt, april 2016. URL: <https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Bygging/Togdeteksjon/>.
- [16] Rolf Gillebo. *Teori(Læremateriell) i sporfeltforståelse*. Jernbaneverket, ukjent utgivelsesår. Upublisert bok.
- [17] Jernbaneverket. Vekselstrømsporfelt 10/50 khz. Besøkt, februar 2016. URL: https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Vekselstr\T1\omsporfelt_-_10/50_kHz.
- [18] Jernbaneverket. Likestrømsporfelt. Besøkt, februar 2016. URL: <https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Likestr\T1\omsporfelt>.
- [19] Jernbaneverket. Audiofrekvent sporfelt ti21. besøkt, januar 2016. URL: https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Audiofrekvent_sporfelt_-_TI21.
- [20] Jernbaneverket. Audiofrekvent sporfelt ftg s. Besøkt, januar 2016. URL: https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Audiofrekvent_sporfelt_\discretionary{-}{-}{-}_FTG_S.
- [21] James W. Nilsson og Susan A. Reidel. *Electric Circuits*. Prentice Hall - Pearson Education, 9. edition, 2011.
- [22] Jens G. Balchen et al. *Reguleringsteknikk*. Institutt for teknisk kybernetikk, NTNU, 2004. 5. Utgave.
- [23] Jernbaneverket. 95/105 hz - vekselstrøm. Besøkt, februar 2016. URL: https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Vekselstr\T1\omsporfelt_\discretionary{-}{-}{-}_95/105_Hz.
- [24] Jernbaneverket. Teknisk regelverk: Illustrasjon av sporfeltets tekniske oppbygging. Besøkt, januar 2016. URL: https://trv.jbv.no/w/images/5/55/JD550_07a_fig001.png.
- [25] Jernbaneverket. Akseltellere. Besøkt, mai 2016. URL: <https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon/Akselteller>.
- [26] Odd Arild Olsen. *Instrumenteringsteknikk*. Tapir akademisk forlag, 2005. 6. utgave.

- [27] John Proakis og Dimitris Manolakis. *Digital Signal Processing*. Pearson, 2014. 4. Utgave.
- [28] v/Njål Svingheim Jernbaneverket. Banesjefstrekninger, 2015. Besøkt, feb 2016. URL: http://www.jernbaneverket.no/Om-oss/Om_jernbaneverket/Infrastrukturdivisjonen/.
- [29] Metrologisk Institutt. Informasjon om metrologisk institutt. Besøkt, april 2016. URL: http://met.no/Om_oss/Om_Meteorologisk_institutt/.
- [30] Bjørn Andersen og Tom Fagerhaug. *Root Cause Analysis*. ASQ Quality Press, 2006. 2. Utgave.
- [31] Jernbaneverket. Jernbaneverkets kartvisning. Besøkt, mars 2016. URL: https://customapps2.geodataonline.no/Jernbaneverket_HTML5Viewer/Index.html?viewerConfigUri=https://customapps2.geodataonline.no/Geocortex/Essentials/JBV/REST/sites/Innsynslsning/viewers/HTML5/virtualdirectory/Resources/Config/Default/Desktop.json.js.

Register

- Akselteller, 3, 23
- AKV, 37, 81
- Aliasing, 27, 88
- ATC, 1, 2
- Avledning, 95

- Badekarkurven, 34
- Blunkbelegg, 52, 94
- Bremssespon, 94

- Cause-and-effect, 76
- Critical incident, 52, 72
- CTC, 1, 2

- Driftsfeil, 75, 90

- Elektrisk motstand, 21
- ERTMS, 3

- Farlige feil, 75
- Feilåpenbaring, 81
- Feilkarakteristikker, 90
- Filterimpedans, 19
- Filtrering, 26, 87
- Forriglinger, 2
- Fourierrekke, 27
- Fouriertransform, 88
 - Fast fourier transform(FFT), 88, 97
 - Frekvensspekter, 88
- Frekvensspekter, 27

- Hallgenerator, 25

- Isolert skinneskjøt, 19

- Klimapåvirkning, 62

- Linjeblokk, 3

- Nedbør, 62, 64
- Nedfolding, 27
- Nyquistfrekvensen, 30, 89

- Ohms lov, 85
- Overtastet, 27, 67

- Pareto, 74
- Paretodiagram, 57
- PF-intervall, 82
- Praktisk tastefrekvens, 30

- RAMS, 32
- RCM, 38
- Returstrøm, 15
- Rotårsaksanalyse, 51, 71

- Shannons tasteteorem, 29
- Sikkerhetsfeil, 75, 77, 90
- Sikringsanlegg, 3
- Spole, 19
- Sporfelt, 4
 - Audiofrekvent, 16
 - Dobbeltisolert, 12
 - Endematet, 13
 - Enkeltisolert, 12
 - Frekvens, 15
 - Likestrøm, 16
 - Midtmatet, 13
 - Vekselstrøm

10/50 kHz, 15

95/105 Hz, 14

Sporfeltrelé, 18

Tastefrekvens

Øvre grense, 89

Nedre grense, 88

Tasting, 26, 88

Temperatur, 62

Tilstandsovervåkning, 4, 39, 84

Sporveksler, 40, 84

Transformator, 21

UKV, 37, 81

Undertastet, 27, 67

Vedlikehold

Akutt korrektivt, 37

Aldersbasert, 35

Forebyggende, 36

Korrektivt, 37

Tidsbasert, 34

Tilstandsbasert, 35, 81

Utsatt korrektivt, 37

Vedlikeholdsmodeller, 32

Olav Kallerud, NTNU

Kapittel

Masteroppgave:

Oppgavetekst



Bakgrunn:

God posisjonering av tog danner grunnlaget for sikkerheten på jernbanen. For å posisjonere tog benyttes flere ulike generasjoner og systemer av togdeteksjonssystemer. Når det inntreffer feil ved ett av disse togdeteksjonssystemene vil togene stanses. Problemer med disse systemene vil ha stor innvirkning på forsinkelser og redusert regularitet og dermed kundenes opplevelse av jernbanen. Det stilles derfor store krav til at togdeteksjonssystemene er så driftssikre, pålitelige og feilfrie som mulig. Jernbaneløst har flere togdeteksjonssystemer i drift. De baserer seg på to ulike prinsipper. Sporfelt som overvåker kontinuerlig sporavsnittene og akseltellere som utfører en punktdeleksjon i hver ende av blokkstrekningene.

Jernbaneløst har bestemt at med innføringen av ERTMS så skal systemene som er basert på sporefelt avvikles og erstattes av akseltellere. Det er også besluttet at det ikke skal bygges ut akseltellersystemer før ERTMS er klar for utbygging på den gjeldende strekningen. Dette medfører at mange av eksisterende systemer gradvis og først i 2032 vil få en endelig avløsning.

Siden Jernbaneløst vil i lang tid framover ha mer tradisjonelle sporfelt i infrastrukturen, dog med ulike tekniske karakteristikk – så vil det legges vekt på overvåking og tiltak for å sørge for en så høy tilgjengelighet som mulig. Det er ved god overvåking mulig å oppdage tilløp til avvik før avviket blir togstoppende.

Beskrivelse av oppgave:

Oppgaven vil ta for seg togdeteksjonssystemer med fokus på sporfelt slik det benyttes i dag. Målet er å kartlegge rotårsaker til sporfeltfeil hvor det også vurderes hvordan geografi, klima, årstid etc. påvirker sporfeltene. Det skal vurderes metoder for tilstandsovervåking og kartlegge/sammenstille data man får fra overvåking og andre systemer som Banedata. Det skal vises hvordan tilgjengelig data kan bidra til at riktig tiltak blir gjort til riktig tid slik at togstoppende feil unngås. Underlag kan framskaffes ved å sammenligne feilrater og problemer med de ulike banestrekningene og systemene som er installert i dag.

Gevinster av tilstandsovervåking skal beskrives. Det er anskaffet et system for overvåking av sporveksler med pilotsystem for analyse av sporfelt. Dette blir satt i prøvedrift i løpet av våren 2016.

Målsetting og hensikt:

Målet med oppgaven er å konkludere med hvilken type tilstandsovervåking som bør velges for ulike typer sporfelt, installasjoner og banestrekninger, og hvilken gevinst man kan forvente. Som en del av oppgaven vil det vurderes om endringer i feilrettingsrutinene for togdeteksjonssystemene kan optimaliseres.

Deloppgaver og problemstillinger:

- Beskrive togdeteksjonssystemenes virkemåte og oppbygning.
- Vurdere systemene utfra oppetid og pålitelighet (basert på eksisterende data fra JBV)
- Analysere bakenforliggende årsaker på feil ved deteksjonssystemer med vekt på sporfelt.
- Se på muligheter for tilstandsovervåking av rotårsak på feil.
- Nytteverdi av sporfeltsovervåking
- Vurdere hensiktsmessige måter å tilstandsovervåke tradisjonelle sporfelt (95-105Hz)

Kapittel B

MATLAB-kode

B.1 MATLAB-kode - Aliasing

Koden genererer *figurene 2.12, 2.13, 2.14 og 2.15*, hver med sin respektive «T_f» i koden.

```
1 close all;
2 clear all;
3 minimum = -0.05;
4 maximum = 0.05;
5 w1 = 95;
6 %T_f = 100;
7 %T_f = 200;
8 %T_f = 500;
9 T_f = 1000;
10 T = 1/T_f;
11 fig= figure(1);
12 x = linspace(minimum,maximum,400);
13 x_s = sin(2*pi*w1*x);
14 plot(x,x_s,'-');
15 xlabel('tid');
16 ylabel('amplitude');
17 title(['Signalfrekvensfrekvens = ', num2str(w1), ' Hz', ', ',
        'Tastefrekvens = ', num2str(T_f), ' Hz'] )
18
19 nmin = ceil(minimum/T);
20 nmax = floor(maximum/T);
21
22 n = nmin:nmax;
23 samples = sin(2*pi*w1*n*T);
24 hold on;
```

```
25 plot(n*T,samples , '* ');
26
27 plot(n*T,samples , '—');
28
29 reconstructed = -sin(2*pi*(T_f-w1)*n*T);
30 plot(n*T,reconstructed , '—');
31 legend('Signal', 'Tastinger', 'Rekonstruert signal')%, '
      Location', 'northoutside')
32
33 hold off;
34
35 saveas(gcf, ['aliasing' num2str(T_f) ], 'epsc')
```

B.2 MATLAB-kode - Overharmoniske komponenter

Koden genererer *figur 2.16*

```

1  close all;
2  clear all;
3  outFileNames = 'overharmonic';
4  h = figure(1); clf;
5  f = 95;
6  Fs = 50000;
7  T = 1/Fs;
8  Lengde = 0.03;
9  t = 0:T:Lengde;
10 n = length(t);
11
12 x1 = sin(2*pi*f*t); %originalsignalet
13 x3 = (1/3)*sin(3*2*pi*f*t);
14 x4 = (1/4)*sin(4*2*pi*f*t);
15 x5 = (1/5)*sin(5*2*pi*f*t);
16
17 x = x1 + x3 + x4 + x5;
18 hold on;
19
20 xlabel('Radianer');
21
22 grid on;
23 plot(t,x1,'blue',t,x,['red' '—']);
24 %plot(xout,yout,'r.','markersize',18)
25
26 legend('$\sin\left(t\right)$(referansekurve)', '$\sin\left(t\right)+\sum_{k=3}^5\frac{1}{k}\cdot\sin\left(2\pi\cdot t\cdot k\right)$', 'Location','northoutside');

```

B.3 MATLAB-kode - Eksportering av figurer

Koden eksporterer en figur i MATLAB til et en .PDF-fil på vektorformat, som kan inkluderes i L^AT_EX via «figure»-muljøet, som andre figurer og bilder. Denne koden krever gratisprogrammet for vektorgrafikk, «Incscape». Koden krever MATLAB-filen: «plot2latex.m» som kan lastes ned fra Mathworks/MATLABs hjemmesider på <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52700-plot2latex>.

```
1 h.Units = 'centimeters'; % set figure position to cm
2 h.Position(2) = [h.Position(2) -9]; % set figure position
   before resize
3 h.Position([3:4]) = [13,12]; % resize figure
4 set(findall(h, '-property', 'FontSize'), 'FontSize', 10); %
   change font size
5 ChangeInterpreter(gcf, 'Latex');
6 Plot2LaTeX(h, outFileName);
```

Kapittel

Sporfeltfordeling

Tabell C.1: Sporfeltfordeling i Norge, hentet fra registrerte sporfelter i Banedata

Sporfelttype	Antall sporfelter	Prosentandel av total
AC 95/105 Hz	4586	78,19 %
Likestrøm	363	6,19 %
Andre	249	4,25 %
Audiofrekvent	667	11,37 %
- <i>FTGS</i>	(571)	(9,74) %
- <i>TI-21</i>	(96)	(1,64) %
Grand Total	5865	100,00 %

Kapittel D

Rotårsak tallgrunnlag

Tabell D.1: Tallgrunnlag for pareto diagram, «konsekvens»-kategorien i nytt feilkodesett, *Tabell: Olav Kallerud*

Row Labels	Count of Banesjef	Akkumulerte feil	Akkumulert i prosent
Sporfelt belagt	1530	1530	0,749
	294	1824	0,893
Annen konsekvens - beskrives i notatfeltet	109	1933	0,946
Ingen konsekvens	87	2020	0,989
Systemet for togdet. det. et besatt sporavs. som ikke besatt.	10	2030	0,994
Varselfeltet registrerer ikke at feltet er befart	3	2033	0,995
Veisikringsanlegget løser ikke ut	3	2036	0,997
(blank)	2	2038	0,998
Følgekonsekvens - beskrives i notatfeltet	2	2040	0,999
Varselfeltet registrerer feilaktig at feltet er befart	1	2041	0,999
Isolasjonsmotstand < 250 k?- med følgkons.	1	2042	1,000
Sporveksel kan ikke omlegges	1	2043	1,000
Grand Total	2043		

Tabell D.2: Tallgrunnlag for pareto diagram, gammelt feilkodesett, *Tabell: Olav Kallerud*

Row Labels	Antall av Banesjef	Akkumulerte feil	Akkumulert i prosent
815 Kortslutning	2185	2185	0,479
898 Andre feil	517	2702	0,592
899 Ingen feil funnet	500	3202	0,702
813 Ledningsbrudd	336	3538	0,776
801 Mekanisk brudd/sprekk	157	3695	0,810
814 Løs ledning	155	3850	0,844
817 Avbrent sikring	129	3979	0,872
812 Kontaktfeil	123	4102	0,899
803 Del løsnet	82	4184	0,917
802 Deformering/bøyet/knust	56	4240	0,929
892 Signal lar seg ikke stille	53	4293	0,941
816 Lav ballastmotstand	49	4342	0,952
891 Umotivert signalfall	42	4384	0,961
809 Slitt - ute av justering	40	4424	0,970
833 Sporfelt ikke belagt av tog	27	4451	0,976
819 Jordfeil	21	4472	0,980
811 Brann/oppbrent	19	4491	0,984
805 Slark i bolter	16	4507	0,988
804 Treg/sitter fast/skåret	12	4519	0,991
823 Strømbrudd	11	4530	0,993
808 Låst i unormal stilling	8	4538	0,995
824 Sporveksel/sporsperre ikke i kontroll	5	4543	0,996
931 Skinnevandring/skinnebrudd	4	4547	0,997
818 Avbrent lampe	3	4550	0,997
806 Friksjon løs/stram	2	4552	0,998
Tunge ute av posisjon i lengeretning	2	4554	0,998
Feil på skilt	2	4556	0,999
834 Feilaktig togvegutløsning	1	4557	0,999
(blank)	1	4558	0,999
Tungerulle fungerer ikke	1	4559	0,999
831 Feilaktig kjøresignal	1	4560	1,000
944 Andre arbeider	1	4561	1,000
Jordfeil	1	4562	1,000
Grand Total	4562		

Tabell D.3: Tallgrunnlag for paretdiagram, nytt feilkodesett, *Tabell: Olav Kallerud*

Row Labels	Count of Banesjef	Akkumulerte feil	Akkumulert i prosent
Utstysrfeil uten kode - beskrives i notatfeltet	536	536	0,262
Ingen feil funnet - beskrives i notatfeltet	409	945	0,463
Skinnerkjøt - isolasjonsfeil	338	1283	0,628
Ledning - brudd	148	1431	0,700
Sportilkopling - brudd	135	1566	0,767
Sporfelt - ute av justering	88	1654	0,810
Sportilkopling - isolasjonsfeil	79	1733	0,848
Ledning - isolasjonsfeil	77	1810	0,886
Tilførsel-/returkrets - sikring - brudd	46	1856	0,908
Klemlist, koplingspunkt - brudd	36	1892	0,926
Kabel - brudd	27	1919	0,939
Kabel - isolasjonsfeil	16	1935	0,947
Klemlist, koplingspunkt - isolasjonsfeil	15	1950	0,954
Tilførsel-/returkrets - transformator - isolasjonsfeil	11	1961	0,960
Kabelskjøt - isolasjonsfeil	10	1971	0,965
Årsak ukjent	9	1980	0,969
Tilførsel-/returkrets - transformator - brudd	6	1986	0,972
Tilførsel-/returkrets - motstand - brudd	6	1992	0,975
Overdragstransformator - isolasjonsfeil	6	1998	0,978
Driv/kontroll-linjaler/stenger - deformert	6	2004	0,981
Tilførsel-/returkrets - overspenningsvern - defekt	5	2009	0,983
Overdragstransformator - brudd	4	2013	0,985
(blank)	3	2016	0,987
Sikring - brudd	3	2019	0,988
10 KHz-generator - defekt	2	2021	0,989
898 Andre feil	2	2023	0,990
Kabelskjøt - brudd	2	2025	0,991
Skilletransformator ST-10 - defekt	1	2026	0,992
Deksel - Deformert/ Løsnet	1	2027	0,992
Skilletrafo - defekt	1	2028	0,993
Rele - Sporfelt - feilaktig ikke tiltrekt	1	2029	0,993
Kontrollstenger - deformert	1	2030	0,994
Overdragstransformator - sikring - brudd	1	2031	0,994
Tilførselkrets - ladeutstyr - defekt	1	2032	0,995
Driv-/kontrollkontakter - isolasjonsfeil	1	2033	0,995
Tilførselkrets - likeretter - brudd	1	2034	0,996
Trykk knapp - Kontaktfeil	1	2035	0,996
Tilførselkrets - transformator - isolasjonsfeil	1	2036	0,997
Annet kommunikasjonsutstyr - defekt	1	2037	0,997
Rele - Sporfelt - feilaktig ikke frafalt	1	2038	0,998
Strømtilførsel - brudd	1	2039	0,998
Avspøringsindikator - defekt	1	2040	0,999
Rele - andre - kontaktfeil	1	2041	0,999
Rele - DSI - kontaktfeil	1	2042	1,000
Rele - DSI - kontaktfeil	1	2043	1,000
Grand Total	2043		

Kapittel **E**

Tallgrunnlag for figurer

E.1 Værdata på månedsbasis

Informasjon om tabellene

- I tabellene representerer 0 og 1 i raden over AKV/UKV henholdsvis uten og med driftsfeil.
- Stnr angir unikt nummer på målestasjon gitt av Metrologisk institutt.
- Filene dataene er hentet fra , ubehandlede data fra Banedata og fra Metrologisk institutt ligger vedlagt oppgaven som egne filer.

Tabell E.1: Pivottabell og værdata for Blaker-Åbogen(Kongsvingerbanen)

	Count of Banesjef	Column Labels							
		0	0 Total	1	1 Total	Grand Total			
Feil	Row Labels	AKV	UKV	AKV					
	jan	5		5	9	14			
	feb	8		8	13	21			
	mar	8		8	13	21			
	apr	14		14	21	35			
	mai	13		13	18	31			
	jun	7		7	11	18			
	jul	8	1	9	20	29			
	aug	7		7	11	18			
	sep	2		2	9	11			
	okt	5		5	13	18			
	nov	4	1	5	12	17			
	des	6		6	6	12			
	>01.01.2016				2	2			
	Grand Total	87	2	89	158	158	247		
Målestasjon	4920	ÅRNES							
NedbÅ_r (RR)	Stnr	4920	4920	4920	4920	4920	4920		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	8,10	43,80	39,30	30,20	46,80	82,90	41,85	41,55
	feb	35,40	27,20	18,70	19,50	65,70	24,30	31,80	25,75
	mar	28,60	10,00	19,40	5,50	52,20	43,00	26,45	24,00
	apr	38,50	29,20	51,90	66,00	69,20	9,00	43,97	45,20
	mai	82,10	66,90	69,20	92,60	61,60	92,80	77,53	75,65
	jun	84,60	99,60	114,50	84,10	58,40	88,70	88,32	86,65
	jul	130,60	82,00	102,70	20,00	46,00	67,90	74,87	74,95
	aug	122,30	174,00	138,80	86,90	109,70	103,80	122,58	116,00
	sep	68,60	127,60	98,20	22,60	30,50	131,20	79,78	83,40
	okt	62,50	68,70	93,20	79,80	165,40	11,50	80,18	74,25
	nov	27,60	54,10	85,90	39,80	80,90	65,10	58,90	59,60
	des	69,40	57,50	83,80	35,90	46,20	48,80	48,80	57,50
Middeltemperatur (TAM)	Stnr	4920	4920	4920	4920	4920	4920		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	-12,00	-7,60	-4,90	-6,90	-3,80	-1,80	-6,17	-5,90
	feb	-10,20	-7,80	-4,60	-5,80	1,00	-1,00	-4,73	-5,20
	mar	-2,60	-1,40	4,20	-4,60	3,40	2,20	0,20	0,40
	apr	4,20	7,60	3,40	3,00	6,30	5,80	5,05	5,00
	mai	9,00	9,90	10,90	11,90	10,80	7,90	10,07	10,35
	jun	13,70	13,60	12,40	13,90	14,30	12,90	13,47	13,65
	jul	16,50	14,80	15,00	16,80	19,40	14,90	16,23	15,75
	aug	14,50	14,40	14,60	14,80	14,40	15,00	14,62	14,55
	sep	9,20	11,70	9,80	10,30	11,30	11,00	10,55	10,65
	okt	3,70	6,60	3,90	6,10	7,90	5,60	5,63	5,85
	nov	-5,10	3,30	2,20	1,00	3,00	2,20	1,10	2,20
	des	-13,70	-1,00	-6,80	1,20	-4,50	0,80	-4,00	-2,75

Tabell E.2: Pivottabell og værdata for Tangen-Moelv(Dovrebanen sør)

	Count of Banesjef	Column Labels							
		0		0 Total	1	1 Total	Grand Total		
	Row Labels	AKV	UKV		AKV				
	jan	15		15	6	6	21		
	feb	9		9	8	8	17		
	mar	10		10	16	16	26		
	apr	17		17	11	11	28		
	mai	12	1	13	11	11	24		
	jun	13		13	14	14	27		
	jul	14		14	16	16	30		
	aug	16		16	16	16	32		
	sep	15		15	7	7	22		
	okt	6		6	12	12	18		
	nov	3		3	11	11	14		
	des	10		10	9	9	19		
	Grand Total	140	1	141	137	137	278		
Målestasjon	12320	HAMAR - STAVSBERG							
NedbÅ_r (RR)	Stnr	12320	12320	12320	12320	12320	12320		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	14,60	45,30	38,30	25,50	31,50	52,40	34,60	34,90
	feb	25,40	39,20	13,00	20,00	47,40	11,30	26,05	22,70
	mar	19,50	6,60	5,10	3,90	35,80	26,80	16,28	13,05
	apr	25,30	27,10	37,60	18,60	28,30	9,20	24,35	26,20
	mai	28,70	54,50	41,60	120,10	49,30	102,80	66,17	51,90
	jun	85,40	107,50	36,10	98,60	32,00	54,70	69,05	70,05
	jul	98,70	54,90	100,10	7,00	96,50	103,00	76,70	97,60
	aug	123,20	161,90	115,90	54,80	77,40	81,90	102,52	98,90
	sep	86,80	116,50	46,20	31,70	38,30	103,90	70,57	66,50
	okt	32,50	41,80	46,80	40,70	101,60	4,10	44,58	41,25
	nov	6,90	12,30	62,90	27,10	58,40	41,70	34,88	34,40
	des	14,50	30,30	43,00	55,00	18,60	33,90	32,55	32,10
Middeltemperatur (TAM)	Stnr	12320	12320	12320	12320	12320	12320		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	-11,90	-6,60	-5,60	-8,90	-4,80	-2,90	-6,78	-6,10
	feb	-10,70	-7,60	-4,80	-6,60	0,20	-1,40	-5,15	-5,70
	mar	-2,10	-2,00	3,50	-5,10	3,00	1,70	-0,17	-0,15
	apr	3,90	8,30	3,20	3,00	5,90	5,60	4,98	4,75
	mai	9,10	9,90	10,30	11,90	10,50	7,60	9,88	10,10
	jun	13,90	15,00	12,50	13,70	14,20	12,70	13,67	13,80
	jul	16,60	16,50	14,90	17,10	19,60	15,00	16,62	16,55
	aug	14,80	14,70	14,30	15,00	14,60	15,30	14,78	14,75
	sep	9,40	11,40	9,70	10,80	11,30	11,20	10,63	11,00
	okt	4,00	5,90	3,60	5,50	7,20	5,50	5,28	5,50
	nov	-4,60	2,40	1,60	0,50	2,00	1,00	0,48	1,30
	des	-12,80	-1,80	-7,40	0,00	-4,70	-0,40	-4,52	-3,25

Tabell E.3: Pivottabell og værdata for Støren-Trondheim S(Dovrebanen nord)

	Count of Banesjef	Column Labels							
		0		0 Total	1	1 Total	Grand Total		
	Row Labels	AKV	UKV		AKV				
	jan	14	1	15	10	10	25		
	feb	7	2	9	7	7	16		
	mar	19		19	10	10	29		
	apr	9	2	11	12	12	23		
	mai	11	3	14	7	7	21		
	jun	19		19	19	19	38		
	jul	13		13	14	14	27		
	aug	19	3	22	9	9	31		
	sep	16	1	17	10	10	27		
	okt	15	1	16	7	7	23		
	nov	13		13	5	5	18		
	des	7		7	13	13	20		
	Grand Total	162	13	175	123	123	298		
Målestasjon	67150	LEINSTRAND							
	68860	TRONDHEIM - VOLL							
NedbÅ_r (RR)	Stnr	68860	68860	68860	68860	68860	68860		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	38,20	65,20	74,30	42,30	11,00	42,20	45,53	42,25
	feb	31,40	39,70	130,40	44,40	7,60	84,40	56,32	42,05
	mar	112,60	131,30	219,60	91,80	68,50	47,30	111,85	102,20
	apr	41,20	58,70	69,60	37,10	57,10	82,50	57,70	57,90
	mai	47,30	50,90	54,20	40,80	51,00	57,30	50,25	50,95
	jun	82,00	81,00	77,20	100,10	74,30	88,00	83,77	81,50
	jul	73,60	68,60	81,60	78,10	45,50	72,00	69,90	72,80
	aug	28,70	115,40	56,50	85,80	134,00	97,10	86,25	91,45
	sep	76,50	125,20	101,90	58,30	83,10	61,10	84,35	79,80
	okt	80,80	94,90	96,90	88,20	57,30	59,60	79,62	84,50
	nov	37,90	59,10	31,90	116,50	10,40	63,30	53,18	48,50
	des	54,10	109,30	27,50	84,10	75,80	91,00	73,63	79,95
Midlere snÅ_dybde (SAM)	Stnr	67150	67150	67150	67150	67150	67150		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	16,00	33,00	7,00	2,00	0,00	2,00	10,00	4,50
	feb	21,00	9,00	8,00	13,00	0,00	1,00	8,67	8,50
	mar	24,00		0,00	7,00	3,00	0,00	5,67	3,00
	apr	1,00	1,00	5,00	1,00	0,00	0,00	1,33	1,00
	mai	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	jun	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	jul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	aug	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	sep	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	okt	1,00		3,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00
	nov	5,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,17	0,50
	des	28,00	5,00	4,00	6,00	6,00	1,00	8,33	5,50
Middeltemperatur (TAM)	Stnr	68860	68860	68860	68860	68860	68860		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	-7,00	-0,30	-1,90	-3,80	-2,30	0,10	-2,53	-2,10
	feb	-5,70	-2,50	-0,60	-2,60	3,70	1,70	-1,00	-1,55
	mar	-0,10	1,10	3,60	-2,70	3,40	3,50	1,47	2,25
	apr	4,50	7,00	2,80	3,60	5,70	4,30	4,65	4,40
	mai	7,40	9,70	7,90	11,90	9,50	7,50	8,98	8,70
	jun	10,40	13,30	11,00	12,50	12,00	9,60	11,47	11,50
	jul	15,30	14,80	13,30	14,20	19,10	12,80	14,92	14,50
	aug	14,50	14,40	13,30	13,80	15,00	16,40	14,57	14,45
	sep	9,90	11,70	8,70	11,00	11,50	11,50	10,72	11,25
	okt	6,30	7,20	4,00	5,90	7,40	7,30	6,35	6,75
	nov	-3,90	5,10	3,00	2,50	3,40	3,70	2,30	3,20
	des	-7,30	0,40	-5,40	2,50	-0,20	2,30	-1,28	0,10

Tabell E.4: Pivottabell og værdata for Egersund-Stavanger(Sørlandsbanen vest)

	Count of Banesjef	Column Labels							
			0 Total	1	1 Total	Grand Total			
	Row Labels	AKV	UKV	AKV	UKV				
	jan	9		9	11		11		20
	feb	3	3	6	10		10		16
	mar	1	6	7	10		10		17
	apr	1	1	2	7		7		9
	mai	4		4	13		13		17
	jun	5		5	5		5		10
	jul	2		2	5		5		7
	aug	3	1	4	6	1	7		11
	sep	2	3	5	11		11		16
	okt	4	2	6	18	1	19		25
	nov	2	1	3	9		9		12
	des	7	6	13	18		18		31
	>31.12.2015		1	1					1
	Grand Total	43	24	67	123	2	125		192
Målestasjon	44080	OBRESTAD FYR							
NedbÅ_r (RR)	Stnr	44080	44080	44080	44080	44080	44080		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	19,00	120,10	165,20	86,60	109,10	233,30	122,22	114,60
	feb	21,20	112,60	113,90	22,60	163,80	115,70	91,63	113,25
	mar	46,40	50,90	55,10	20,30	124,90	126,80	70,73	53,00
	apr	65,90	49,00	72,80	62,80	78,60	80,90	68,33	69,35
	mai	34,90	116,00	70,90	80,40	43,40	142,00	81,27	75,65
	jun	16,90	122,50	38,00	66,30	32,40	54,00	55,02	46,00
	jul	78,20	179,30	90,50	47,60	63,70	42,80	83,68	70,95
	aug	113,10	133,50	180,10	167,00	277,00	80,00	158,45	150,25
	sep	111,90	175,50	158,40	179,00	90,00	159,10	145,65	158,75
	okt	225,30	118,70	151,70	100,30	153,50	35,40	130,82	135,20
	nov	65,60	80,20	252,30	187,40	86,10	174,60	141,03	130,35
	des	48,80	202,10	107,30	238,70	169,70	183,00	158,27	176,35
Middeltemperatur (TAM)	Stnr	44080	44080	44080	44080	44080	44080		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	-3,20	2,00	3,10	0,30	2,30	4,50	1,50	2,15
	feb	-2,10	0,40	1,80	-0,10	4,40	3,50	1,32	1,10
	mar	2,90	2,50	5,10	-0,10	5,30	4,70	3,40	3,80
	apr	5,50	6,80	5,00	4,30	7,80	5,40	5,80	5,45
	mai	7,20	9,70	8,80	9,60	9,70	7,80	8,80	9,20
	jun	10,10	11,90	10,90	11,40	12,10	10,40	11,13	11,15
	jul	14,70	14,30	13,90	14,30	17,60	13,10	14,65	14,30
	aug	14,60	14,70	15,10	15,30	15,10	16,20	15,17	15,10
	sep	12,00	13,00	11,80	13,00	13,90	13,20	12,82	13,00
	okt	8,50	10,40	8,00	10,00	11,10	9,70	9,62	9,85
	nov	1,40	8,00	6,80	6,70	7,90	7,90	6,45	7,35
	des	-2,60	5,00	0,30	6,50	5,00	6,60	3,47	5,00
Middel av vindhastigheter (hovedobservasjoner) (FFM)	Stnr	44080	44080	44080	44080	44080	44080		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	5,60	6,60	8,60	5,90	10,20	9,50	7,73	7,60
	feb	4,60	8,10	7,90	5,20	9,90	7,90	7,27	7,90
	mar	6,40	6,20		5,10	7,00		6,18	6,30
	apr	6,50	5,80	6,40	6,80	6,20	7,00	6,45	6,45
	mai	6,60	6,80	6,80	7,10	6,20	7,20	6,78	6,80
	jun	6,70	5,90	6,80	6,20	6,20	7,00	6,47	6,45
	jul	6,70	6,40	5,50	5,90	4,70	6,70	5,98	6,15
	aug	5,70	6,50	6,40	6,50	7,20	6,70	6,50	6,50
	sep	6,90	8,00	7,80	6,00	5,40	6,60	6,78	6,75
	okt	7,50			6,80	8,10	6,60	7,25	7,15
	nov	4,80	8,00	7,10	7,80	7,40	7,90	7,17	7,60
	des	5,40	10,00	7,20	10,70	8,40	10,10	8,63	9,20
HÅ_yeste vindhastighet (hovedobservasjoner) (FFX)	Stnr	44080	44080	44080	44080	44080	44080		
	-Å...r-	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Snitt	Median
	jan	15,90	19,40	22,60	18,30	20,80	27,20	20,70	20,10
	feb	14,30	18,80	23,00	16,60	19,20	24,60	19,42	19,00
	mar	16,80	14,00		16,50	21,10		17,10	16,65
	apr	16,20	17,80	17,20	19,50	19,10	19,30	18,18	18,45
	mai	16,70	18,60	20,20	16,00	15,10	16,30	17,15	16,50
	jun	20,10	15,80	15,20	14,00	15,30	18,60	16,50	15,55
	jul	19,10	16,20	15,20	14,80	14,70	19,90	16,65	15,70
	aug	20,00	18,80	16,30	16,20	22,50	15,60	18,23	17,55
	sep	18,80	17,30	15,80	18,50	18,10	19,20	17,95	18,30
	okt	18,30			16,60	19,00	19,10	18,25	18,65
	nov	17,80	26,80	17,40	18,60	15,90	21,90	19,73	18,20
	des	20,80	26,40	22,10	32,60	19,10	22,30	23,88	22,20

E.2 Værdata på døgnbasis

Info om tabellene Kolonneneforkortelsene er følgende:

- Normal TAM - normaltemperatur[°C]
- TAM - temperatur[°C]
- RR - nedbør[mm]

Observer at det er bare rader med registrerte feil som har datoelementer i datokolonnen.

Tabell E.5: Tallgrunnlag for døgnverdier for sporfeltfeil, nedbør og temperatur på Kongsvingerbanen(målestasjonen mangler normaltemperatur). Målingene er hentet fra Skjedmo målestasjon(Str: 4260)

Dato	Dag	Feil	Normal TAM	TAM	RR
	1	0		15,5	0
	2	0		16,1	0
03.jun	3	1		16,3	0
	4	0		13,5	9,6
05.jun	5	2		14,1	10,6
	6	0		15,4	20,4
	7	0		14,6	0
	8	0		16,9	0
	9	0		18,1	0
	10	0		19,4	0
11.jun	11	1		18,7	0
12.jun	12	1		16,3	0
13.jun	13	1		14	0
	14	0		14,2	0
	15	0		15,7	0
	16	0		14,4	1
	17	0		13,4	0
17.jun	18	1		x	0
18.jun	19	5		x	0,2
	20	0		x	0,4
	21	0		10,5	0
	22	0		12,6	0
23.jun	23	1		12,3	1,2
	24	0		13	0
	25	0		14,6	0
	26	0		12	1
	27	0		11	20,2
	28	0		10,2	1,8
	29	0		11,4	0,2
30.jun	30	2		12,9	0

Tabell E.6: Tallgrunnlag for døgnverdier for sporfeltfeil, nedbør og temperatur for banesjefområdet Oslo. Målingene er hentet fra målestasjonene: Oslo - Blindern(Stnr: 18700) og Oslo - Blindern PLU(Stnr: 18701)

Dato	Dag	Feil	Normal TAM	TAM	RR
01.mar	1	2	-2,5	-1,9	0
	2	0	-2,3	-2,5	0
	3	0	-2,2	-1,6	0
04.mar	4	1	-2	-2,6	0
05.mar	5	3	-1,8	1,2	0
06.mar	6	2	-1,7	-2	0
07.mar	7	3	-1,5	0,3	0
	8	0	-1,4	0,4	0
	9	0	-1,2	0,5	5,3
10.mar	10	2	-1,1	-1,2	2,4
	11	0	-0,9	-2,5	2,1
12.mar	12	4	-0,8	-0,5	0
	13	0	-0,6	0,8	0
14.mar	14	2	-0,4	2,4	1,6
	15	0	-0,3	-0,1	0
	16	0	-0,1	-1,4	0
17.mar	17	2	0	-2,2	0
	18	0	0,1	-0,7	0
	19	0	0,3	0	1,4
20.mar	20	1	0,4	0	0
21.mar	21	6	0,6	5,8	0
22.mar	22	6	0,7	7,5	0
23.mar	23	1	0,8	6,7	0
	24	0	1	6,5	0
	25	0	1,1	0,8	0
26.mar	26	1	1,2	-1,2	0
	27	0	1,4	0,3	0
28.mar	28	2	1,5	2,7	0
29.mar	29	2	1,6	2,9	0,5
	30	0	1,8	1	0
31.mar	31	3	1,9	-0,1	0

Tabell E.7: Tallgrunnlag for døgnerverdier for sporfeltfeil, nedbør og temperatur på bane-sjefområdet Bergensbanen vest. Målingene er hentet fra Mjølfjell målestasjon (Stnr: 51800)

Dato	Dag	Feil	Normal TAM	TAM	RR
	1	0	8,9	8,5	0
	2	0	8,7	10	13,3
	3	0	8,6	10,1	4,4
	4	0	8,4	9,3	8,2
	5	0	8,3	5,3	27,5
	6	0	8,1	4,1	0,6
	7	0	8	5,7	7,7
	8	0	7,8	5,9	2,7
	9	0	7,7	9,1	5
	10	0	7,5	12,1	0,3
	11	0	7,4	7,1	12,8
	12	0	7,3	2,7	41,6
	13	0	7,1	4,1	5,2
14.sep	14	2	7	6,5	11,9
15.sep	15	1	6,9	6,7	17,1
16.sep	16	1	6,8	8	5
17.sep	17	1	6,7	4,6	16,2
18.sep	18	2	6,6	4,4	16,7
19.sep	19	2	6,5	2,6	3,6
20.sep	20	1	6,4	1,8	4,3
21.sep	21	1	6,3	3,4	3,4
	22	0	6,2	2,4	0
	23	0	6,1	3,2	0,1
24.sep	24	1	6,1	5,7	0
25.sep	25	1	6	5,1	0
	26	0	5,9	6,1	2,2
	27	0	5,8	4,9	0
28.sep	28	2	5,8	4,4	2,5
	29	0	5,7	4,8	6,6
30.sep	30	1	5,6	5,2	1,9

Kapittel **F**

Kartgrunnlag fra klimaanalysen

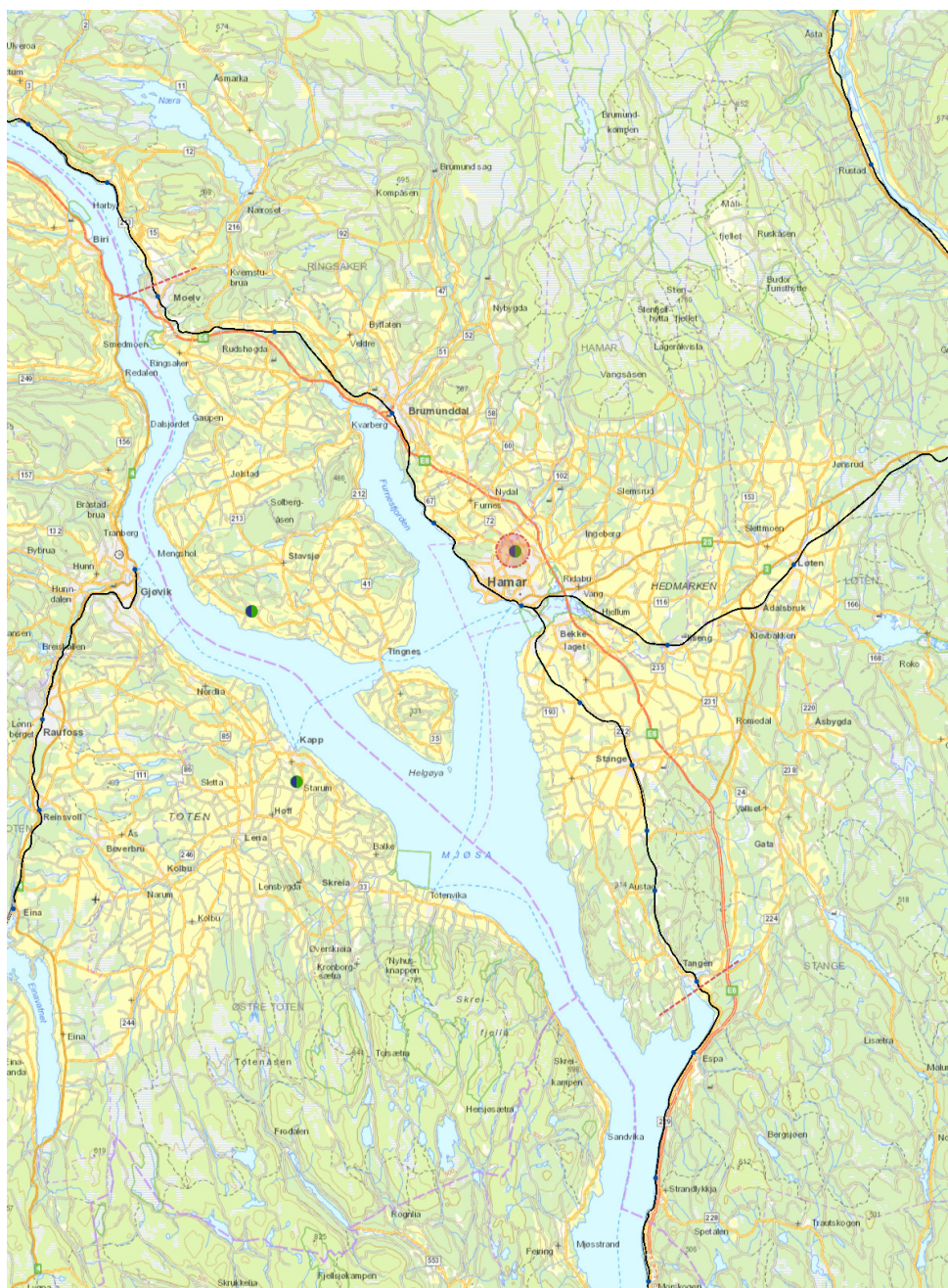
Dette vedlegget inneholder kartgrunnlag for valg av målestasjoner og strekninger på klimaanalysen med månedsverdier over flere år. Stiplede røde linjer markerer stasjonene som er i grensen av område, og stiplede røde sirkler markerer målestasjonen som er brukt. Feilene er begrenset til å omfatte siste inkluderte stasjon innefor den røde linjen i kartutsnittet, ikke selve linjen.



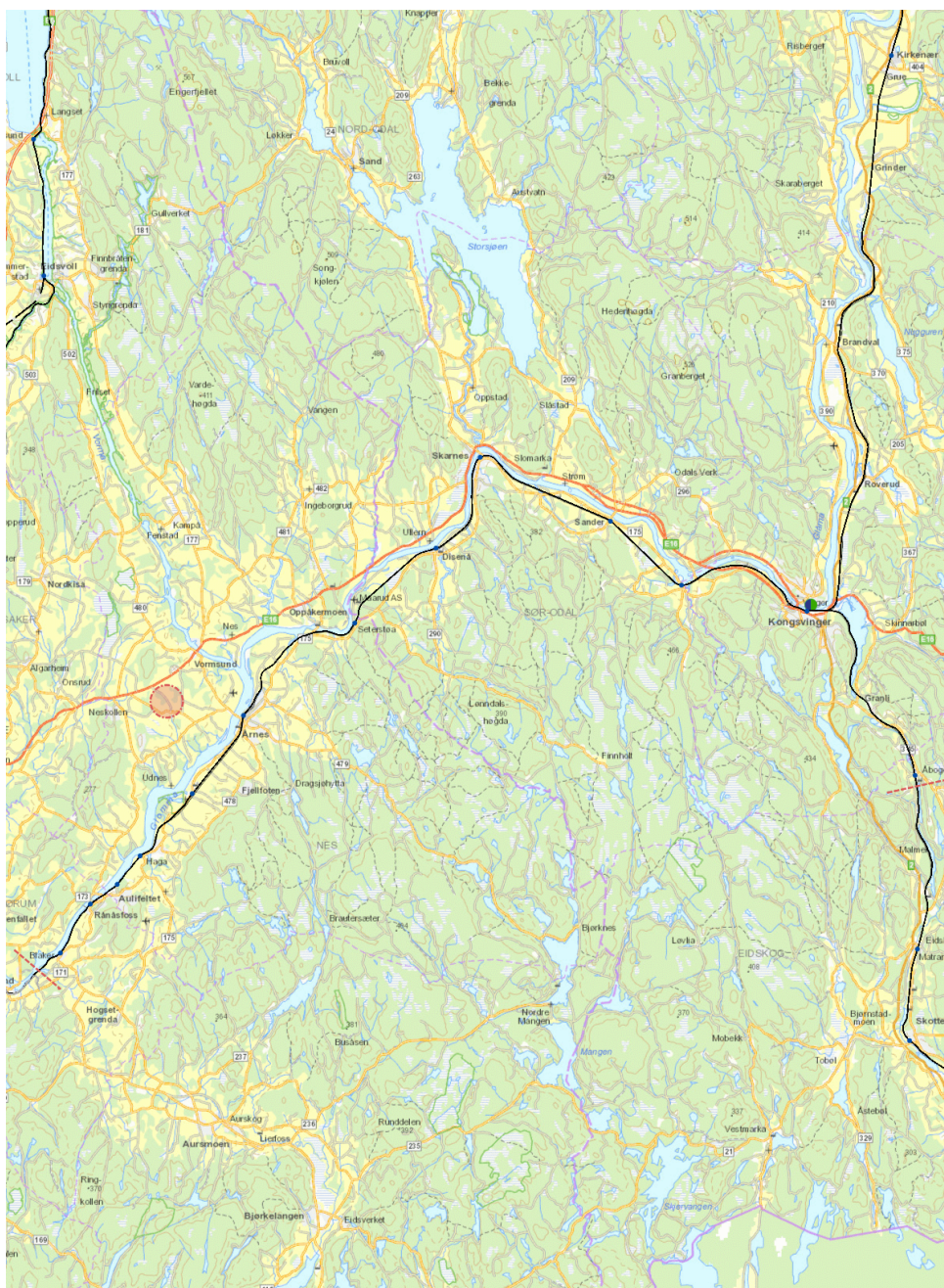
Figur F.1: Kart over strekningen Støren-Trondheim [31], redigering: Olav Kallerud



Figur F.2: Kart over strekningen Egersund-Stavanger [31], redigering: Olav Kallerud



Figur F.3: Kart over strekningen Tangen-Moelv [31], redigering: Olav Kallerud



Figur F.4: Kart over strekningen Blaker-Åbogen[31], redigering: Olav Kallerud