



KTH A-2014-1988
TRV 2014/99007

Effektsamband för underhåll av järnväg

Förstudie

Christer Stenström
Projektledare: Oskar Fröidh

KTH Järnvägsgruppen
2015-11-27

TRITA-TSC-RR 15-005
ISBN 978-91-87353-79-6

Kungliga tekniska högskolan
Inst. för transportvetenskap
100 44 STOCKHOLM

Förord

Effektsamband för underhåll av järnväg är ett område som det finns starka skäl att utveckla. De senaste årens punktlighets- och regularitetsproblem i tågtrafiken har riktat sökarljuset mot metoder att beräkna nyttorna av underhållsinsatser. I förlängningen möjliggör det en bedömning av hur stora resurser som behöver sättas in för banunderhåll vilket ökar kostnadseffektiviteten. Efter diskussioner med Trafikverket kom vi överens om att inleda en förstudie om effektsamband för banunderhåll. Avsikten var att undersöka tillgången till data och datakvalitet för en kommande huvudstudie.

Vi är glada att kunna engagera Christer Stenström från Järnvägtekniskt Centrum (JVTC) vid Luleå tekniska universitet för att kunna slutföra projektet med avsedd kvalitet. Christer har en färsk Tekn. dr.-examen inom ämnet och har skrivit föreliggande rapport inklusive bilagor. Vid KTH Järnvägsgruppen, institutionen för transportvetenskap, har Oskar Fröidh varit projektledare.

Vid Trafikverket har Clas-Göran Rydén varit ansvarig för projektet, med Anders Nilsson från statistikavdelningen som kontaktperson för trafikverksstatistik och Magnus Wahlborg som kontaktperson från KAJT.

Även följande personer på Trafikverket har bidragit intellektuellt och höjt kvaliteten i text och figurer: Anders Gustafsson, Peter Söderholm, Joel Åkesson, Inga-Lill Dalstål och Lars Wikberg.

Stockholm i november 2015

Oskar Fröidh

Sammanfattning

Syftet med förstudien är att beskriva hur en formel för effektsamband mellan underhåll och merförsening för järnvägsinfrastruktur kan byggas upp, samt inventera vilka data en sådan formel behöver och vilka av dessa data som finns tillgängliga i Trafikverkets databaser.

Ett effektsamband mellan förebyggande underhåll och merförsening har formulerats: När en inspektion utförs är sannolikheten att hitta ett potentiellt fel mellan 0 och 100 %. Det potentiella felet registreras som en inspektionsanmärkning. Risken att ett potentiellt fel inom en viss tid utvecklas till ett funktionsfel är även den mellan 0 och 100 %. Strikt sett är denna tid lika med angiven åtgärds tid, t.ex. veckoanmärkning, men i praktiken längre. Som ett exempel kan man anta 100 inspektioner, med 10 % sannolikhet att hitta potentiellt fel, 75 % risk för funktionsfel om inte åtgärd vidtas inom en snar framtid och 25 % risk för merförsenande funktionsfel. Detta ger $100 \cdot 0,1 \cdot 0,75 \cdot 0,25 = 1,875$ avstyrda merförsenande funktionsfel, och därmed $1,875 \cdot \text{medelmerförsening}$ i minskad merförsening.

Resultatet visar att avstyrd merförsening per inspektion för olika system inom de studerade 65 bandelarna ligger mellan 0-40 minuter per inspektion. Detta effektsamband beror dock till stor grad på definitionen av inspektion. Effektsambandet beror även på typen av inspektion, t.ex. säkerhets- och underhållsinspektioner. Slutligen beror effektsambandet även på kriterierna som används för tilldelning av prioritet avseende inspektionsanmärkningar.

En följdfråga till mål 1 i denna studie är vad effekten av förebyggande underhåll blir mätt i kronor. Kostnad-nytta-förhållandet (B/C) blir $\approx 3,3$. Resultaten beror dock på inkluderande/uteslutande av användarkostnader.

Trafikverket har ett omfattande system för insamling av data som sträcker sig långt tillbaka i tiden. Tillgänglig data är tillräcklig för att beräkna ovan nämnda effektsamband. Men både data och funktioner i databaserna Bessy och Ofelia behöver studeras vidare för att avgöra kvaliteten och betydelsen avseende effektsambanden beskrivna ovan.

Fortsatt arbete

Den beskrivna formeln för effektsambandet mellan förebyggande underhåll och minskad merförsening beror till stor del på: vad en registrerad besiktning i Bessy avser, inspektionsanmärkningars tilldelade prioritet och typ av besiktning. Vid fortsatt arbete kan man därför studera:

- Definitionen av registrerad inspektion i Bessy; t.ex. en inspektion kan i teorin motsvara en inspektionspunkt i ett system eller inspektion av ett helt system. Detta arbete bör förutom sakkunskap även inkludera Besiktningssplan (Bessy) och OFP-tåg (spår/räls, spårläge och kontaktledning).

- Kriterierna som används för att tilldela prioriteter till inspektionsanmärkningar, t.ex. vecko- och månadsanmärkning.
- Effekten av inspektionstyp, t.ex. säkerhets- och underhållsinspektion.

Data och funktioner i databaserna Bessy och Ofelia bör studeras strukturerat för att reda ut kvaliteten på data och öka förståelsen av statistiska resultat. Vid fortsatt arbete kan man därför studera:

- I vilken grad det går att koppla samman inspektioner, anmärkningar och funktionsfel mellan Bessy och Ofelia, t.ex. system, komponenter och typ av inspektion.
- Datakvalitén inom varje enskilt datafält, t.ex. bristfällig/saknad data.
- Tillgängliga datafält avseende effektiv arbetsorderprocess, t.ex. om alla datafälten behövs och om något datafält saknas.
- Terminologin, dvs. användningen av olika begrepp i olika datafält
- Kommentarsfält; dessa saknar språkanalys, dvs. språkteknologi (natural language processing).

Fortsatta studier bör även studera effekten av belastning på systemnivå, t.ex. spår och växlar, eller på komponentnivå, t.ex. skarvar och växelkryss.

Inställda tåg inkluderas inte i den uppställda modellen för effektsamband och bör därför studeras vidare, t.ex. med dylik modell som ekvation 1 men för inställda tåg. Reinvesteringar ingår inte heller i modellen, men dess effekt skulle kunna beräknas på dylikt vis genom att estimeras/mäta minskningen i andelen funktionsfel och eventuell inledningsvis minskning av det förebyggande underhållet.

Trafikverkets erfarenhet från inspektionsanmärkningar som inte åtgärdats inom stipulerad, är att en stor andel av dessa inte leder till funktionsfel. Det finns även funktionsfel som kan kopplas till icke åtgärdade inspektionsanmärkningar. Vidare finns det funktionsfel som inte har detekterats via inspektion. Detta anger en förbättringspotential avseende besiktningintervall och kriterier för bedömning av prioritet på inspektionsanmärkningar.

Terminologi

Nedanstående lista ger termer relaterade till denna studie, men eftersom beskrivningen av en term kan hänvisa till ytterligare termer, inkluderar listan även ett antal termer som inte använts bokstavligen i studien.

Notera att standarden för underhållsterminologi, SS-EN 13306:2010, är endast utgiven på engelska. Den föregående upphävda versionen, SS-EN 13306:2001, finns däremot på svenska och kan användas för vägledning. I vissa fall har inte den engelska definitionen ändrats mellan SS-EN 13306:2001 och SS-EN 13306:2010, och därmed kan den svenska översättningen i SS-EN 13306:2001 ses som giltig; detta markeras med asterisk (*), t.ex. se första termen nedan, dvs. avhjälpande underhåll.

Avhjälpande underhåll: Underhåll som genomförs efter det att funktionsfel upptäckts och med avsikt att få enheten i ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion. (SS-EN 13306:2010)*

Besiktning: *Se Inspektion.*

Besiktningssanmärkning: *Se Inspektionsanmärkning.*

Degraderat tillstånd (degraded state): State in which the ability to provide the required function is reduced, but within defined limits of acceptability. (SS-EN 13306:2010)

Degradering (degradation): Detrimental change in physical condition, with time, use or external cause. Note 1: Degradation may lead to a failure. Note 2: In a system context, degradation may also be caused by failures within the system. (See *degraded state*). (SS-EN 13306:2010)

Driftsäkerhet (availability): Ability to be in a state to perform as and when required, under given conditions, assuming that the necessary external resources are provided. Note 1: This ability depends on the combined aspects of the reliability, maintainability and recoverability of the item and the maintenance supportability. Note 2: Required external resources, other than maintenance resources, do not affect the availability of the item although the item may not be available from the user's viewpoint. Note 3: Availability may be quantified using appropriate measures or indicators and is then referred to as availability performance. (SS-EN 13306:2010)

Avseende Note 3, driftsäkerhet kvantifierad anges som tillgänglighet; se till exempel SS 4410505:2000 eller Nationalencyklopedin (2015).

Fel: Upphörandet av en enhets förmåga att utföra krävd funktion. Not 1: Efter fel har enheten funktionsfel, helt eller delvis. Not 2: Fel är en händelse som skiljer sig från funktionsfel som är ett tillstånd. (SS-EN 13306:2010)*

Engelsk definition är samma i SS-EN 13306:2001 och SS-EN 13306:2010, men den senare standarden inkluderar även en tredje not; Note 3: The concept as defined does not apply to items consisting of software only.

Funktion: Se *Krävd funktion*.

Funktionsfel: Tillstånd hos en enhet karakteriserat av oförmåga att utföra en krävd funktion, exkluderat en oförmåga som kan uppstå vid förebyggande underhåll eller annan planerad verksamhet eller brist på stödfunktioner. (SS-EN 13306:2010)*

Engelsk definition är samma i SS-EN 13306:2001 och SS-EN 13306:2010, men den senare standarden inkluderar även en not; Note: A fault usually results from a failure, but in some circumstances it may be a pre-existing fault.

Funktionssäkerhet: Förmåga hos en enhet att utföra krävd funktion under givna förhållanden under ett angivet tidsintervall. (SS-EN 13306:2010)*

Engelsk definition är samma i SS-EN 13306:2001 och SS-EN 13306:2010, men den senare standarden inkluderar även tre noter: Note 1: It is assumed that the item is in a state to perform as required at the beginning of the time interval. Note 2: Reliability may be quantified as a probability or performance indicators by using appropriate measures and is then referred to as reliability performance. Note 3: In some cases a given number of units of use can be considered instead of a given time interval (number of cycles, number of running hours, number of kilometres, etc.).

Avseende Note 2, funktionssäkerhet kvantifierad anges som felbenägenhet, funktions-sannolikhet eller felintensitet; se till exempel SS 4410505:2000 eller Nationalencyklopedin (2015).

Förbättring (improvement): Combination of all technical, administrative and managerial actions, intended to ameliorate the reliability and/or the maintainability and/or the safety of an item, without changing the original function. Note: An improvement may also be introduced to prevent misuse in operation and to avoid failures. (SS-EN 13306:2010)

Förebyggande underhåll: Underhåll som genomförs vid förutbestämda intervall eller enligt förutbestämda kriterier och i avsikt att minska sannolikheten för fel eller degradering av en enhets funktion. (SS-EN 13306:2010)*

Förslitningsfel (wear-out-failure): Failure whose probability of occurrence increases with the operating time or the number of operations of the item and the associated applied stresses. Note: Wear-out is a physical phenomenon which results in a loss, deformation or change of material. (SS-EN 13306:2010)

Inspektion (inspection): Examination for conformity by measuring, observing, or testing the relevant characteristics of an item. (SS-EN 13306:2010)

Inspektionsanmärkning: Anmärkning av mätbart degraderat tillstånd (potentiellt fel) som hittats vid besiktning/inspektion. Se även *Potentiellt fel*.

Krävd funktion (required function): Combination of functions, or a total combination of functions of an item which are considered necessary to provide a given service. Note 1: To provide a given service may also include asset value preservation. Note 2: The given service may be expressed or implied and may in some cases be below the original design specifications. (SS-EN 13306:2010)

Internationella elektrotekniska kommissionens (IEC) definition kompletterar SS-EN 13306: Function considered necessary to fulfil a given requirement. Note 1: The required function may be stated or implied (i.e. that the purchaser would be entitled to expect). Note 2: The required function, by implication, also covers what the item shall not do. Note 3: Essential internal functions of a system, which may not be visible to the user, are also required functions. (IEC 60050-192:2015)

IEC 60050-192:2015 gäller även som svensk standard, fastställd av Swedish Standards Institute (SIS).

Merförsening: Den ökning av förseningen gentemot tidtabell vid den första mät-punkten eller mellan två efterföljande mätpunkter (Trafikverket 2011).

Modifying (modification): Combination of all technical, administrative and managerial actions intended to change one or more functions of an item. Note 1: Modification is not a maintenance action, but has to do with changing the required function of an item to a new required function. The changes may have an influence on the dependability characteristics. Note 2: Modification may involve the maintenance organisation. Note 3: The change of an item where a different version is replacing the original item without changing the function or ameliorating the dependability of the item is called a replacement and is not a modification. (SS-EN 13306:2010)

P-F-intervall (potential failure-functional failure (P-F) interval): Interval between the point at which a potential failure becomes detectable and the point at which it degrades into a functional failure. (IEC 60300-3-11:2009)

P-F-intervall kallas även för ledtid till fel, och ett diagram som illustrerar P-F-intervallet brukar kallas för P-F-diagram, se t.ex. Figur 2.

Potentiellt fel (potential failure): Identifiable condition that indicates that a functional failure is either about to occur or is in the process of occurring (IEC 60300-3-11:2009). Se även *P-F-intervall*.

Risk: Frekvensen av olyckor och tillbud som vållar skada (orsakad av en riskkälla) och graden av allvar hos denna skada (EU-kommissionen 2013).

Säkerhet: Frihet från oacceptabel risk för skada. (SS-EN 50126:1999)

Säkerhetsbesiktning: Besiktning för att utgöra en kontroll av att det inte förekommer några fel, samt att uppmärksamma och bedöma successiva anläggningsförsämringar och därigenom kunna förebygga eller förhindra fel, som kan leda till: trafikolyckor eller tillbud i tågtrafiken; elsäkerhetsolyckor; arbetsskador; olyckor på tredje man; driftstörningar; och miljöolyckor. (Banverket 2005)

Tillgänglighet: Mått på driftsäkerhet. Mått och formler anges i detalj i SS 4410505:2000 och IEC 61703:2001, men anges även i SS-EN 50126:1999. Tre mått på tillgänglighet från SS 4410505:2000 ges nedan.

Tillgänglighet (vid fortfarighet, dvs. konstant tillstånd): Medelvärde av den momentana tillgängligheten vid fortfarighet under en given tid. $A = m_k / (m_k + m_h)$, där m_k betecknar medelklartiden (den del av krävd tid under vilken en enhet befinner sig i funktionsdugligt tillstånd) och m_h betecknar medelhindertiden (den tid under vilken en

enhet befinner sig i hindertillstånd, dvs. tillstånd hos en enhet karakteriserat av att den av något skäl är oförmögen att utföra en krävd funktion).

Medeltillgänglighet, $\bar{A}(t_1, t_2)$: Tidsmedelvärdet av den momentana tillgängligheten i ett angivet tidsintervall; $\bar{A}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt$.

Momentan tillgänglighet, $A(t)$: Sannolikheten att en enhet befinner sig i funktionsdugligt tillstånd under givna förhållanden vid en angiven tidpunkt under antagandet att erforderliga externa resurser tillhandahålls.

Tillståndsbaserat underhåll (condition based maintenance): Preventive maintenance which include a combination of condition monitoring and/or inspection and/or testing, analysis and the ensuing maintenance actions. (SS-EN 13306:2010)

Underhållsmässighet: Förmågan hos en enhet, som används enligt angivna betingelser, att vidmakthållas i, eller återställas till ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion, när underhållet utförs under angivna betingelser och underanvändning av fastställda förfaringssätt och resurser. (SS-EN 13306:2010)*

Underhållssäkerhet (maintenance supportability): ability of a maintenance organization to have the correct maintenance support at the necessary place to perform the required maintenance activity when required. (SS-EN 13306:2010)

Underhåll: Kombination av alla tekniska, administrativa och ledningens åtgärder under en enhets livstid avsedda att vidmakthålla den i, eller återställa den till, ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion. (SS-EN 13306:2010)*

Åldringsfel (ageing failure): Failure whose probability of occurrence increases with the passage of calendar time. (SS-EN 13306:2010)

Innehållsförteckning

Förord.....	3
Sammanfattning	5
Fortsatt arbete.....	5
Terminologi.....	7
1 Inledning	13
1.1 Bakgrund.....	13
1.2 Syfte	13
1.3 Mål	13
1.4 Omfattning och begränsningar	13
1.5 Disposition.....	14
2 Grundläggande begrepp och definitioner	15
2.1 Underhållsteknik.....	15
2.2 Driftsäkerhet	16
3 Metodik	19
3.1 Effektsamband	19
3.2 Kostnad-nytta-analys	20
4 Datainventering	23
4.1 Förebyggande underhåll.....	23
4.2 Avhjälpande underhåll	24
4.3 Merförseningar och trafikdata	26
4.4 Anläggningsdata	26
4.5 Kostnadsdata.....	26
5 Resultat och diskussion.....	29
5.1 Mål 1.....	29
5.2 Mål 2	32
5.3 Mål 3	33
6 Slutsatser och fortsatt arbete	35
6.1 Slutsatser	35
6.2 Fortsatt arbete.....	36
Referenser	39
A Förebyggande och avhjälpande underhåll – Kostnadsjämförelse och kostnad-nytta-analys ...	41
A.1 Inledning.....	41
A.2 Metodik.....	43
A.3 Fallstudie	47
A.4 Resultat	51
A.5 Diskussion.....	56
A.6 Slutsatser	58
Referenser	59
B Sammanfattande statistik.....	63
B.1 Bandelar och inspektionsklasser	63
B.2 Data om avhjälpande underhåll	66
B.3 Data om förebyggande underhåll	70
Referenser	71

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Ett gott underhåll av järnvägen är viktigt för att järnvägen ska svara mot resenärernas och godskundernas krav och förväntningar på pålitliga och punktliga resor och transporter. Eventuella brister i det förebyggande underhållet leder till fördyrande avhjälpande underhåll och störningar i tågtrafiken, vilket i sin tur påverkar kapaciteten.

Trafikverket arbetar kontinuerligt med att förbättra förståelsen av effektsamband i underhållet, med avseende på bästa möjliga kostnadseffektivitet. Denna förstudie ger underlag framförallt när det gäller datatillgång inför ett planerat forskningsprojekt om effektsamband för banunderhåll. I förstudien är utgångspunkten resultat som Trafikverket har tagit fram internt och resultat från externa projekt, framför allt Stenströms (2014) egen forskning.

1.2 Syfte

Syftet med förstudien är att beskriva hur en formel för effektsamband mellan underhåll och merförsening för järnvägsinfrastruktur kan byggas upp, samt inventera vilka data en sådan formel behöver och vilka av dessa data som finns tillgängliga i Trafikverkets databaser.

1.3 Mål

Mer konkret är målen följande:

1. Beskriva hur en formel för effektsamband kan byggas upp, dvs. korrelation mellan åtgärd och effekt. Åtgärd är förebyggande underhåll eller re-investering, och effekten är merförsening räknat i tågminuter.
2. Inventera vilka data en formel för effektsamband behöver och vilka av dessa data som finns tillgängliga i Trafikverkets databaser. Även förslag på alternativa tillvägagångssätt ska ges vid brister i tillgänglig data, samt hur man kan komma tillrätta med saknad data i framtiden.
3. Utvärdera hur man fastställer kausalitet, alltså att ett samband verkligen är ett samband och inte bara en slumpmässig korrelation.

1.4 Omfattning och begränsningar

Studien omfattar förebyggande och avhjälpande underhåll av järnvägsinfrastruktur. Insamlad data är begränsad till en infrastrukturförvaltare, Trafikverket, och är vidare begränsad till 65 bandelar av Sveriges ca 260 bandelar/bangårdar. Studien avser främst att beskriva en formel för effektsamband, inte utföra dataanalys, men vissa exempel på analys ges för att verifiera kraven på formelns förmåga att mäta effektsamband. Med åtanke att en formel enbart kan beskriva vissa effektsamband, beskrivs och diskuteras mer än en formel/metod inom studien.

Studien omfattar även inventering av tillgängliga data på Trafikverket. Denna inventering är begränsad till data som i hög grad är relaterad till formeln för

effektsamband. Detaljnivån i inventeringen av data avser främst tillgängliga datafält, t.ex. kolumner i arbetsordrar. Studie av datakvalitet avser till vilken grad datafält används och i vissa fall fördelning av datapunkter och utliggare. Vidare detaljerad analys av specifika datafält ingår inte i studien.

1.5 Disposition

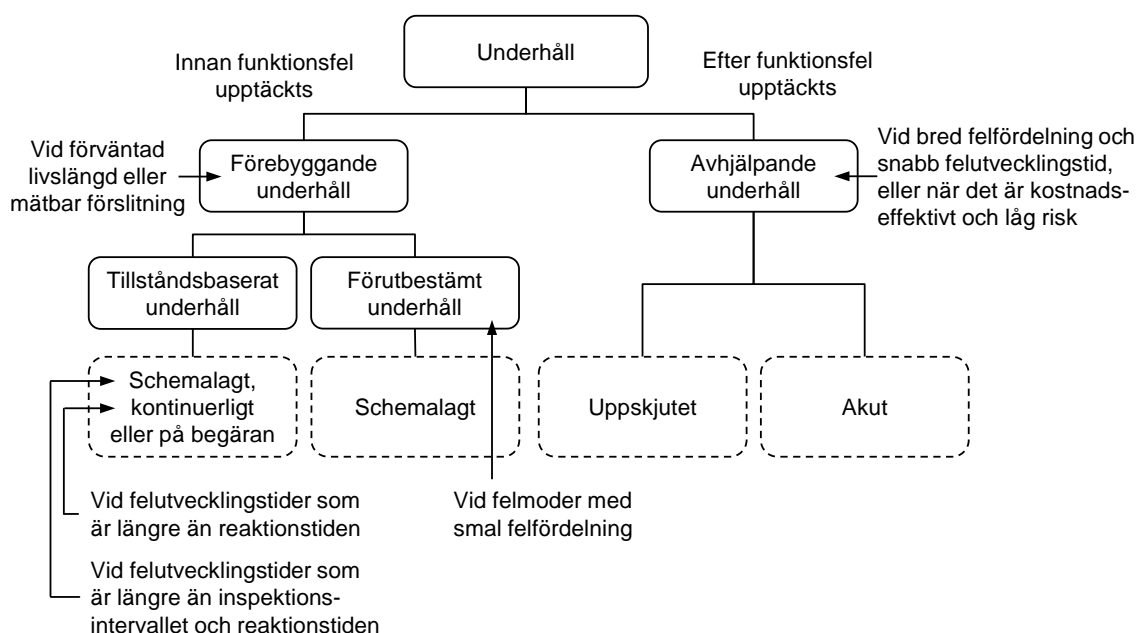
Kapitel 2 redogör kort forskningsämnets grundläggande begrepp och definitioner. Kapitel 3 beskriver metoderna för effektsamband inom underhåll av järnvägar. Kapitel 4 redogör tillgängliga data på Trafikverket. Kapitel 5 redovisar resultatet tillsammans med diskussion, följt av slutsatser i kapitel 6. Rapporten innehåller även två bilagor, "Förebyggande och avhjälpande underhåll" (bilaga A) respektive "Sammanfattande statistik" (bilaga B).

2 Grundläggande begrepp och definitioner

Detta kapitel går igenom forskningsämnets grundläggande begrepp och definitioner.

2.1 Underhållsteknik

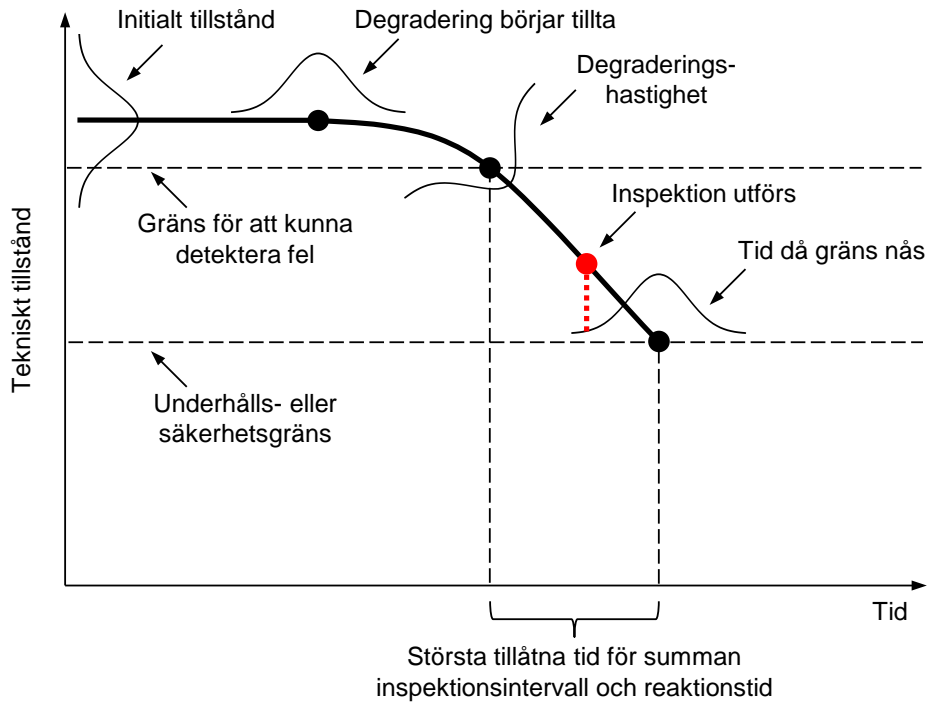
Underhåll beskrivs enligt SS-EN 13306:2010 (SIS 2010) som: kombinationen av alla tekniska, administrativa och ledningens åtgärder under en enhets livstid avsedda att vidmakthålla den i, eller återställa den till, ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion. Ordet anläggningsstatus, enligt projektets syfte (avsnitt 1.2), avser därmed det tekniska tillståndet för att kunna leverera förväntade funktioner. Underhåll delas upp i förebyggande och i avhjälpande underhåll i enlighet med figur 1. Felutvecklingstiden, även känt som ledtid till fel, är tiden från att en förslitning är mätbar till dess att ett fel inträffar. Reaktionstiden är tiden från identifiering av potentiellt fel (inspektionsanmärkning) tills felet är åtgärdat.



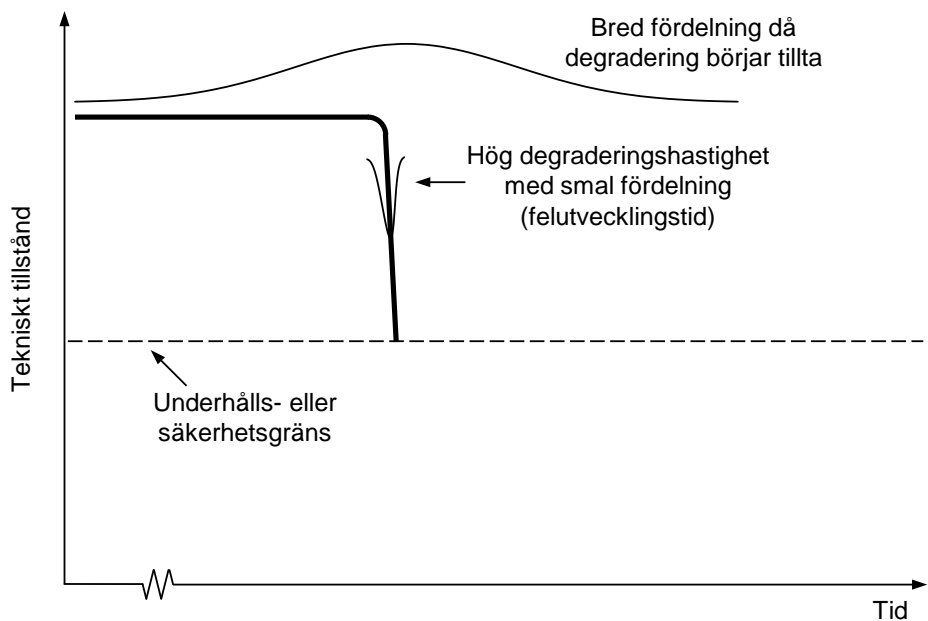
Figur 1: Underhåll enligt SS-EN 13306:2010 (SIS 2010).

Vid bred felfördelning, snabb felutvecklingstid och om avhjälpande underhåll är oacceptabelt så kvarstår omdesign av enheten ifråga. För vidare beskrivning av fördelningar, se figurer 2 och 3. I figur 2 är en punkt markerad med "Inspektion utförs". Denna punkt sammanfaller med felfördelningskurvan "Tid då gräns nås". Detta sammanfallande kan vara representativt för ett underhållsfel med åtanke till kostnadseffektivitet, men vid ett säkerhetsfel ska inspektion utföras innan felfördelningskurvan.

Notera att det finns en mismatch mellan figur 1 och Trafikverket avseende avhjälpande underhåll; förutom akuta fel inkluderar Trafikverket även veckoanmärkning (tabell 1) i avhjälpande underhåll.



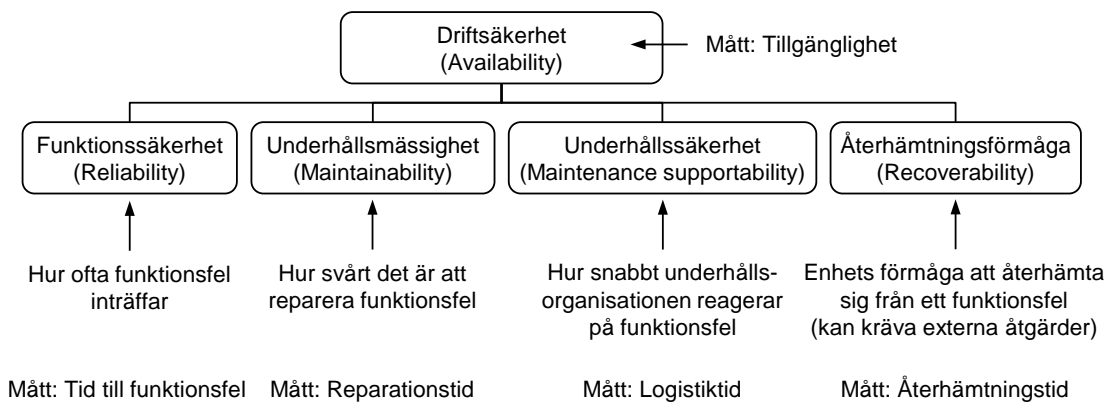
Figur 2: Illustration på hur en enhet degraderar. Termen degrading innefattar förslitning och åldring.



Figur 3: Illustration på enhet med bred felfördelning och snabb felutvecklingstid, t.ex. elektronik.

2.2 Driftsäkerhet

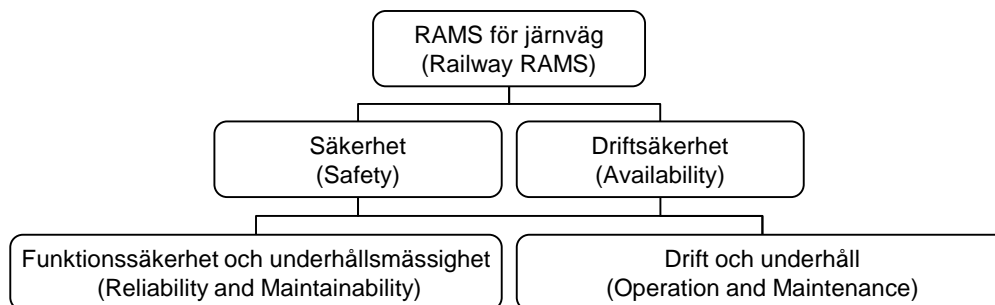
Driftsäkerhet är en central term inom drift och underhåll som visar på dess komplexitet i en kompakt form. Svensk standard SS-EN 13306:2010 (SIS 2010) beskriver driftsäkerhet i enlighet med figur 4.



Figur 4: Driftsäkerhet enligt SS-EN 13306:2010 (SIS 2010) med exempel på mått.

Den svenska standarden är även i linje med beskrivningar av Internationella elektrotekniska kommissionen (IEC 1990). Specifikt för järnvägar beskriver SS-EN 50126:1999 (SIS 1999) driftsäkerhet i enlighet med; driftsäkerhet är en funktion av funktionssäkerhet, underhållsmässighet, samt drift och underhåll (figur 5). Drift och underhåll motsvarar här underhållsmässighet. Därmed är SS-EN 13306 och SS-EN 50126 i linje med varandra. Akronymet RAMS i figur 5 står för Reliability, Availability Maintainability och Safety, dvs. funktionssäkerhet, driftsäkerhet, underhållsmässighet och säkerhet. Det finns dock varianter där S:et står för underhållssäkerhet (supportability/serviceability), hållbarhet (sustainability), överlevnadsförmågan (survivability) och brottsprevention (security).

Trafikverket använder sig av SS-EN 50126, se t.ex. EU-kommissionen (2012).

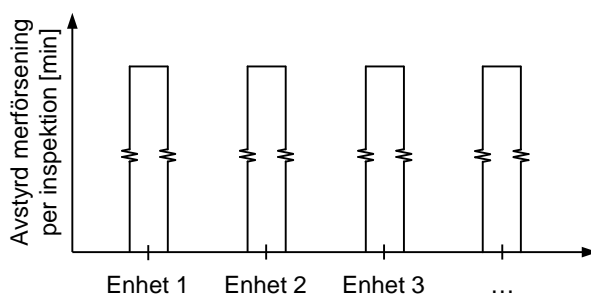


Figur 5: Driftsäkerhet för järnvägar enligt SS-EN 50126:1999 (SIS 1999).

3 Metodik

3.1 Effektsamband

Tillståndsbaserat underhåll utförs med målet att identifiera och åtgärda potentiella fel (inspektionsanmärkning) i syfte att förhindra att funktionsfel uppstår. Efter åtgärd av enhet förväntas systemet återgå till tidigare anläggningsstatus eller till idrifttagningsstatus, dvs. nytt. Felfrekvensen för ny eller reparerad enhet kan bedömas baserat på tillverkarens data, historisk arbetsorderdata eller expertomdöme. Följaktligen minskar antalet fel och merförseningar; se illustration i figur 6.



Figur 6: Illustration av effekt/nyttan av förebyggande underhåll. Enhet kan vara bandel, system, delsystem eller komponent.

När en inspektion utförs är sannolikheten att hitta ett potentiellt fel mellan 0 och 100 %. Risken att ett potentiellt fel inom en viss tid utvecklas till ett funktionsfel är även den mellan 0 och 100 %. Strikt sett är denna tid lika med angiven åtgärdsd, t.ex. två veckor, men i praktiken längre (se diskussion i avsnitt 5.1 i samband med figur 11). Exempelvis, anta 100 inspektioner, med 10 % sannolikhet för potentiellt fel, 75 % risk för funktionsfel och 25 % risk för merförsenande funktionsfel, ger $100 \cdot 0,1 \cdot 0,75 \cdot 0,25 = 1,875$ undvikna merförsenande funktionsfel, och därmed $1,875 \cdot \text{medelmerförsening}$ i avstyrd merförsening. Avstyrd merförsening, nyttan B (benefit), i minuter blir då:

$$B = \alpha\beta\gamma m \bar{t}_{DT} \quad (1)$$

där:

α = Sannolikhet för detektering av potentiellt fel (anmärkning),
 $\alpha \in [0,1]$

β = Sannolikhet att potentiellt fel utvecklas till funktionsfel som registreras som avhjälpande underhåll (Ofelia) inom x tidsenheter,
 $\beta \in [0,1]$

γ = Sannolikhet att funktionsfel ger merförsening, $\gamma \in [0,1]$

m = Antal inspektioner

\bar{t}_{DT} = Medelmerförsening [minuter] (DT = downtime)

Sannolikhet för detektering av potentiellt fel ges av:

$$\alpha = \frac{m_R}{m_I} \quad (2)$$

m_R = Totala antal potentiella fel

m_I = Totala antal inspektioner

Observera att sannolikheten för detektering är en term som används inom oförstörande provning (OFP). Inom ramen för inspektioner är visuell inspektion den vanligaste typen av OFP. I formeln ovan är α andelen inspekterade enheter som inte uppfyller funktionsnivå-kraven. $1 - \alpha$ är därmed andelen enheter som uppfyller funktionskraven. α har alltså inte samma betydelse som inom OFP, där $1 - \alpha$ står för andelen enheter med potentiella fel som passerade inspektion obemärkta.

Avseende β (sannolikheten att ett potentiellt fel utvecklas till ett funktionsfel), beror denna parameter på hur allvarligt det potentiella felet är och vilken tidsram som beaktas. Det finns dock inget kvantitativt sätt att beräkna. Det skulle vara möjligt att beräkna β kvantitativt om alla potentiella fel lämnades utan åtgärd och deras tillstånd istället övervakades. I sådant fall skulle det gå att se hur många potentiella fel som vid ett specifikt tillfälle har försämrats och övergått till funktionsfel, och på så sätt kunnat beräkna β . Detta är dock inte möjligt i praktiken. I praktiken tilldelas alla potentiella fel en prioritet beroende på allvarlighet, t.ex. vecka, månad eller år; en hög prioritet indikerar högre β . Tilldelade prioriteter kan sålunda användas som en indikator för att bestämma β .

Sannolikhet att funktionsfel ger merförsening (γ) bestäms av andelen merförsenande funktionsfel. För järnvägarna under Trafikverkets ansvar ligger denna siffra på $\approx 25\%$; se bilaga B.

För erforderliga data och resultat, se kapitel 4 och 5. Ekvation 1 utvecklas vidare till kostnad-nytta-analys i nästa avsnitt.

Medelmerförseningen i ekvation 1 baseras på den direkta merförseningen som en viss enhet eller ett visst fel kan orsaka. Ekvationen tar inte hänsyn till indirekta effekter av en degraderad enhet. Exempelvis dåligt spårläge ger merförsening genom tillfälliga hastighetsbegränsningar, men ger även ökad dynamisk påkänning i spår och rullande materiel. Men å andra sidan är underhållsgränser satta för att undvika accelererad degradation, t.ex. är spärgeometri-gränser satta för att bland annat undvika onödigt slitage på rullande materiel.

3.2 Kostnad-nytta-analys

Ekvation 1 gör det möjligt att räkna ut effekten av ett godtyckligt antal inspektioner av en enhet (bandel, system eller komponent). Varje typ av inspektion och typ av komponent har sin egen sannolikhet för detektering av potentiellt fel (α)

och sannolikhet att ett potentiellt fel utvecklas till ett funktionsfel (β). Effekten ges sedan i minskad eller avstyrad merförsening, som kan användas för att jämföra effektivitet av olika inspektioner. Vill man däremot veta hur många kronor man sparar i minskat avhjälpande underhåll för varje krona investerad i förebyggande underhåll krävs kostnad-nytta-analys. Effekten mätt i kronor är en given följdfråga till mål 1 i denna studie, vilket av den anledningen även valts att avhandlas i denna studie.

I kostnad-nytta-analyser, tilldelas ett monetärt värde till både kostnader och nyttor för att avgöra om ett projekt är värt att genomföra (Pearce, Atkinson et al. 2006). Lönsamhetsförhållandet (B/C - benefit/cost), eller utbytet av underhållsinvestering, för bedömning av värdet av förebyggande underhåll definieras i denna studie som:

$$B/C = \frac{B_{FU}}{C_{AU}} = \frac{\alpha\beta\bar{C}_F}{\bar{C}_I + \alpha\bar{C}_R} \quad (3)$$

där:

B_{FU} = Nyttan av förebyggande underhåll

C_{FU} = Kostnaden för förebyggande underhåll

\bar{C}_F = Medelkostnaden för funktionsfel (inklusive eller exklusive kostnader för merförsening)

\bar{C}_I = Medelkostnaden för inspektion

\bar{C}_R = Medelkostnaden för åtgärd av potentiellt fel

För erforderliga data och resultat, se kapitel 4 och 5. För fallstudie och beräkning av kostnad-nytta-förhållandet; se bilaga A.

4 Datainventering

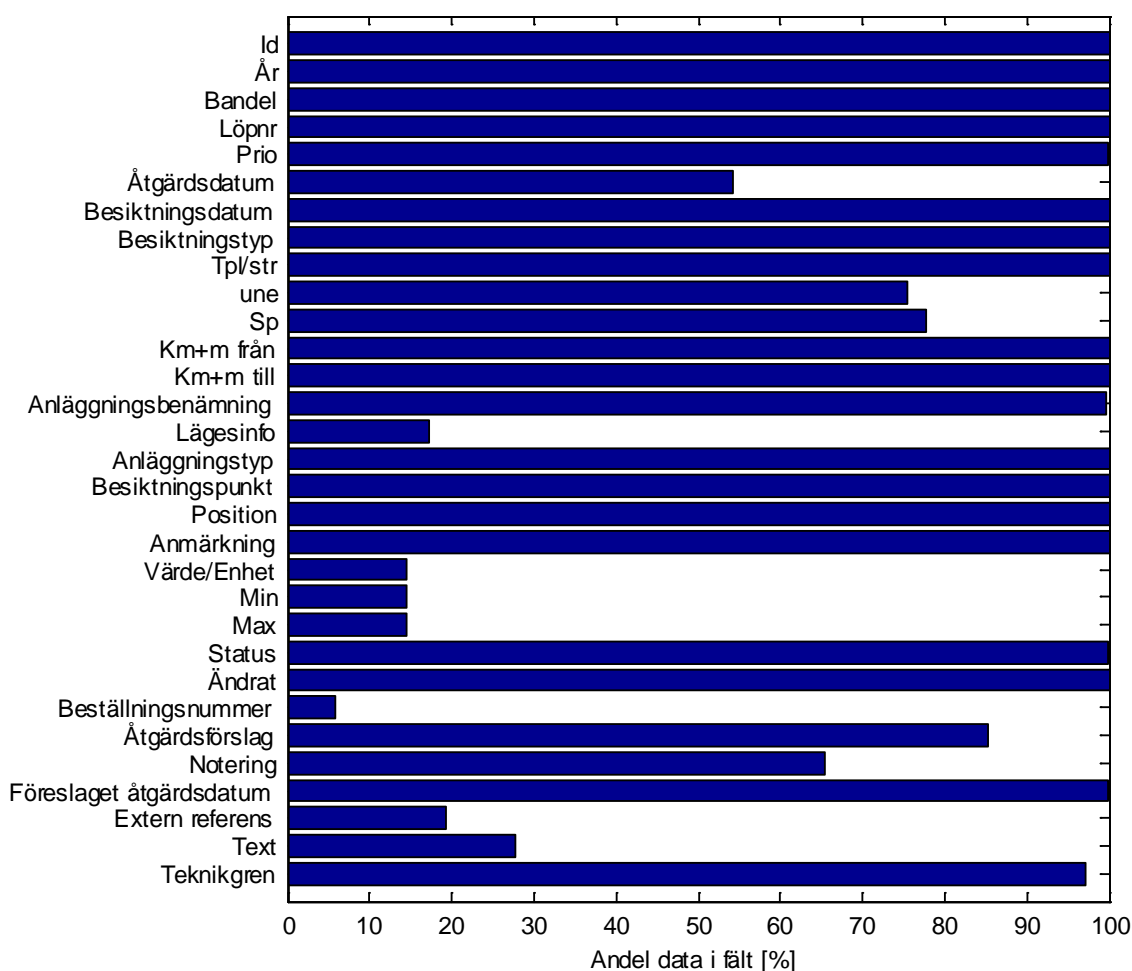
För datainventeringen har data samlats in från sju stråk; se figur A.1 och bilaga B "Sammanfattande statistik".

För effektsamband (ekvation 1) krävs följande data:

- Förebyggande underhåll
 - Antal inspektioner (m_I)
 - Antal inspektionsanmärkningar / potentiella fel (m_R)
 - Sannolikhet att potentiellt fel utvecklas till funktionsfel (β)
- Avhjälpande underhåll
- Merförsening (t_{DT})
- Anläggningsdata

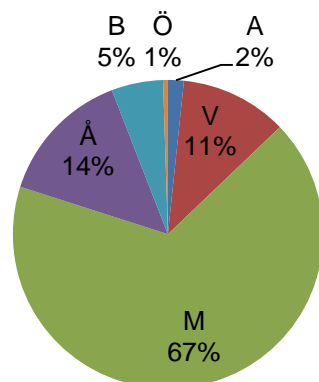
4.1 Förebyggande underhåll

Inspektioner (m_I) och inspektionsanmärkningar (m_R) är registrerade i databasen BESSY. Inspektionsanmärkningarna har en prioritet (figur 7: se "prio") tilldelad för när åtgärd ska ske senast, vilket är grunden till att bedöma sannolikheten att en inspektionsanmärkning utvecklas till ett funktionsfel (β).



Figur 7: Inspektionsanmärkningar (potentiella fel); datafält och exempel på andel data i fälten. Andel data är för 52 854 anmärkningar; se tabell B.1.

Datafält i inspektionsanmärkningar visas i figur 7. Prioritet anges i datafältet "Prio" och system/komponent-information ges i "Anläggningstyp", "Besiktningpunkt" och "Position". Det finns även ett fält som heter "Åtgärdsförslag", men ett dedikerat fält för vidtagen åtgärd finns inte. Fördelningen av prioritet visas i figur 8 och förklaras vidare i tabell 1. Prioritet skiljer sig lite mellan säkerhetsbesiktning, underhållsbesiktning och OFP; se BVF 807.2 (Banverket 2005), Entreprenadbeskrivning: handling 6.4.1 (Banverket 2010) och BVS 524.31 (Trafikverket 2010b).



Figur 8: Fördelning av prioritet (prio). Andel (%) är för 52 854 anmärkningar; se tabell B.1.

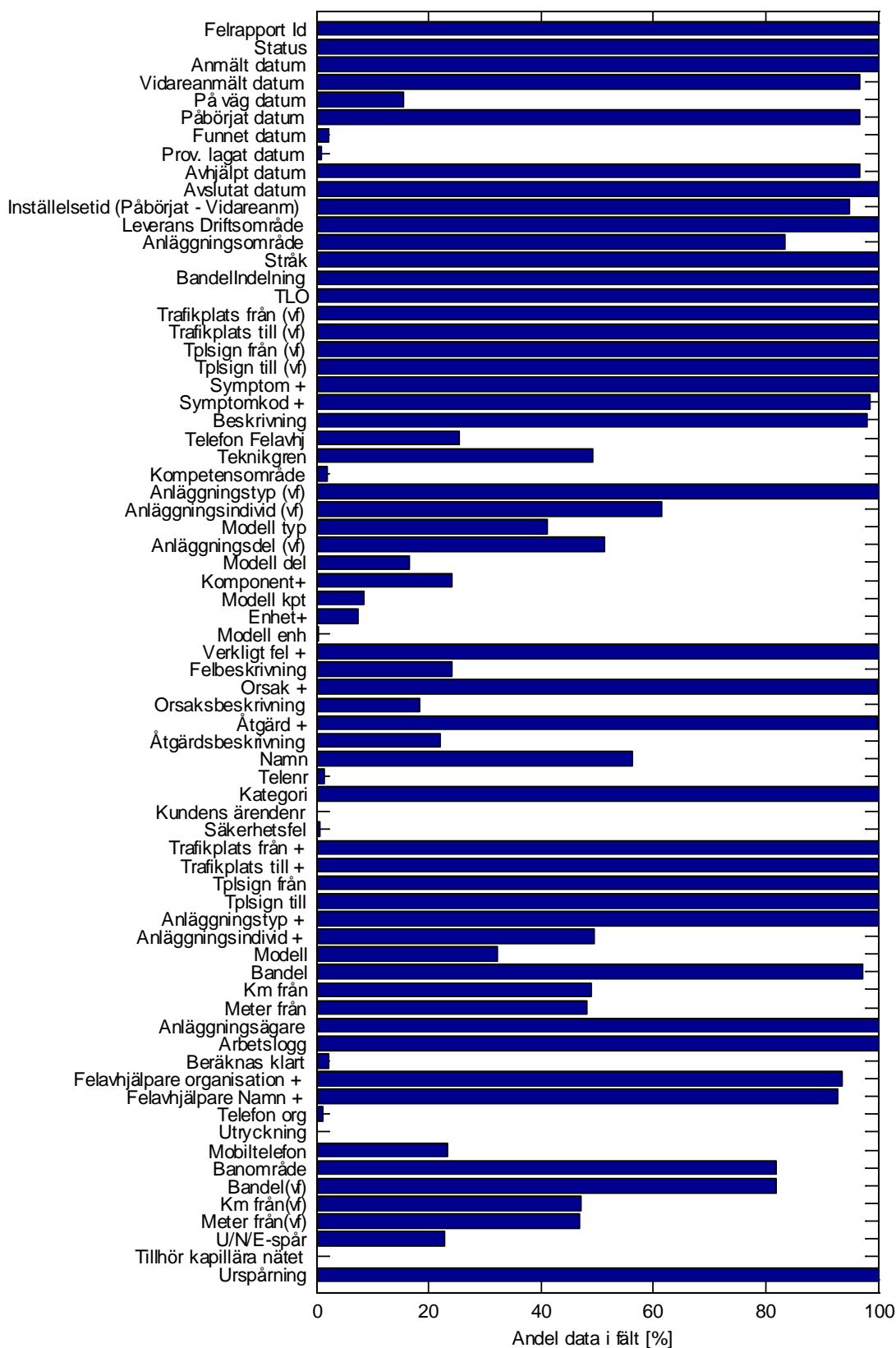
Tabell 1: Beskrivning av prioritet (prio) enligt BVF 807.2 (Banverket 2005) och Entreprenadbeskrivning: handling 6.4.1 (Banverket 2010).

A (akut)	= Anmärkning av sådan art att den medför en omedelbar risk för olycka eller tågstörning. För dessa anmärkningar ska nödvändiga åtgärder vidtas omedelbart (inklusive eventuell avstängning av spår) och besked om detta ofördröjligen lämnas till ansvarig enhet. Då driftledningen kontaktas sker också rapportering enligt BVF 808.20 (Trafikverket 2010a).
V	= Anmärkning av sådan art att den ska åtgärdas inom två veckor från besiktningdatum.
M	= Anmärkning av sådan art att den ska åtgärdas inom tre månader från besiktningdatum, alternativt ska Chefen för underhållsområdet följa upp anmärkningen på nödvändigt sätt.
Å	= Anmärkningen av sådan art att den bör åtgärdas inom tre år från besiktningstillfället om inte annat avtalas.
B	= Anmärkning av sådan art att den ska åtgärdas innan nästa besiktningstillfälle alternativt ska chefen för underhållsområdet följa upp anmärkningen på nödvändigt sätt.
Ö	= Anmärkning som bör åtgärdas vid lämpligt tillfälle, arbetsbank.

4.2 Avhjälpande underhåll

Avhjälpande underhåll, dvs. funktionsfel, registreras i Ofelia. Via ID-nummer knyts funktionsfel ihop med merförseningar. Se figur 9. I Ofelia anges administrativ tid och logistiktid, dvs. underhållssäkerhet, samt reparationstid, dvs. underhållsmässighet. Dessa tider registreras av underhållspersonal och drifttekniker på trafikledningscentraler och är därför mindre exakta än merförseningar

som mäts med hjälp av signalanläggningar. Se figur A.2 för distribution på återställningstiden. Från diskussionen avseende figur A.2 framgår det även att extraordinära funktionsfel (långa återställningstider) måste skiljas från de mer vardagliga funktionsfelen vid analys av data.



Figur 9: Funktionsfel; datafält och exempel på andel data i fälten. Andel data är för 24 816 fel; se tabell B.1.

Notera i figur 9 att datafältet ”komponent” har en ifyllnadsgrad på ca 25 %. Komponent är inte applicerbart i alla arbetsordrar, t.ex. snö och is i växel, men indikerar ändå att möjligheten att mäta effektsamband på komponentnivå är begränsad.

4.3 Merförseningar och trafikdata

Merförseningar registreras i databasen Här&Nu. Infrastrukturellerade merförseningar knyts till funktionsfel (Ofelia) via id-nummer. Merförseningsminuter är exakt data i jämförelse med logistik- och reparationstid för avhjälpande underhåll. Merförseningsminuter mäts med hjälp av signalanläggningar, medan logistik- och reparationstid för avhjälpande underhåll baseras på underhållspersonal och drifttekniker på trafikledningscentraler. Fortfarande måste man även här skilja på extraordinära funktionsfel (stora merförseningar) och de mer vardagliga funktionsfelen vid analys av data.

Det finns även tillgång till tågrörelser: trafikplatser, ankomsttid, avgångstid, antal vagnar, antalet hjulaxlar, bruttoton och dragfordons-id. I databasen Tra-inplan finns det även information om vilket spår varje tåg var planerat att använda. Belastningen kan uttryckas i antalet tåg, hjulaxlar, tonnage och medelhashtighet, men om man utifrån data kan avgöra vilka spår varje tåg verkligen använt är osäkert. Trafikverket lagrar även data om växelomläggningar. Denna studies mål omfattar inte effekten av belastning och studeras av den anledningen inte vidare.

4.4 Anläggningsdata

Anläggningsstrukturdata är lagrat i databasen BIS. Spår-kilometer kan även hittas i BVS 810.10 ”Stråk och bandelar samt TEN-tillhörighet”. Vissa kvalitetsbrister i angivna spår-kilometer har observerats av WSP (WSP 2011).

I BIS finns inläggningsår på komponenter, t.ex. växlar och räls. Det är möjligt att koppla samman växlar med inläggningsår, växelomläggningar och funktionsfel, och därmed möjligt att göra funktionssäkerhetsanalyser (Parahy 2011, Norrbin 2016). Liknande analys för räls går dock inte på grund av parallella spår och t.ex. Ofelia anger endast kilometer och meter till funktionsfel. Å andra sidan omfattar inte denna studies mål effekten av belastning.

4.5 Kostnadsdata

För kostnad-nytta-analys krävs dessutom följande data från bokföring eller expertomdöme:

- Kostnaden för funktionsfel (C_F)
 - Administrativ tid, logistiktid, reparationstid, merförsening och material
- Kostnaden för inspektion (C_I)
 - Administrativ tid, logistiktid och inspektionstid
- Kostnaden för åtgärd av potentiellt fel (C_R)
 - Administrativ tid, logistiktid, åtgärdstid, material

Eftersom Trafikverket upphandlar underhållet så registreras inte underhållskostnader avseende enskilda åtgärder i järnvägen. Avsikten med kostnad-nyttaanalys är att jämföra effekten av olika förebyggande underhållsåtgärder. Exakta kostnadsuppgifter är därför inte avgörande för en initial analys, utan kan specificeras i mer detalj när bästa/sämsta presterande enheter (bandelar, system och komponenter) har identifierats. Både för initiala analyser och detaljerade fall kan expertomdöme användas.

5 Resultat och diskussion

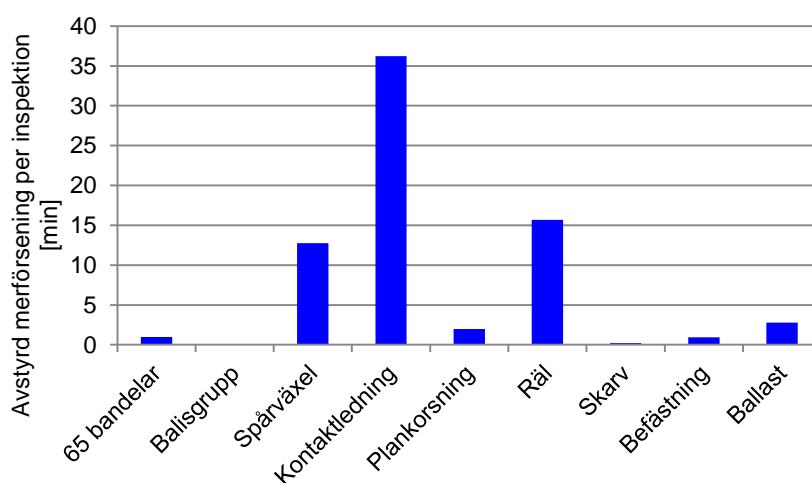
5.1 Mål 1

Resultat fås genom att applicera ekvation 1 på insamlad data i bilaga B; se tabell 2 och figur 10 för resultat på några utvalda system.

Tabell 2: Nyttan (B) i form av avstyrd merförsening per inspektion från förebyggande underhåll. Data enligt bilaga B. Sista kolumnen ger figur 10.

System	Inspektioner (m_I)	Åtgärdade anmärkningar (m_R) (vecka och månad)	$\alpha = m_r/m_i$	β	γ	Merförsening (\bar{t}_{DT}) Lognormal medel (98:e percentilen)	Nytta* (B) [min]
65 bandelar	352 679	26 314	0,075	0,75	0,247	70,9	0,98
Balisgrupp	24 204	97	0,004	0,75	0,101	18,8	0,01
Spårväxel	19 157	17 422	0,909	0,75	0,265	70,5	12,75
Kontaktledning	3 822	1 376	0,360	0,75	0,309	433,5	36,23
Plankorsning	2 670	1 099	0,412	0,75	0,115	55,9	1,99
Räl	11 788	1 330	0,113	0,75	0,495	374,4	15,68
Skarv	42 097	472	0,011	0,75	0,445	60,0	0,22
Befästning	9 867	819	0,083	0,75	0,200	76,5	0,95
Ballast	9 679	533	0,055	0,75	0,333	200,9	2,77

$$*B = \alpha\beta\gamma m \bar{t}_{DT} = [m = 1] = \alpha\beta\gamma \bar{t}_{DT}$$



Figur 10: Nyttan (B) i form av avstyrd merförsening per inspektion från förebyggande underhåll. Data enligt bilaga B.

Sannolikheten för detektering av anmärkning (α) baseras på antal åtgärdade vecko- och månadsanmärkningar. Tillgängliga alternativ att basera α på är antal anmärkningar; vecko- och månadsanmärkningar; åtgärdade anmärkningar; och åtgärdade vecko- och månadsanmärkningar. Det sista alternativet, vilket används i tabell 2 och figur 10, ger det lägsta värdet på α .

Från tabell 2 ser man att α varierar betydligt. En bidragande orsak kan vara att inspektioner består av både säkerhets- och underhållsinspektioner. Vissa inspektioner avseende ovanliga funktionsfel kan utföras i stort antal för att de ab-

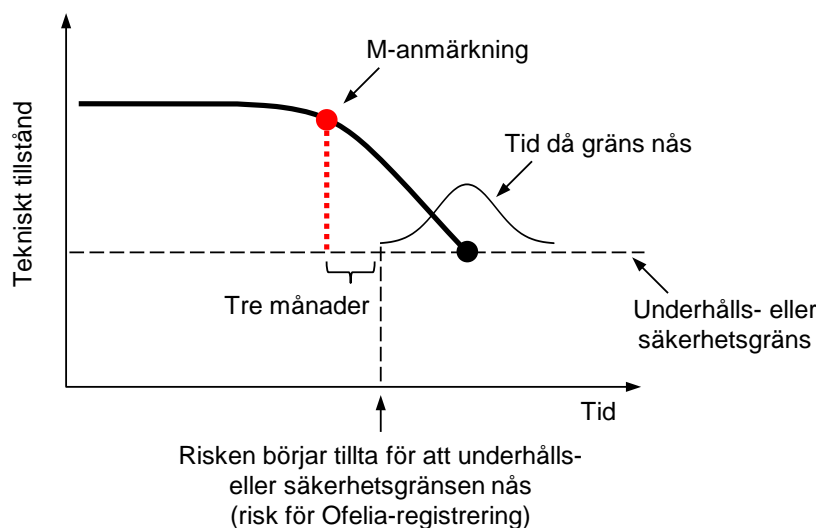
solut inte får inträffa, vilket resulterar i ett lågt α . En annan bidragande orsak är definitionen av inspektion; t.ex. en inspektion (rad i Bessy databas) kan i teorin motsvara en inspektionspunkt i ett system eller inspektion av ett helt system. Exempel på detta är okulär inspektion av en växel gentemot inspektion av räls med OFP-tåg (oförstörande provning). En inspektion av växel kan i teorin avse en inspektionspunkt, ett specifikt antal inspektionspunkter eller inspektion av hela växeln. Vid inspektion med OFP-tåg registreras enbart potentiella fel i Bessy, vilket i sig påverkar analys av data, men vid en registrering är frågan om vad som är en inspektion, t.ex. en kilometer. Ett annat dylikt exempel är inspektion av "går linjen", dvs. går längs efter ett spår. Av dessa anledningar kan det vara svårt att jämföra mellan olika system i tabell 2 och figur 10. Tittar man däremot på samma system så bör definitionen på inspektion vara desto mer likvärdig, t.ex. om man vill jämföra nyttan från inspektion av växlar mellan bandelar. Information om inspektionspunkter finns i Trafikverkets Besiktningsplan (Bessy) och bör tas med i framtida arbete. Det finns även möjlighet att bryta ned besiktningsdata i mer detalj, t.ex. med hjälp av datafälten *Besiktningstyp*, *Besiktningpunkt*, *Position* och *Anmärkning* i Bessy.

Vidare avseende OFP-tåg, verifieras alla anmärkningar manuellt, t.ex. med bärbart ultraljudsinstrument. Endast manuellt verifierade anmärkningar registreras i Bessy, dvs. falsklarm sorteras bort innan registrering i Bessy.

Eftersom insamlad data är endast för ett år, så är andelen åtgärdade vecko- och månadsanmärkningar registrerade i slutat på året lägre än tidigare på året. Denna effekt kompenseras av att andelen åtgärdade vecko- och månadsanmärkningar är högre i början på året.

Av alla åtgärdade inspektionsanmärkningar står åtgärdade vecko- och månadsanmärkningar för 92 % (figur B.6). Efter inspektionspersonalens bedömning och enligt underhållspolicy börjar risken för funktionsfel tillta för 92 % av inspektionsanmärkningarna efter två veckor (V-anm.) eller tre månader (M-anm.); se figur 11. Tiden då inspektionsanmärkningar övergår till funktionsfel i praktiken, och därmed registreras i Ofelia, är dock okänd. Trafikverkets erfarenhet är emellertid att en stor andel av inspektionsanmärkningar som inte åtgärdats inom stipulerad tid inte har lett till funktionsfel. Detta betyder att β måste bestämmas utifrån sakkunskap om systemen i järnvägen och dess felmoder. Detta kan göras med hjälp av underhållspersonal, och om möjligt i samverkan med revidering av riktlinjer för bedömning av prioriteter. I denna studie sattes β dock godtyckligt till 0,75, vilket från ovan resonemang kan anses mycket högt. β sattes dock till 0,75 med utgångspunkt att alla inspektionsanmärkningar som passerar sin angivna prioritet, t.ex. vecka eller månad, med automatik omdefinieras/omregistreras till ett funktionsfel. Detta ger visserligen ett β på 92 % eftersom β valdes att beräknas utifrån åtgärdade vecko- och månadsanmärkningar, men ansågs högt eftersom inspektionsanmärkningar som gått över tiden i praktiken inte förs in i Ofelia och avrundades därför nedåt till närmsta kvartil, dvs. 0,75. Notera även att av β vid bedömning utifrån sakkunskap får olika värden för olika system och felmoder, och möjligtvis ett värde nära noll i många fall

utifrån bedömningsgrunder och tidsintervall. Dock bör ett funktionsfel uppkomma med säkerhet om man låter tiden gå mot oändligheten.



Figur 11: Illustration på tankegången vid inspektionsanmärkning.

Vidare angående β , finns det funktionsfel i Ofelia som kan kopplas till icke åtgärdade inspektionsanmärkningar, vilket kan ge en indikation på felutvecklingstider, men även lämpliga åtgärdstider.

Det finns även funktionsfel som inte har detekterats via inspektion (stöds av att antalet A-anmärkningar är färre än funktionsfelen i Ofelia), vilket kan antyda att besiktningintervall bör förkortas. Därmed kan lämpligheten att besikta en gång per år och ha anmärkningar som A, V och M ifrågasättas. Detta innebär att själva tillämpningen av teorin kring tillståndsbaserat underhåll bör granskas och kvalitetssäkras.

Sannolikheten att ett funktionsfel ger merförsening (γ) i tabell 2 räknas ut genom att dividera antalet merförsenande funktionsfel med det totala antalet funktionsfel. Se exempel i tabell B.1; för de 65 bandelarna är $\gamma = 24,7\%$.

Den uppställda modellen för effektsamband tar inte hänsyn till inställda tåg; detta bör studeras vid fortsatt arbete, t.ex. dylik modell som ekvation 1 för inställda tåg.

Vidare ingår inte belastning, t.ex. tonnage, inte som en enskild parameter i modellen, men tas med implicit eftersom antal inspektioner (m_I) anges av besiktningssklass som minst baseras på hastighet och tonnage.

Reinvesteringar är konventionellt sett en delmängd av förebyggande underhåll; detta ingår inte i den föreslagna modellen, men dess effekt skulle kunna beräknas på dylikt vis genom att estimeras/mäta minskningen i andelen funktionsfel.

Vid större förebyggande underhåll stängs spår av. Drar underhållet över tid och merförsening uppstår, orsaksrapporteras detta i Ofelia som banarbete/transport. Detta ingår då i medelförsening (\bar{t}_{DT}) i modellen för effektsamband beroende på vilka data man inkluderar. I tabell 2 ingår dessa merförseningar i

raden "65 bandelar". Modellen för effektsamband är dock konstruerad för att mäta avstyrd merförening per inspektion genom avstyrda funktionsfel i infrastrukturen. Merförseningar på grund av spåravstängningar bör alltså exkluderas från ekvation 1. Från de 6131 merförsenande felen hittas 15 arbetsordrar genom att söka igenom celler efter ordet "banarbete".

Det bör även noteras att 35,1 % (2154/6131) av alla merförsenande fel är av typen felet försvann (figur B.2) och är därför svåra att koppla samman till inspektioner. Dessa 35,1 % ingår i medelmerförsening (\bar{t}_{DT}) i raden "65 bandelar" i tabell 2, men inte i de andra raderna eftersom systemet är känt. Problematiken med felet försvann i allmänhet går att läsa i Söderholm (2007).

5.1.1 Kostnad-nytta-analys

Kostnad-nytta-förhållandet kan beräknas för system, komponenter, bandelar eller ett järnvägsnät. I den här studien beräknas kostnad-nytta-förhållandet för 65 bandelar (bilaga B), dvs. 24 816 funktionsfel, 352 679 inspektioner och 28 704 åtgärdade potentiella fel. Från ekvation 3, som bryts ner i detalj i bilaga A, beräknas medelkostnaden för ett funktionsfel (\bar{C}_F) till 18 060 SEK, medelkostnaden för inspektion (\bar{C}_I) till 112 SEK och medelkostnaden för reparation av anmärkning (\bar{C}_R) till 2 730 SEK. Sannolikheten för detektering av potentiellt fel (α) ges i tabell 2; $\alpha = 0,08$. β sätts till 0,75 enligt diskussion ovan (tabell 2 och figur 10). Kostnad-nytta-förhållandet (B/C) blir följaktligen $\approx 3,3$. Sälunda sparade Trafikverket omkring tre kronor i undvikt avhjälpande underhåll för varje krona investerat i förebyggande underhåll under 2013. För diskussion, se bilaga A: "A.4.3 Känslighetssanalys" och "A.5 Diskussion".

Beskrivning av kostnad-nytta-analysen ges mer i detalj i bilaga A.

5.2 Mål 2

Erforderliga data för att beräkna effektsamband beror på vilken anläggningsnivå och för vilka aktiviteter analysen avser. Data som används i denna studie för att beräkna effektsamband (avsnitt 5.1 och bilaga A) är:

Inspektioner (Bessy): datafältet *Titel* som ger typ av inspektion, inspekterat system och komponent. Datafältet *Bandel* har även använts. För fortsatt studie är datafälten *Tpl/Str*, *km från*, *m från* och *Bes. klass* intressanta.

Inspektionsanmärkningar, dvs. potentiella fel (Bessy): fältet *Prio* för att avgöra prioritet; fältet *Bandel*; *Åtgärdsdatum*; och fältet *Anläggningstyp*. Se datafält i figur 7. För fortsatt studie av är fälten *Position* och *Anmärkning* intressanta. Även fältet *Åtgärdsförslag* är intressant för fortsatt studie, men det framgår dock inte om det var den föreslagna åtgärden som vidtogs.

Funktionsfel (Ofelia): datafälten med tidsangivelser för att bedöma underhållssäkerhet och underhållsmässighet; *BandelIndelning*; *Anläggnings-typ (vf)*; *Anläggningsdel (vf)*; och *Komponent+*. Se datafält i figur 9.

Merförsening (Här&Nu): datafälten som anger merförsening och id-nummer för koppling till Ofelia.

Anläggningsstruktur (BIS): Data avseende bandelar, spår-km och antal växlar.

Tidsangivelser för funktionsfel och merförseningar har fördelningar liknande lognormalfördelning, med mycket lång svans (utliggare). Utliggarna är extraordinära händelser, t.ex. nedriven kontaktledning eller urspärning, som skiljer sig från de mer vardagliga funktionsfelen. Om utliggare tas med i analys av data får dessa en mycket stor påverkan på resultatet. Därför tas några procent av de funktionsfelen bort vid bedömning av medel-merförsening, medel-logistiktid och medel-reparationstid, men bör dock analyseras separat. I tabell 2 är lognormal medel-merförseningen beräknad utifrån funktionsfel upp till 98:e percentilen avseende merförsening.

Merförseningar mäts med hjälp av signalanläggningar och är mer exakta än logistiktid och reparationstid, som registreras av underhållspersonal och drifttekniker. Vid beräkning av medel-logistiktid och medel-reparationstid så behöver man därför utesluta en större andel data, t.ex. 5 % eller använda sig av intervall; se figur A.2.

Det finns begränsningar i vilken grad det går att koppla samman inspektioner, inspektionsanmärkningar och funktionsfel (Bessy och Ofelia), t.ex. system, komponenter och typ av inspektion. Sedan finns även begränsningar i:

- Kvaliteten inom datafält, t.ex. bristfällig/saknad data
- Tillgängliga datafält avseende effektiv arbetsorderprocess
- Terminologin, dvs. vilka ord som används
- Kommentarsfält, vilka saknar språkanalysverktyg.

Både Bessy och Ofelia är omfattande databaser och kräver därför en större studie än denna för analys av dess arbetsorderprocesser, datakvalitet och sammankoppling. En sådan analys kan göras med hjälp av programmering. Matlab användes för analysen i bilaga A och B. För analys av kommentarsfält i arbetsordrar kan språkanalys användas (Stenström 2014).

5.3 Mål 3

Några vanliga verktyg för kausalitet, orsak-verkan, är: fiskbensdiagram, felträd, händelseträd, rotfelsanalys, 5 x varför och varför-därför-analys. Tankegångarna i dessa verktyg kan hjälpa vid analys med statistiska metoder, tillexempelvis vid studie av korrelation mellan två variabler.

Många studier är mer eller mindre kopplade till kausalitet. Det finns ett antal studier kopplade till Trafikverket och relaterade till kausalitet på en mer övergripande nivå. Söderholm och Bergquist (2015) använde multivariat statistik för att analysera rälsbrottdata från Trafikverket. I en relaterad studie på data från Trafikverket använde Lloyd's Register Consulting (2015) felträd- och händelse-trädsanalys för riskbedömning av urspärning på grund av rälsbrott.

Avseende ekvation 1 för att beskriva effektsamband, har sannolikheten för detektering av anmärkning (α) och sannolikheten att potentiella fel utvecklas till funktionsfel (β) stor påverkan på resultatet. Orsak-verkan sambandet kan antas vara tydligt; inspektioner ger anmärkningar, som i sin tur kan utvecklas till funktionsfel. Däremot bör storleken på sambanden studeras i mer detalj. Från tabell 2 ser man att α kan variera betydligt. De bakomliggande orsakerna, som diskuteras i avsnitt 5.1, kan vara typ av inspektion, t.ex. säkerhets- och underhållsinspektioner, samt definitionen av inspektion. β bedöms utifrån inspektionsanmärkningars tilldelade prioriteter och beror därför till stor del på kvaliteten på dessa prioriteringar. Dessa samband bör studeras vidare.

6 Slutsatser och fortsatt arbete

Syftet med förstudien är att beskriva hur en formel för effektsamband mellan underhåll och merförsening kan byggas upp, samt inventera vilka data en sådan formel behöver och vilka av dessa data som finns tillgängliga i Trafikverkets databaser. För att uppnå syftet har tre mål formulerats (avsnitt 1.3).

6.1 Slutsatser

Ett effektsamband mellan förebyggande underhåll och merförsening har formulerats (avsnitt 3.1). När en inspektion utförs är sannolikheten att hitta ett potentiellt fel (inspektionsanmärkning) mellan 0 och 100 %. Risken att ett potentiellt fel inom en viss tid utvecklas till ett funktionsfel är även den mellan 0 och 100 %. Strikt sett är denna tid lika med angiven åtgärds tid, t.ex. veckoanmärkning, men i praktiken längre. Exempelvis 100 inspektioner, med 10 % chans att hitta potentiellt fel, 75 % chans till funktionsfel om inte åtgärdad inom en snar framtid och 25 % chans till merförsenande funktionsfel, ger $100 \cdot 0,1 \cdot 0,75 \cdot 0,25 = 1,875$ avstyrda merförsenande funktionsfel, och därmed $1,875 \cdot \text{medelmerförsening}$ minuter i minskad merförsening.

Data samlades in från 65 bandelar (bilaga B). Resultatet visar att undvikt merförsening per inspektion för olika system inom de 65 bandelarna ligger mellan 0-40 minuter/inspektion (tabell 2 och figur 10). Detta effektsamband beror dock till stor grad på definitionen av inspektion. Man bör därför utreda vad registrerade inspektioner avser, t.ex. en registrerad inspektion i databasen Bessy kan i teorin avse en inspektionspunkt i ett system eller inspektion av ett helt system. Exempel på detta är okulär inspektion av en växel gentemot inspektion med OFP-tåg. Effektsambandet beror även på typen av inspektion, t.ex. säkerhets- och underhållsinspektioner. Slutligen beror effektsambandet även på kriterierna som används för tilldelning av prioritet avseende inspektionsanmärkingar. Se avsnitt 5.1 för vidare beskrivning

En följdfråga till mål 1 i denna studie är vad effekten av förebyggande underhåll blir mätt i kronor. Genom att applicera ekvation 3 på insamlade data visade sig kostnad-nytta-förhållandet (B/C) bli $\approx 3,3$. Sålunda sparade Trafikverket omkring tre kronor i undvikt avhjälpande underhåll för varje krona investerat i förebyggande underhåll under 2013 (avsnitt 5.1.1 och bilaga A). Resultaten beror dock på inkluderande/uteslutande av användarkostnader, förutom individuella organisationsparametrar.

Trafikverket har ett omfattande system för insamling av data som sträcker sig långt tillbaka i tiden. Tillgänglig data är tillräcklig för att beräkna effektsambanden ovan nämnda. Nödvändig data redovisas i avsnitt 5.2. Men både data och funktioner i databaserna Bessy och Ofelia behöver studeras vidare för att avgöra kvaliteten och betydelsen avseende effektsambandet beskrivet ovan.

I övrigt har det även observerats att:

- Det finns en mismatch mellan SS-EN 13306:2010 (SIS 2010) och Trafikverket avseende avhjälpande underhåll; förutom akuta fel inkluderar Trafikverket även vecko-anmärkning i avhjälpande underhåll.
- Vid inspektion med OFP-tåg registreras enbart potentiella fel i Bessy och inte att inspektioner har utförts, vilket påverkar effektsambandet formulerat i denna studie. Emellertid finns körplaner för OFP som skulle kunna inkluderas i modellen.

6.2 Fortsatt arbete

Den beskrivna formeln för effektsambandet mellan förebyggande underhåll och minskad merförsening, beror till stor del på: vad en registrerad besiktning i Bessy avser, inspektionsanmärkningars tilldelade prioritet och typ av besiktning. Vid fortsatt arbete kan man därför studera:

- Definitionen av registrerad inspektion i Bessy; t.ex. en inspektion kan i teorin motsvara en inspektionspunkt i ett system eller inspektion av ett helt system. Detta arbete bör förutom sakkunskap även inkludera Besiktningensplan (Bessy) och OFP-tåg (spår/räls, spårläge och kontakledning).
- Kriterierna som används för att tilldela prioriteter till inspektionsanmärkningar, t.ex. vecko- och månadsanmärkning
- Effekten av inspektionstyp, t.ex. säkerhets- och underhållsinspektion

Data och funktioner i databaserna Bessy och Ofelia bör studeras strukturerat för att reda ut kvaliteten på data och öka förståelsen av statistiska resultat. Vid fortsatt arbete kan man därför studera:

- I vilken grad det går att koppla samman inspektioner, anmärkningar och funktionsfel mellan Bessy och Ofelia, t.ex. system, komponenter och typ av inspektion
- Datakvaliteten inom varje enskilt datafält, t.ex. bristfällig/saknad data
- Tillgängliga datafält avseende effektiv arbetsorderprocess, t.ex. om alla datafälten behövs och om något datafält saknas
- Terminologin, dvs. användningen av olika begrepp i olika datafält
- Kommentarsfält; dessa saknar språkanalys, dvs. språkteknologi (natural language processing)

Fortsatta studier bör även studera effekten av belastning, t.ex. bruttovikt. Samband mellan bruttovikt och underhållskostnad kan ses i figur A.9. Korrelationen är inte hög och därför bör man studera på systemnivå, t.ex. spår och växlar, eller på komponentnivå, t.ex. skarvar och växelkryss; se tabell A.1.

Inställda tåg inkluderas inte i den uppställda modellen för effektsamband och bör därför studeras vidare, t.ex. med dylik modell som ekvation 1 men för inställda tåg. Reinvesteringar ingår inte heller i modellen, men dess effekt skulle kunna beräknas på dylikt vis genom att estimeras/mäta minskningen i andelen funktionsfel.

Trafikverkets erfarenhet från inspektionsanmärkningar som inte åtgärdats inom stipulerad, är att en stor andel av dessa inte leder till funktionsfel. Det finns även funktionsfel som kan kopplas till icke åtgärdade inspektionsanmärkningar. Vidare finns det funktionsfel som inte har detekterats via inspektion. Detta anger en förbättringspotential avseende besiktningens intervall och kriterier för bedömning av prioritet på inspektionsanmärkningar.

Referenser

Banverket, 2010. *Handling 6.4.1: Entreprenadbeskrivning (EB) avseende drift och underhåll av järnvägsanläggning*. Borlänge: Banverket.

Banverket, 2005. *BVF 807.2: Säkerhetsbesiktning av fasta anläggningar*. Borlänge: Banverket.

EU-kommissionen, 2012. On the technical specification for interoperability relating to the control-command and signalling subsystems of the trans-European rail system. *Official Journal of the European Union*, L51, pp. 1-65.

EU-kommissionen, 2013. Kommissionens genomförandeförordning (EU) nr 402/2013 om den gemensamma säkerhetsmetoden för riskvärdering och riskbedömning och om upphävande av förordning (EG) nr 352/2009. *Europeiska unionens officiella tidning*, L121, pp. 8-25.

IEC, 1990. *IEC 60050-191: International Electrotechnical Vocabulary: Chapter 191: Dependability and quality of service*. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC).

IEC, 2009. *IEC 60300-3-11: Dependability management - Part 3-11: Application guide - Reliability centred maintenance*. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC).

Lloyd's Register Consulting, 2015. *Riskbedömning av urspårning på grund av rälsbrott på bandel 124. 212103_R01*. Sundbyberg: Lloyd's Register Consulting.

Nationalencyklopedin, 2015. *Felbenägenhet*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/felbenagenhet> (hämtad 2015-11-12)

Nationalencyklopedin, 2015. *Tillgänglighet*. [http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/tillganglighet-\(2\)](http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/tillganglighet-(2)) (hämtad 2015-11-12)

Norrbin, P., 2016. Maintenance strategy optimization for robustness of railway infrastructure: A case study of snow and ice protection for railway switches and crossings at Malmbanan. *Artikel under utarbetande*.

Parahy, M., 2011. *Cost effective availability enhancement of switches and crossings using reliability analysis*, Luleå tekniska universitet.

Pearce, D., Atkinson, G. and Mourato, S., 2006. *Cost-benefit analysis and the environment*. 1st edn. Paris: Organisationen för ekonomiskt samarbete och utveckling (OECD).

SIS, 1999. *SS-EN 50126: Järnvägsanläggningar - Specifikation av tillförlitlighet, funktionssannolikhet, driftsäkerhet, tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet (RAMS)*. Stockholm: Swedish Standards Institute (SIS).

SIS, 2002. *SS-EN 61703: Tillförlitlighet - Matematiska uttryck för funktions-säkerhet, tillgänglighet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet*. Stockholm: Swedish Standards Institute (SIS).

SIS, 2010. *SS-EN 13306: Maintenance terminology*. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute.

Söderholm, P., 2007. A system view of the no fault found (NFF) phenomenon. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(1), pp. 1-14.

Söderholm, P. and Bergquist, B., 2015. Rail breaks: An explorative case study, *ICRESH-ARMS 2015*, Luleå tekniska universitet.

Stenström, C., 2014. *Operation and Maintenance Performance of Rail Infrastructure: Model and Methods*. Luleå tekniska universitet.

Trafikverket, 2010a. *BVF 808.20: Felrapportering inom järnvägsinfrastruktur*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket, 2010b. *BVS 524.31: Oförstörande provning (OFP) av räler och rälskomponenter*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket. Beslut om avvikelsemeddelande 5, järnvägsnätsbeskrivning 2012; Borlänge: Trafikverket; 2011.

WSP, 2011. *Trafikverkets järnvägsdatabaser - Innehåll, brister och förslag till förbättringar*. 2011:3. Stockholm: WSP.

A Förebyggande och avhjälpande underhåll – Kostnadsjämförelse och kostnad-nytta-analys

Sammanfattning

Funktionsfel kan ha stor inverkan på kapacitet, kvalitet och kostnad inom industri- och tjänsteproduktion. Således kan underhåll stå för en betydande kostnad inom många organisationer. Formuleringen av en underhållsstrategi beror dock på ett antal faktorer, inklusive kostnader för stilleståndstid, redundans och funktionssäkerhet. Balansen mellan förebyggande och avhjälpande underhåll för minsta kostnaden varierar följaktligen beroende på organisation. Det förekommer trots detta tumregler rörande balansen mellan förebyggande och avhjälpande underhåll, till exempel 80/20-regeln.

Undersökningar i förhållandet mellan förebyggande och avhjälpande underhåll i praktiken är sällsynta. Av den orsaken undersöks detta samband i denna studie med hjälp av historisk underhållsdata. En fallstudie inom järnvägar utförs på förhållandet mellan förebyggande och avhjälpande underhåll, tillsammans med en kostnad-nytta-analys. Resultaten visar att förebyggande underhåll står för $\approx 10-30\%$ av den totala underhållskostnaden när användarkostnader, dvs. merförseningar, inkluderas som en kostnad för avhjälpande underhåll. Kostnad-nytta-analysen visar att 1 kr i förebyggande underhåll sparar 3,3 kr i undvikta avhjälpande underhåll. Resultaten beror dock på inkluderande/uteslutande av användarkostnader. Vidare inkluderar inte den framlagda metoden alla kostnader som avser underhåll, såsom reinvestering, upphandling, planering, administration och beredskap. Planeringskostnader bör vara högre för förebyggande underhåll än för avhjälpande underhåll, medan beredskapskostnader bör vara högre för avhjälpande underhåll.

A.1 Inledning

Organisationer med produktion bundna till tekniska tillgångar kräver långsiktiga underhållsstrategier för att hålla sig konkurrenskraftiga, vare sig de producerar varor eller tjänster. Strategisk planering innebär insamling av information, sätta upp mål, bryta ner mål till specifika målsättningar (delmål) och inrätta aktiviteter för att uppnå målsättningarna (Armstrong 1982, Boston, Pallot 1997, Parida, Chattopadhyay 2007). Då låg tillgänglighet i anläggningar får en inverkan på produktionskostnad, -kvalitet och -kapacitet, utgör ofta underhåll en avsevärd del av kostnaderna i anläggningsintensiva organisationer (Dekker 1996, Salonen, Deleryd 2011).

Underhåll kan delas in i avhjälpande och förebyggande underhåll. Avhjälpande underhåll utförs efter det att funktionsfel upptäckts, med avsikt att återställa enheten till ett tillstånd i vilket den kan utföra krävd funktion. Förebyggande underhåll utförs vid förutbestämda intervall eller enligt förutbestämda kriterier och i avsikt att minska sannolikheten för fel eller degradering av en enhets funktion (SIS 2010, IEC 1990). Syftet med förebyggande underhåll är att tillhandahålla tillgänglighet och säkerhet med minsta möjliga resurserförbrukning

(Huang, Dismukes 2003). Förebyggande underhåll erfordrar dock att enheterna i fråga har en förväntad livslängd eller en mätbar förslitning. Valet av en underhållsstrategi beror på ett antal faktorer, inklusive kostnader för stilleståndstid, redundans och funktionssäkerhet. Balansen mellan förebyggande och avhjälpande underhåll för minsta kostnaden varierar följaktligen beroende på organisation. Ytterligare diskussioner om underhåll ges av Swanson (2001), Parida och Chattopadhyay (2007), Bontempi et al. (2008), och Frangopol (2011).

Att hitta förhållandet mellan förebyggande underhåll och avhjälpande underhåll i en organisation eller ett system är komplicerat. Först och främst, måste det vara tydligt vilka aktiviteter som ingår i förebyggande, respektive avhjälpande underhåll; en klassificering som varierar från organisation till organisation. De resurser som läggs på varje aktivitet måste därefter registreras i underhållssystemet. Datakvalitet och dataanalys är dock ett bekymmer eftersom stor del av indata är personalmatad data. Från intervjuer med personer från 20 företag, fann Davenport et al. (2001) att ett av de större problemen var oförmågan att omvandla data till information och kunskap. Karim et al. (2009) gjorde liknande observationer angående bearbetning av underhållsdata, vilket markerade att klyftan mellan databearbetning och information är stor. För det tredje, kan vissa kostnader vara svåra att uppskatta, särskilt indirekta kostnader och kostnader för kontraktering.

Då det är lite forskning om förhållandet mellan förebyggande och avhjälpande underhåll, hävdar en allmän tumregel för anläggningstillgänglighet att vi bör sträva efter ett förhållande mellan förebyggande och avhjälpande underhåll på 80/20 i allmänhet (Wireman 2010), dvs. i enlighet med Pareto-principen. Sådana tumregler är dock omöjligt användbara om de inte föreslås av en person inom företaget i fråga.

Viss litteratur har beaktat den totala kostnaden av underhåll. Till exempel, så beräknade OECD (2006) att väginfrastrukturen kommer att vara i behov av en global investering på 220-290 miljarder US-dollar/år från 2010 till 2030 (underhåll och utbyggnad). Vad beträffar järnvägsinfrastruktur, är beräkningen 49-58 miljarder US-dollar/år. Årlig investering för väg, järnväg, telekommunikation, elektricitet (transformering och distribution) och vattenförsörjning beräknas att, i genomsnitt, uppgå till ungefär 2,5 % av världens bruttonationalprodukt (BNP). Det uppgår till 37 biljoner US-dollar från 2010 till 2030. I USA, fann ASCE (2011) att det behövdes 74 miljarder USA-dollar under 2010 för att täcka befintliga brister för motorvägar, broar och kollektivtrafik. Om den här trenden fortsätter, kommer finansieringsgapet att vara 3,6 biljoner US-dollar (55 % ofinansierat) år 2040. För att uppnå lägstanivå, kommer det att erfordras 220 miljarder årligen från 2010 till 2040. Sliten infrastruktur beräknas lägga på kumulativa kostnader för amerikanska hushåll och företag på 2,9 biljoner US-dollar till 2040, t.ex. extra underhåll av fordon.

Det finns otaliga studier på optimerings- och kostnadsmodeller för underhåll; se recensioner av Dekker (1996), Garg och Deshmukh (2006), och Sinkkonen et al. (2013). Dekker (1996) noterade en klyfta mellan teori och praktik i optime-

ringsmodellering för underhåll, sannolikt till följd av ett matematiskt ändamål och många modellers stokastiska art, samt ett traditionellt fokus på deterministiska metoder inom ingenjörskonst. Vidare är få företag intresserade av att publicera resultat. Garg och Deshmukh (2006) och Sinkkonen et al. (2013) gjorde liknande observationer; optimerings- och kostnadsmodellapplikationer för underhåll är begränsade.

Några studier på industriutrustning har lagts fram med fallstudier i syftet att optimera kostnader för förebyggande och avhjälpande underhåll (Charles, Floru et al. 2003, Khalil, Saad et al. 2009). Dessa studier fokuserade på enskilda system och detaljer utlämnades eftersom fallstudierna enbart var i demonstrationssyfte. Vad beträffar infrastrukturaspekter, har det gjorts omfattande livscykelkostnadsanalyser (LCC), inklusive kostnader och lönsamhet för samhället, ägare, användare och miljön (Thoft-Christensen 2012). Analyserna har granskat investeringar, återinvesteringar, dess relaterade användarkostnader och underhållskostnader. Många modeller har en stokastisk inriktning, med vissa praktiska tillämpningar tillgängliga (Thoft-Christensen 2012). I denna studie, fokuserar vi endast på att jämföra förebyggande och avhjälpande underhåll, med ett deterministiskt tillvägagångssätt och användning av historiska underhållsdata. Ett liknande tillvägagångssätt för analysen av historiska underhållsdata tillämpades av Nissen (2009). Nissen byggde upp en LCC-modell för växlar och utförde en fallstudie på Sveriges järnvägar. LCC-modellen inkluderar förvärvskostnad, förebyggande underhåll, avhjälpande underhåll och återinvesteringar, men detaljer om respektive andelar av förebyggande och avhjälpande underhåll ges inte.

I denna studie bedöms kostnader för förebyggande och avhjälpande underhåll genom analys av historiska data, med syftet att fastställa förhållandet mellan förebyggande och avhjälpande underhåll, samt utföra en kostnad-nytta-analys (CBA). Metoden beskrivs i nästa avsnitt, följt av en fallstudie som genomförs på järnvägar. Infrastruktur, såsom vägar, broar, järnvägar, eldistribution och pipelines, skiljer sig från andra tillgångar eftersom de sträcker sig över större geografiska områden. Följaktligen kan logistiktiden (restiden) vara betydande.

Arbetet hör samman med styrning och uppföljning av underhåll; se t.ex. underhållsklassificering av Garg och Deshmukh (2006) och recensioner av Kumar et al. (2013) och Simões (2011).

A.2 Metodik

Förebyggande och avhjälpande underhållsdata sätts i samband med både direkta och indirekta kostnader. Direkta kostnader är de för arbetskraft och material, och indirekta kostnader täcker allt övrigt. Allmänna drifts- och underhållsdata är följande: underhållstider (administrativa, logistiska och reparation), avbrotts- och fördröjningstider, funktionsfel, orsaker, åtgärder, system- och komponentinformation. Registrerad underhållsdata varierar mellan förebyggande och avhjälpande underhåll, liksom mellan organisationer.

Följande uppgifter anses vara viktiga för att beräkna kostnaden för avhjälpande underhåll: service-/produktionsförlust, logistiktid, reparationstid och material. Kostnaden för rapportering av funktionsfel antas vara noll. Kostnaden för avhjälpande underhåll i ett system över en given tid är därmed lika med summan av fyra objekt:

$$C_{CM} = \sum_{i=1}^n (n_{P,i} C_P \{2t_{LT,i} + t_{RT,i}\} + C_{M,i} + t_{DT,i} C_{DT}) \quad (\text{A.1})$$

där:

- n = Antal funktionsfel
- n_P = Antal personer i underhållslaget
- t_{LT} = Logistiktid (LT) för enkel resa, dvs. inställetid [t]
- t_{RT} = Reparationstid (RT), dvs. aktiv reparation [t]
- t_{DT} = Stilleståndstid, service-/produktionsförlust [t] (DT = downtime)
- C_P = Monetär kostnad per personal och tidsenhet [t^{-1}]
- C_M = Monetär kostnad för material (reservdelar, verktyg och maskineri)
- C_{DT} = Monetär kostnad för stilleståndstid [t^{-1}]

På liknande sätt är kostnaden för förebyggande underhåll i ett system över ett givet tidsintervall enligt följande:

$$C_{PM} = C_P \left(\sum_{i=1}^m n_{P,i} t_{PM,i} + \sum_{j=1}^k n_{P,j} \{t_{AT,j} + 2t_{LT,j}\} \right) + C_{PMM} + C_{PMDT} \quad (\text{A.2})$$

där:

- m = Antal inspektioner som utförts eller antal potentiella fel som åtgärdats (potentiella fel = inspektionsanmärkningar)
- k = Antal resor från verkstad till enhets plats
- t_{PM} = Aktiv tid för förebyggande underhåll, dvs. FU eller PM (preventive maintenance) [t]
- t_{AT} = Administrativ/föreberedelsestid [t]
- C_{PMM} = Monetär kostnad för material för förebyggande underhåll (reservdelar, verktyg och maskineri)
- C_{PMDT} = Monetär kostnad för service-/produktionsförlust på grund av förebyggande underhåll

Ekvation A.2 kan tillämpas på inspektioner och åtgärd av potentiella fel, dvs. inspektionsanmärkningar. Ett potentiellt fel kan beskrivas som ett identifierbart tillstånd vilket indikerar att ett funktionsfel antingen snart kan uppstå eller är på väg att uppstå (Moubray 1997). Detta är ett begrepp som även används vid tidsfördröjningsanalyser (Christer, Waller 1984). C_{PMM} placeras separat i ekvation A.2, eftersom det kan behandlas som en klumpsumma eller per m och/eller k beroende på inkludering/uteslutande av reservdels-, verktygs- och maskinerikostnader.

C_{PMDT} placeras även separat, eftersom stilleståndstiden (DT) för förebyggande underhåll ofta beror på särskilda händelser.

För att kostnadsjämföra, internt eller externt, kan det vara nödvändigt att normalisera kostnaderna enligt anläggningstyper och -kvantiteter. När det gäller infrastruktur kan normalisering till dess geografiska utbredning erfordras, t.ex. kostnad per kilometer.

A.2.1 Kostnad-nytta-analys

Kostnad-nytta-analys är ett verktyg för att jämföra projekts eller aktiviteters kostnad och nytta. Målet med kostnad-nytta-analysen är att ge stöd i beslutsfattande och göra det mer rationellt för att sålunda få en mer effektiv styrning av resurser (Thoft-Christensen 2012, Boardman, Greenberg et al. 2013). I kostnad-nytta-analys, tilldelas ett monetärt värde till både kostnader och nyttor för att avgöra om ett projekt är värt att genomföra (Pearce, Atkinson et al. 2006). Lönsamhetsförhållandet (B/C - benefit/cost), eller utbytet av underhållsinvestering, för bedömning av värdet av förebyggande underhåll definieras i denna studie som:

$$B/C = \frac{B_{PM}}{C_{PM}} = \frac{\alpha\beta\bar{C}_F}{\bar{C}_I + \alpha\bar{C}_R} \quad (\text{A.3})$$

där:

B_{PM} = Nyttan av förebyggande underhåll

C_{PM} = Kostnaden för förebyggande underhåll

\bar{C}_F = Medelkostnaden för funktionsfel (inklusive eller exklusive kostnader för produktions-/serviceförluster)

\bar{C}_I = Medelkostnaden för inspektion

\bar{C}_R = Medelkostnaden för åtgärd av potentiellt fel

α = Sannolikhet för detektering (POD - Propability of detection) av potentiellt fel, $\alpha \in [0,1]$

β = Sannolikhet att potentiellt fel utvecklas till funktionsfel, $\beta \in [0,1]$

Kostnaden (C_{PM}) är det monetära värde som investerades i förebyggande un-

derhåll. Det innefattar inspektionskostnad (\bar{C}_I) och åtgärdskostnad vid potentiella fel (\bar{C}_R) som identifierats vid inspektioner. Eftersom varje inspektion relaterar till en sannolikhet för detektering (POD), införs en parameter α . Nyttan (B_{PM}) av förebyggande underhåll är den kostnad som sparas genom att undvika funktionsfel (\bar{C}_F), dvs. avhjälpande underhåll. Det är emellertid inte säkert att alla potentiella fel som identifieras vid förebyggande underhåll kommer övergå till funktionsfel; en parameter β introduceras därmed. Kvantitativt sett betyder detta att kostnaderna beräknas enligt följande:

$$\bar{C}_I = \frac{1}{m_I} \sum_{i=1}^{m_I} c_{I,i} = \frac{1}{m_I} C_{PMI} \quad (\text{A.4})$$

$$\bar{C}_R = \frac{1}{m_R} \sum_{i=1}^{m_R} c_{R,i} = \frac{1}{m_R} C_{PMR} \quad (\text{A.5})$$

$$\bar{C}_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{F,i} = \frac{1}{n} C_{CM} \quad (\text{A.6})$$

där:

- c_I = Monetär kostnad för inspektion av enhet
- c_R = Monetär kostnad för åtgärd av enhet till följd av potentiellt fel
- c_F = Monetär kostnad för reparation av enhet till följd av funktionsfel
- m_I = Antal inspektioner
- m_R = Antal potentiella fel

Sannolikhet för detektering av potentiellt fel ges av:

$$\alpha = \frac{m_R}{m_I} \quad (\text{A.7})$$

Observera att sannolikheten för detektering är en term som används inom oförstörande provning (OFP). Inom ramen för inspektioner är visuell inspektion den vanligaste typen av OFP. I formeln ovan är α andelen inspekterade enheter som inte uppfyller funktionsnivå-kraven. $1 - \alpha$ är därmed andelen enheter som uppfyller funktionskraven. α har alltså inte samma betydelse som inom OFP, där $1 - \alpha$ står för andelen enheter med potentiella fel som passerade inspektion obemärkta.

Avseende β (sannolikheten att ett potentiellt fel utvecklas till ett funktionsfel), beror denna parameter på hur allvarligt det potentiella felet är och vilken tidsram som beaktas. Det finns dock inget kvantitativt sätt att beräkna. Det skulle

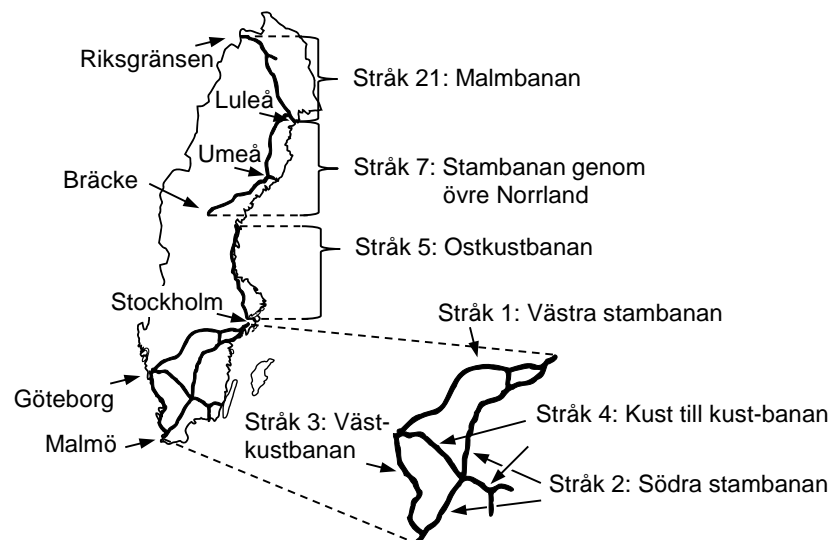
vara möjligt att beräkna β kvantitativt om alla potentiella fel lämnades utan åtgärd och deras tillstånd istället övervakades. I sådant fall skulle det gå att se hur många potentiella fel som vid ett specifikt tillfälle har försämrats och övergått till funktionsfel, och på så sätt kunnat beräkna β . Detta är dock inte möjligt i praktiken. I praktiken tilldelas alla potentiella fel en prioritet beroende på allvarlighet, t.ex. vecka, månad eller år; en hög prioritet indikerar högt β . Tilldelade prioriteter kan sålunda användas som en indikator för att bestämma β .

A.3 Fallstudie

En fallstudie på järnvägar används för att undersöka förhållandet mellan förebyggande och avhjälpande underhåll. Liknande analyser av andra anläggningar, såsom broar och maskinparker, kommer inte att ge samma resultat, men metoden för bedömning av underhållskostnader är dock densamma.

A.3.1 Datainsamling

Underhållsdata har samlats in från Trafikverket. Data innefattar både avhjälpande underhåll, dvs. funktionsfeldata, och data om förebyggande underhåll, dvs. inspektioner och åtgärdande av potentiella fel. Data om avhjälpande underhåll utgörs av brådskande potentiella fel (klassificerade som funktionsfel) som rapporterats av underhållsleverantören under inspektioner, liksom funktionsfel som identifierats utanför inspektioner, vilka normalt sett rapporterats av tågföraren, men ibland även av privatpersoner. Data om förebyggande underhåll inkluderar visuella kontroller, manuella mätningar och även oförstörande provning med mätvagn. De data som samlats in täcker sju stråk, vilka inkluderar 65 bandelar. Se figur A.1. Underhållsdata är från 2013.01.01 - 2013.12.31, dvs. ett år. Rapporterat antal funktionsfel är 24 816, och 25 % av dessa är fel resulterade i merförseningar, dvs. 6 131 tågöversenande funktionsfel. Antal utförda inspektioner är 352 679, potentiella fel uppgår till 52 854 och åtgärdade potentiella fel är 28 704. Sammanfattande statistik över insamlad data ges i sista avsnittet.



Figur A.1: Stråk 1-5, 7 och 21.

A.3.2 Datakvalitet och utliggare

Funktionsfel (avhjälpande underhåll)

Beroende på insamlade data behöver den beskrivna metoden specificeras ytterligare. I fallstudiens data registreras underhållstiderna för funktionsfel i järnvägsinfrastruktur av underhållspersonal och drifttekniker. Detta betyder att uppgifternas exakthet kan variera; användning av genomsnittliga logistik- och reparationstider istället för de faktiska värdena kan därför vara att föredra. För att gå tillbaka till ekvation A.1, ges kostnaden för avhjälpande underhåll av en enhet (stråk, bandel, system eller komponent) över ett givet tidsintervall av följande:

$$C_{CM} = n(\bar{n}_P C_P \{2m_{LT} + m_{RT}\} + \bar{C}_M) + C_{DT} \sum_{i=1}^n t_{DT,i} \quad (\text{A.8})$$

där:

\bar{n}_P = Genomsnittligt personalantal i underhållsteamet

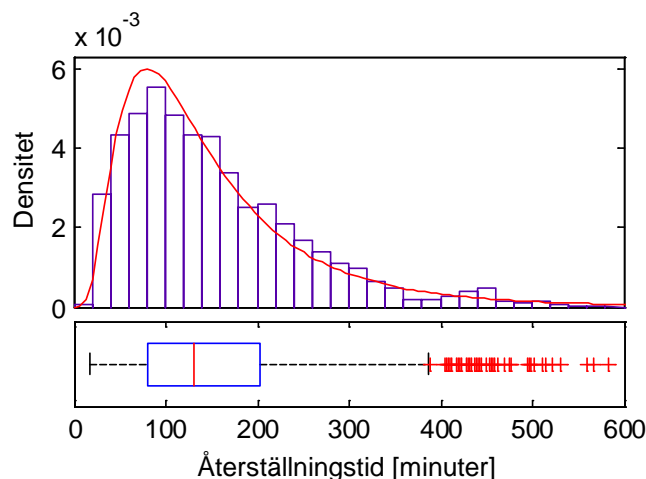
m_{LT} = Genomsnittlig logistiktid (LT) [t]

m_{RT} = Genomsnittlig reparationstid (RT) [t]

\bar{C}_M = Genomsnittlig monetär materialkostnad

Genom att undersöka stråk 21, ger återställningstiden (TTR), dvs. LT + RT, en log-normal på 401 minuter och en median på 139 minuter, när data upp till den 95:e percentilen beaktas. Gränser kan alternativt ställas in genom att bortse från data enligt en procentsats. Genom att begränsa logistiktiden och den aktiva reparationstiden till $5 < LT < 240$ minuter och $10 < RT < 600$ minuter, fås log-normal 156 minuter och medianen 130 minuter; dvs. skillnaden är mindre (figur A.2). Antingen kan medianen eller log-normal användas. Försiktighet krävs dock om log-normal används eftersom den är känslig för utliggare. Eftersom avhjälpande underhåll dessutom består av akut och uppskjutet underhåll (SIS 2010), krävs det ett par dagar för åtgärdande av vissa funktionsfel, vilket påverkar registrerat LT och RT. Dessutom leder inte alla funktionsfel till tågförseningar och följaktligen varierar LT och RT.

Vad beträffar tågförseande funktionsfel, antas det att underhållsteamet reser till platsen för felet så snart som möjligt och utför reparationen effektivt. LT och RT för tågförseande funktionsfel bör sålunda utgöra den faktiska tid det tar att utföra underhåll bättre än icke-förseande funktionsfel. I den här studien, beräknas därför m_{LT} and m_{RT} genom att använda log-normal för tågförseande funktionsfel som uppfyller följande: $5 < LT < 240$ minuter och $10 < RT < 600$ minuter. m_{LT} and m_{RT} tillämpas sedan på alla funktionsfel, med undantag för vissa fel som har uteslutits eftersom de orsakade särskilt långa merförseningar.



Figur A.2: Distribution/fördelning på återställningstiden (TTR) avseende funktionsfel på stråk 21.

Merförseningar registreras via signalsystemet och kan därför anses vara exakta. De tågförsenande funktionsfelen har vissa utliggare; dvs. vissa funktionsfel resulterar i upp till flera dagars störningar, t.ex. urspårningar och nedrivna kontaktledningar. Följaktligen betraktas de 2 % av funktionsfelen med de längsta merförseningarna som utliggare och utesluts från analysen. Utliggare bör dock inkluderas i en separat analys, eftersom de utgör en stor kostnad, men detta ligger utanför den här studiens omfattning.

Insamlad data omfattar inte verktygs-/maskinerikostnader och har inte tagits upp i \bar{C}_M i ekvation A.8. På liknande sätt är reservdelskostnaden och personalantal okända, därför tillämpas en genomsnittlig reservdelskostnad \bar{C}_M och ett genomsnittligt personalantal.

Inspektioner och potentiella fel (förebyggande underhåll)

Ekvation A.2 tillämpas för inspektioner \bar{C}_{PMI} och åtgärd av potentiella fel \bar{C}_{PMR} , i en enhet (stråk, bandel, system eller komponent) över ett givet tidsintervall som:

$$C_{PMI} = C_P \bar{n}_{PI} \left(m_I \bar{t}_{PMI} + k_I \bar{t}_{ATI} + 2 \sum_{j=1}^{k_I} t_{LTI,j} \right) \quad (\text{A.9})$$

$$C_{PMR} = C_P \bar{n}_{PR} \left(m_R \bar{t}_{PMR} + k_R \bar{t}_{ATR} + 2 \sum_{j=1}^{k_R} t_{LTR,j} \right) + \bar{C}_{PMMR} \quad (\text{A.10})$$

där:

\bar{n}_{PI} = Genomsnittligt personalantal i inspektionsteamet

m_I = Antal inspektioner

k_I	= Antal resor för inspektioner
\bar{t}_{PMI}	= Aktiv inspektionstid [t]
\bar{t}_{ATI}	= Administrativ tid / förberedelsestid för inspektioner [t]
t_{LTI}	= Logistiktid (LT), dvs. restid, för inspektioner [t]
\bar{n}_{PR}	= Genomsnittligt personalantal i teamet för åtgärd av potentiella fel
m_R	= Antal potentiella fel
k_R	= Antal resor för åtgärd av potentiella fel
\bar{t}_{PMR}	= Aktiv reparationstid för potentiella fel [t]
\bar{t}_{ATR}	= Administrativ tid/förberedelsestid för reparation av potentiella fel [t]
t_{LTR}	= Logistiktid (LT), dvs. restid, för reparation av potentiella fel [t]
\bar{C}_{PMMR}	= Monetär materialkostnad för reparation av potentiella fel (reservdelar, verktyg och maskineri)

C_{PMMI} och C_{PMDT} utelämnas på grund av brist på data. Logistiktiden (t_{LTI} och t_{LTR}) beräknas som det genomsnittliga reseavståndet genom den genomsnittliga resehastigheten; dvs. \bar{l}/\bar{v} . \bar{l} beror på bandelen i fråga; dvs. $t_{LTI,j} = \bar{l}/\bar{v}$.

A.3.3 Normalisering

Järnvägar består av både linjära anläggningar och punktanläggningar. Exempel på delsystem som kan behandlas som linjära är räls, sliper, befästning, ballast och kontaktledningssystem. Delsystem som är svåra att betrakta som linjära är växlar och olika typer av stationer, t.ex. omformarstation. Eftersom växlar står för en större del av alla fel och merförseningar (se sista avsnittet), har normalisering genomförts enligt antalet växlar och spårlängd i denna studie. Mer specifikt, normaliseras underhållsdata för växlar enligt antalet växlar, och underhållsdata för andra delsystem normaliseras enligt spårlängden, där dubbla spår räknas dubbelt; dvs. kostnaderna divideras med antalet växlar och spårkilometer. Detta innebär att för var och en av de 65 bandelarna, ges den normaliserade kostnaden av:

$$C = \frac{1}{N} (C_{CM}^{Växlar} + C_{PMI}^{Växlar} + C_{PMR}^{Växlar}) + \frac{1}{M} (C_{CM}^{Spår} + C_{PMI}^{Spår} + C_{PMR}^{Spår}) \quad (\text{A.11})$$

där N och M är det totala antalet växlar och spår-kilometer för en bandel.

A.3.4 Antaganden

I studien gjordes följande antaganden:

- Genom att normalisera spårlängd och räkna dubbla spår två gånger, antas det att bandelar med enkla och dubbla spår kan analyseras tillsammans. Normalisering enligt spår-kilometer och antal växlar antas dessu-

tom förbättra resultaten för en bandel i jämförande syfte. Dock tas inte hänsyn till spårlängd på bangårdar som har fler än ett spår på enkelspår och fler än två spår på driftplats.

- Distributionstyperna antas vara likvärdiga för alla bandelar. Samma metoder för gränser och medelvärden avseende data kan sålunda användas för alla bandelar. Datakvaliteten antas dessutom vara likvärdig för alla bandelar.
- Kostnaden för arbetstimmar, tågförseningar, reservdelar och erforderat personalantal för underhåll antas vara detsamma för alla bandelar. Tid för inspektioner, åtgärdande av potentiella fel och förberedelser antas även de vara likvärdiga för alla bandelar.
- Resehastighet för förebyggande underhåll antas vara densamma för alla bandelar; logistiktiden beror sålunda på bandelarnas geografiska längd. Vad beträffar avhjälpande underhåll, beräknas logistiktiden från insamlad underhållsdata.

A.4 Resultat

Resultaten beräknas med tidsperioden för den insamlad data som en period, dvs. resultaten är för ett helt år. Var och en av de 65 bandelarna beräknas separat med ekvation A.11. Konstanterna fastställs enligt följande:

$$\bar{n}_P = 2$$

$$\bar{n}_{PI} = 1$$

$$\bar{n}_{PR} = 2$$

$$C_P = 1\,000 \text{ SEK/timme}$$

$$C_{DT} = 530 \text{ SEK/minut (Nissen 2009)}$$

$$\bar{C}_M = 1\,000 \text{ SEK/funktionsfel}$$

$$\bar{t}_{PMI} = 5 \text{ minuter}$$

$$\bar{t}_{ATI} = \bar{t}_{PMR} = \bar{t}_{ATR} = 30 \text{ minuter}$$

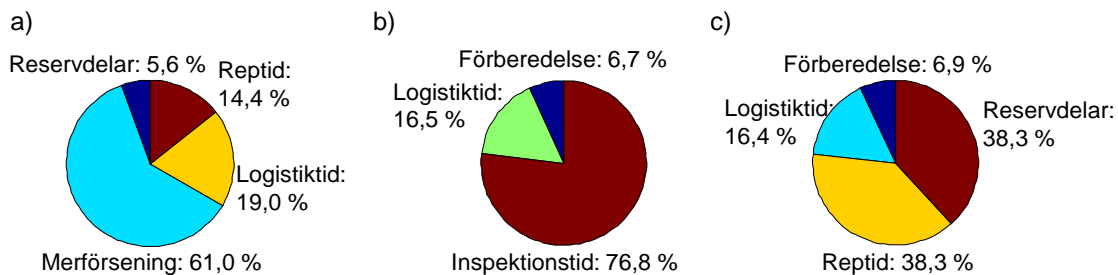
$$\bar{v} = 80 \text{ km/h}$$

$$\bar{C}_{PMMR} = 1\,000 \text{ SEK (per inspektionsanmärkning / potentiellt fel)}$$

Vi antar att följande förblir konstant. När ett funktionsfel uppstår, färdas två personer med bil till platsen för den defekta enheten för att utföra underhåll. Resetiden (m_{LT}) och reparationstiden (m_{RT}) beräknas från log-normal av tågförsenande funktionsfelet på bandelen i fråga. Vid en merförsening ($t_{DT,i}$), läggs en kostnad till på 530 SEK/minut. En genomsnittlig reservdelskostnad läggs även till på 1 000 SEK. Inspektioner utförs av en person som förbereder sitt arbete under 30 minuter, färdas medelavståndet till bandelen i fråga, och utför x antal inspektioner som var och en tar fem minuter. Antalet inspektioner och resor ges i insamlad inspektionsdata. Potentiella fel åtgärdas på liknande sätt av, i genomsnitt, två personer. Varje åtgärd tar 30 minuter och kostar 1 000 SEK per

åtgärdad enhet. Varje person kostar 1 000 SEK/timme. Fastän genomsnittliga siffror tillämpas, kan de i verkligheten variera mellan bandelar.

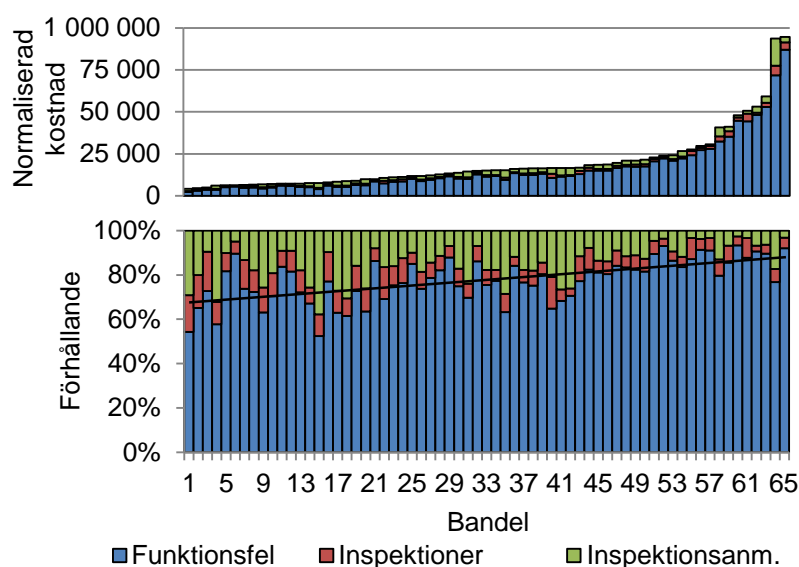
Om vi går tillbaka till ekvationerna A.8-10, för alla 65 bandelar, visas kostnadsförhållandet för funktionsfel (C_{CM}), inspektioner (C_{PMI}) och reparationer av potentiella fel (C_{PMR}) i figur A.3. Figuren visar att kostnaden för merförseningar utgör 61 % av kostnaden för avhjälpande underhåll, och inspektioner och åtgärd av potentiella fel utgör ≈ 80 % av kostnaden för förebyggande underhåll.



Figur A.3: Kostnadsförhållanden för 65 bandelar: funktionsfel (a), inspektioner (b) och åtgärd av potentiella fel (c).

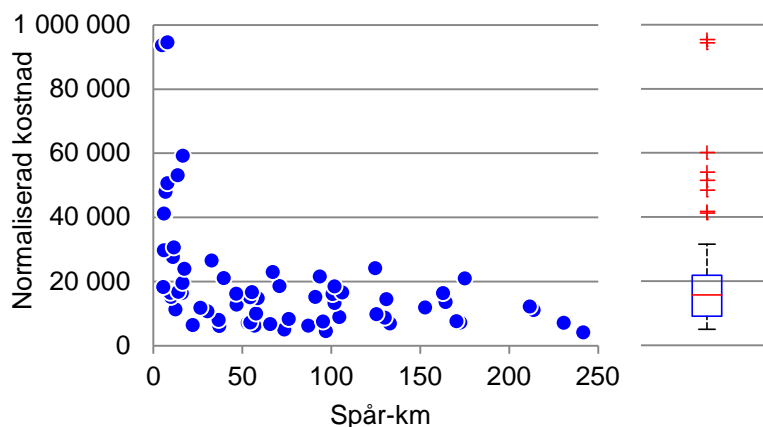
A.4.1 Normaliserad kostnad för jämförelse av bandelar

Vid tillämpning av ekvation A.11, visar figur A.4 den normaliserade kostnaden som en funktion av bandel, sorterat från den lägsta till den högsta totala normaliserade underhållskostnaden, dvs. förebyggande och avhjälpande underhåll sammanlagt. Man kan se att bandelarna med den lägsta underhållskostnaden har ≈ 30 % förebyggande underhåll, medan bandelarna med den högsta underhållskostnaden har ≈ 10 % förebyggande underhåll. En linje anpassad ger en R^2 på 0,38, vilket inte är högt, men det finns flera olika faktorer som påverkar en bandels prestanda. Se diskussionsavsnittet i nästa avsnitt.



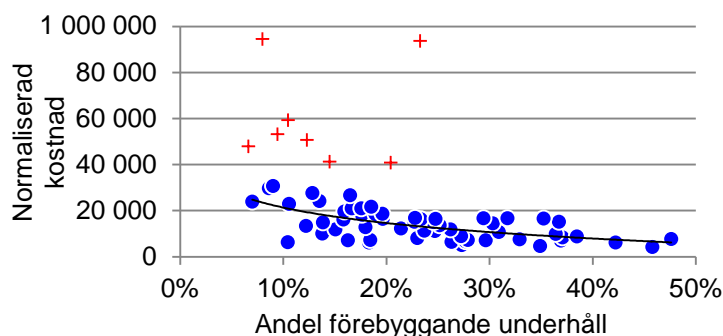
Figur A.4: Normaliserad underhållskostnad och kostnadsförhållande för de 65 bandelarna.

Det kan även ses från figur A.4 att ett par bandelar har en mycket hög total underhållskostnad i förhållande till andra bandelar. Att kartlägga den normaliserade kostnaden som en funktion av spårlängd visar tecken på ett visst beroende mellan kostnaden och spårlängden, även efter normalisering (figur A.5). Genom att studera de åtta utliggarna, vilka indikeras med kryss i figur A.5 på höger sida, fann vi att dessa är spår i tätorter, vilka har hög teknisk densitet (många enheter per kilometer) och korta spårlängder. De åtta utliggarna har en genomsnittlig spårlängd på 7,8 km, medan medellängden på de 65 bandelarna är 69 km.



Figur A.5: Normaliserad kostnad som en funktion av spårlängd med lådagram.

Den normaliserade kostnaden kan ställas upp som en funktion av andelen förebyggande underhåll; se figur A.6. Den logaritmiska regressionslinjen inkluderar inte utliggare; datapunkterna markerade med kryss. En andel förebyggande underhåll på 0,1 ger en normaliserad kostnad på 21 356, medan en andel på 0,2 ger en normaliserad kostnad på 14 638, dvs. 31 % lägre. Att öka det förebyggande underhållet kommer dock inte att definitivt sänka den totala underhållskostnaden, eftersom R^2 på 0,40 är lågt.



Figur A.6: Normaliserad kostnad som en funktion av andel förebyggande underhåll. Utliggare är markerade med kryss och inkluderas inte i den logaritmiska regressionslinjen.

Genom att jämföra de tio bandelarna med den lägsta kostnaden i förhållande till de tio bandelarna med den högsta kostnaden, finnes att bandelarna med den

högsta kostnaden har dubbelt så många tåg och tre gånger bruttovikten. Se tabell A.1. Tonnage och antalet tåg ges i godtyckliga enheter (a.u. - arbitrary unit) i denna tabell till följd av konfidentialitet och finns tillgängliga för fem av lägstkostnadsbandelarna och fem av högstkostnadsbandelarna. Dyrare bandelarna har även 4,5 gånger så många funktionsfel i spår (räls, skarvar, befästning, slipers och ballast), 6,7 gånger fler funktionsfel i skarvar och 3,2 gånger fler funktionsfel i växelkryss.

Tabell A.1: Jämförelse av de tio bandelarna med den lägsta kostnaden och de tio bandelarna med den högsta kostnaden.

	Bandelarna med lägst kostnad	Bandelarna med högst kostnad	Förhållande
Normaliserad kostnad	59 489	249 125	4,2
Växlars medelinstallationsår	1995	1998	-
Räls medelinstallationsår	1997	1994	-
Medelbruttovikt [a.u.]	1	3	3
Medel antal tåg [a.u.]	1	2	2
Inspektioner per spår-km	48,4	110	2,3
Växelinspektioner per växel	5,0	5,4	1,1
Spårfel per spår-km	0,18	0,80	4,5
Växelfel per växel	0,56	1,12	2,0
Fel i skarvar per spår-km	0,04	0,26	6,7
Fel i växelkryss per växel	0,009	0,029	3,2

A.4.2 Kostnad-nytta-analys

Vad beträffar kostnad-nytta-analys är normalisering inte tillämpligt. Ekvation A.3 ger kostnad-nytta-förhållande (B/C) för förebyggande underhåll av:

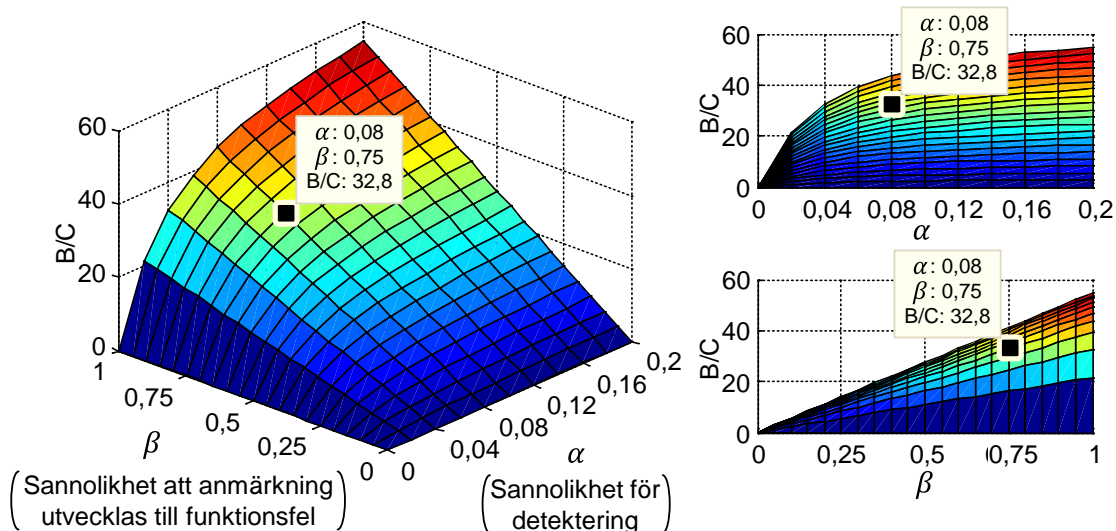
$$\begin{aligned}
 B/C &= \frac{\alpha\beta\bar{C}_F}{\bar{C}_I + \alpha\bar{C}_R} = \frac{\alpha\beta\frac{1}{n}C_{CM}}{\frac{1}{m_I}C_{PMI} + \alpha\frac{1}{m_R}C_{PMR}} \\
 &= \frac{\alpha\beta\frac{1}{n}(\text{Ekv. A. 8})}{\frac{1}{m_I}(\text{Ekv. A. 9}) + \alpha\frac{1}{m_R}(\text{Ekv. A. 10})}
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

B/C-förhållandet kan användas för system, komponenter, bandelar eller ett järnvägsnät. I den här studien, beräknas B/C-förhållandet för hela datauppsättningen, dvs. 24 816 funktionsfel, 352 679 inspektioner och 28 704 åtgärdade potentiella fel. \bar{C}_F , \bar{C}_I och \bar{C}_R beräknades för var och en av de 65 bandelarna, följt av att ta dess medelvärde. Medelkostnaden för funktionsfel \bar{C}_F blir då 18 060 SEK, medelkostnaden för inspektion \bar{C}_I blir 112 SEK och medelkostnaden för reparation av potentiella fel \bar{C}_R blir 2 730 SEK. Sannolikheten för detektering av

potentiellt fel α ges av ekvation A.7. Antal utförda inspektioner är 352 679, potentiella fel uppgår till 52 855 och åtgärdade potentiella fel är 28 704. För att undvika att övervärdera nyttan, har vi endast tagit med de mer kritiska potentiella felen, dvs. de som åtgärdades inom samma år. Dessa uppgick till 28 704 potentiella fel. Värdet för α blir då $28\,704/352\,679 = 0,08$. Utav de 28 704 åtgärdade potentiella felen, hade 72 % tilldelats prioritet "månad" och 20 % hade tilldelats prioritet "vecka", dvs. totalt 92 %. Se figur B.6. Med andra ord uppskattade inspektionspersonalen att de potentiella felen, om de inte hade åtgärdades, skulle försämrats till ett funktionsfel inom en snar framtid. Om vi tar prioritet "månad" som ett exempel, måste åtgärdandet ske inom tre månader enligt Trafikverkets föreskrifter, och den snara framtid är sålunda tre månader. Efter inspektionspersonalens bedömning och enligt underhållspolicyn, skulle 92 % av de potentiellt fel övergå till funktionsfel efter tre månader, vilket ger ett β -värde på 100 %. Men i praktiken skulle inte alla potentiella fel med prioritet "vecka" eller "månad" försämrats och övergå till funktionsfel efter tre månader om ingen åtgärd hade vidtagits. Därmed sätts β lägre än ett; i denna studie till 0,75. Kostnad-nytta-förhållandet (B/C) visar sig sålunda vara $\approx 3,3$. Se även ytterligare diskussion i avsnitt 5.1 och figur 11.

A.4.3 Känslighetssanalys

Eftersom båda parametrarna α och β introducerar en viss osäkerhet i B/C-beräkningen utförs en känslighetsanalys. Sannolikheten för detektering, dvs. α , ställdes in till de åtgärdade potentiella felen dividerat med antalet inspektioner ($28\,704 / 352\,679 = 0,08$). En inspektion har därför 8 % sannolikhet att resultera i en reparation. Detta nummer beror dock på hur effektiva inspektionerna är. En organisation med lite förebyggande underhåll som inför ett grundläggande program för förebyggande underhåll kan uppnå en $\alpha > 0,08$, medan en organisation med ett omfattande program för förebyggande underhåll som utökar underhållsprogrammet ytterligare, kan sänka sin α . Sannolikhet att ett potentiellt fel utvecklas till ett funktionsfel, dvs. β , kan bestämmas med hjälp av expertgrupp och de potentiella felens tilldelade prioriteter. En stor andel potentiella fel med hög prioritet indikerar ett högt β -värde. Effekten av α and β på B/C-förhållandet visas i figur A.7 B/C-förhåll-andet ökar inledningsvis snabbt med α och går mot en horisontell asymptot. För β , ökar B/C-förhållandet linjärt. Observera att det finns ett ömsesidigt beroende mellan α och β ; om underhållsgränserna för potentiella fel blir striktare, kommer α att öka och β att minska. Användarkostnader i form av merförseningar har dessutom en stor inverkan på B/C-förhållandet. Enligt figur A.3, kommer 61 % av kostnaden för avhjälpan underhåll (C_{CM}) från merförseningar. Exkluderas kostnaden för merförseningen i beräkningen ger det ett B/C-förhållande på $0,39 \cdot 3,3 = 1,29$.



Figur A.7: Kostnad-nytta-förhållandet (B/C) för de sju stråken som en funktion av α och β .

A.5 Diskussion

Från fallstudien kan vi fastställa att 70-90 % av underhållskostnaden kommer från avhjälpande underhåll som i sin tur består av 61 % merförseningskostnad (figurerna A.3 och A.4). Om man bortser från merförseningskostnaden står det avhjälpande underhållet för 50-70 % av underhållskostnaden. Resehastigheten för förebyggande underhåll sattes högt; om den var lägre skulle det påverka resultaten med några procentenheter. Logistiktidens omfattning visas i figur A.3.

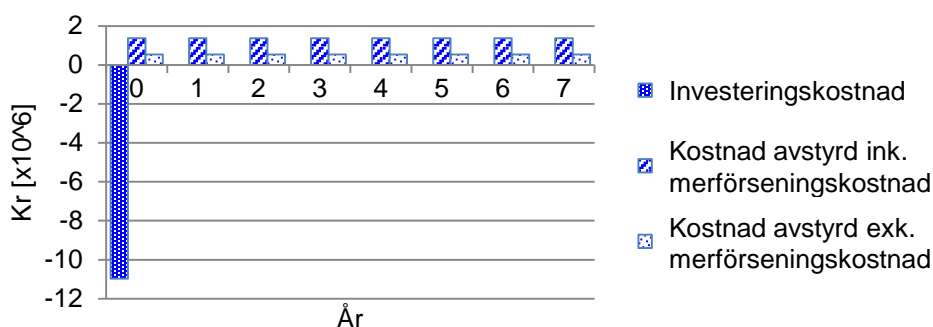
Bandelarna med den lägsta totala underhållskostnaden har den högsta andelen förebyggande underhåll; $\approx 30\%$ förebyggande underhåll jämfört med $\approx 10\%$ förebyggande underhåll på de dyraste bandelarna. Detta betyder inte att bandelarna med den lägsta totala underhållskostnaden investerar mer pengar i förebyggande underhåll. Det betyder snarare, precis som figur A.4 visar, att bandelarna med den lägsta kostnaden har både lägre kostnader för förebyggande och avhjälpande underhåll. De bandelar med den högsta underhållskostnaden transporterar tre gånger bruttovikten jämfört med bandelarna med lägst underhållskostnad. Inspektioner utförs sålunda oftare till följd av högre spårklassificering (bilaga B). Till exempel utförs inspektioner av växelkryss 1-6 gånger per år beroende på spårklassificeringen. En möjlig förklaring till skillnaden i förhållandena mellan förebyggande och avhjälpande underhåll kan vara att den högre klassificeringen inte ökar antalet inspektioner efter vad som egentligen krävs. Det kan även finnas olika underhållspolicyer mellan bandelar/stråk.

Regressionslinjen i figur A.4 visar inte en högt R^2 -värde ($R^2 = 0,38$), men eftersom många faktorer påverkar järnvägars prestanda och endast några få tas upp i modellen, kanske det inte är möjligt att förvänta sig ett högt R^2 -värde. Exempel på faktorer som påverkar en bandels prestanda är: geografisk plats; klimat; väder; modell, tillverkare och skick/ålder på komponenter; tågheterogenitet; rullande materiels skick, ålder, typer, hastighet och bruttovikt; hjul- och rälprofiler; och underhållspolicy. Normaliseringsförfarandet kan dock göras

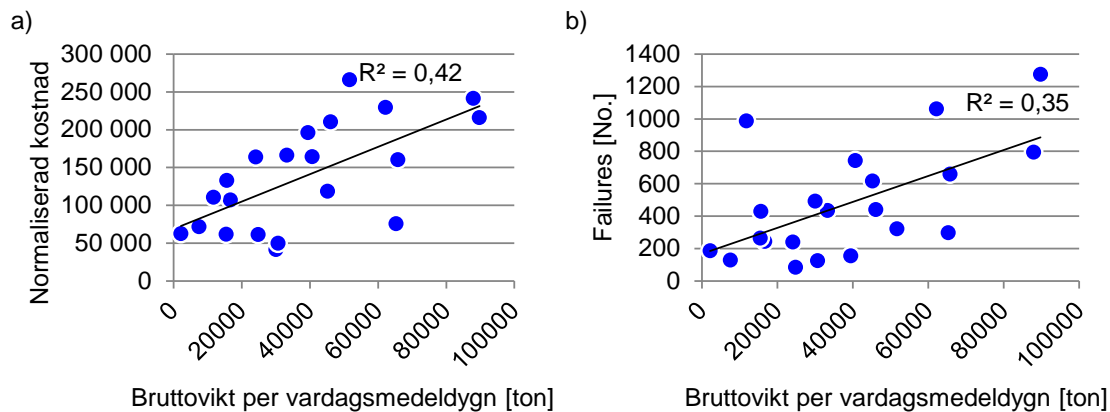
mer sofistikerat, t.ex. normalisering enligt antalet transformatorstationer och signalställverk.

kostnad-nytta-analysen beror till stor del på sannolikheten för detektering (α) och sannolikheten att potentiella fel utvecklas till funktionsfel (β). α beräknas utifrån insamlad underhållsdata och β fastställs med hjälp av tilldelad prioritet på potentiella fel och expertomdöme. I fallstudien beräknades kostnad-nytta för sju stråk tillsammans, men beräkningen kan lika gärna göras för ett specifikt system eller en specifik komponent. Det krävs i vilket fall en tillfredsställande datakvalitet för att kunna länka samman inspektioner, potentiella fel och funktionsfel. Fallstudiens sju stråk inkluderar, till exempel, 4 020 växelkryss där ett av delsystemen är kontrollanordning, vilket inkluderar kontaktdon för kontroll av växelposition. Beroende på växel, såsom tillåten tåghastighet, inkluderar växeln ett sådant kontaktdon. För att ge ett exempel antas att antalet kontaktdon är 4 020, och att dessa kontaktdon har samma feltyp och felfrekvens. Insamlad data om funktionsfel visar 153 funktionsfel i kontaktdon, vilka vardera kostar 18 060 SEK när merförseningskostnaden inkluderas. Om vi bortser från merförseningskostnaden, så uppgår kostnaden för varje funktionsfel till 7 030 SEK. Att byta ut de 4 020 kontaktdonen med ett omdesignat kontaktdon, vilket felar hälften så ofta, kostar 1 0 974 600 SEK, om man antar att varje kontaktdon kostar 1 000 SEK och har en utbyteskostnad som är lika med kostnaden för reparation av potentiella fel, dvs. $2\,730 - 1\,000 = 1\,730$ SEK. 76,5 funktionsfel undviks per år genom en investering på ungefär tio miljoner SEK. Om en diskonteringsränta på 4 % tillämpas, enligt vad som används av Trafikverket, ger detta ett positivt nettonuvärde efter nio år. Om man bortser från diskonteringsräntan fås en positiv nuvärde efter sju år. Dock är investeringen endast lönsam om kostnaden för merförseningar inkluderas, vilken i denna studie har satts till 530 SEK/minut. Se figur A.8.

Data om transporterad bruttovikt samlades in för 21 av de 65 bandelarna. Kartläggning av den normaliserade kostnaden som en funktion av bruttovikt per vardagsmedeldygn ges i figur A.9. Regressionslinjen ger ett lågt R^2 -värde, men om man jämför med funktionsfel kontra bruttovikt ges ett linknande R^2 -värde. Precis som angetts ovan, finns det många olika faktorer att beakta; detta är ett område som kan studeras vidare.



Figur A.8: Kontantflöden för investering i kontaktdon.



Figur A.9: Normaliserad kostnad som en funktion av bruttovikt per vardagsmedeldygn (a), och funktionsfel som en funktion av bruttovikt per vardagsmedeldygn (b).

Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) uppskattade att underhållskostnaden per växel i Sverige är 16 400 SEK per år (Hedström 2001). Som ett exempel på jämförelse, ger fallstudien 19 800 SEK per växel om man bortser från merförseningskostnader. När merförseningskostnader inkluderas fås 28 820 SEK per växel. VTI:s resultat grundar sig på bokföring vilket inkluderar kostnader som den presenterade metoden inte innefattar, såsom kostnader för växelbyte. En liknande jämförelse med bokföringssystemet för år 2013 är komplicerat eftersom underhåll ligger på entreprenad.

Den framlagda metoden inkluderar inte alla kostnader som avser underhåll, såsom upphandling, planering, administration och beredskap. Planeringskostnader bör vara högre för förebyggande underhåll än avhjälpande underhåll, medan beredskapskostnader bör vara högre för avhjälpande underhåll.

A.6 Slutsatser

I den här studien har kostnaderna för förebyggande och avhjälpande underhåll undersökts, tillsammans med en kostnad-nytta-analys, för att kunna bedöma värdet av förebyggande underhåll. Ekvationer formulerades för att tilldela kostnader till inspektioner, åtgärder av potentiella fel, reparationer av funktionsfel och service-/produktionsförluster. En fallstudie på järnvägar utfördes därefter.

I fallstudien visade det sig att de tio mest kostsamma bandelarna har fyra gånger så höga underhållskostnader gentemot de tio minst kostsamma bandelarna. De mest kostsamma bandelarna transporterade tre gånger så mycket bruttovikt gentemot bandelarna med lägst kostnad, och hade även 4,5 gånger så många spårfel.

Förebyggande underhåll står för $\approx 10-30\%$ av den totala underhållskostnaden när användarkostnader, dvs. merförseningar, inkluderas som en kostnad för avhjälpande underhåll. Fallstudien indikerade även att bandelarna med den lägsta totala underhållskostnaden har den högsta andelen av förebyggande underhåll, vilket kan sättas i samband med skillnaden i inspektionsklasserna.

Kostnad-nytta-förhållandet för förebyggande underhåll beräknades till 3,3, men denna siffra beror till stor del på indata, särskilt användarkostnaderna, som sattes till 530 SEK per merförseingsminut.

Den tillämpade metoden drar fördel av underhållsdata för att kunna uppskatta underhållskostnader. Detta kan vara fördelaktigt när bokföringen inte ger detaljerad information om underhållsåtgärder, t.ex. vid underhåll på entreprenad.

Referenser

ARMSTRONG, J.S., 1982. The value of formal planning for strategic decisions: Review of empirical research. *Strategic Management Journal*, 3(3), pp. 197-211.

ASCE, 2011. Failure to act: The economic impact of current investment trends in surface transportation infrastructure. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE).

BANVERKET, 2010. Handling 6.4.1: Entreprenadbeskrivning (EB) avseende drift och underhåll av järnvägsanläggning. Borlänge: Banverket.

BANVERKET, 2005. BVF 807.2: Säkerhetsbesiktning av fasta anläggningar. Borlänge: Banverket.

BOARDMAN, A., GREENBERG, D., VINING, A. and WEIMER, D., 2013. Cost-benefit analysis: Concepts and practice. 4th edn. Upper Saddle River, NJ: Pearson.

BONTEMPI, F., GKOUKAS, K. and ARANGIO, S., 2008. Systemic approach for the maintenance of complex structural systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, 4(2), pp. 77-94.

BOSTON, J. and PALLOT, J., 1997. Linking strategy and performance: Developments in the New Zealand public sector. *Journal of Policy Analysis and Management*, 16(3), pp. 382-404.

CHARLES, A.-., FLORU, I.-., AZZARO-PANTEL, C., PIBOULEAU, L. and DOMENECH, S., 2003. Optimization of preventive maintenance strategies in a multi-purpose batch plant: Application to semiconductor manufacturing. *Computers and Chemical Engineering*, 27(4), pp. 449-467.

CHRISTER, A.H. and WALLER, W.M., 1984. Reducing production downtime using delay-time analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 35(6), pp. 499-512.

DAVENPORT, T.H., HARRIS, J.G., DE LONG, D.W. and JACOBSON, A.L., 2001. Data to Knowledge to Results – building an analytic capability. *California Management Review*, 43(2), pp. 117-138.

DEKKER, R., 1996. Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), pp. 229-240.

FRANGOPOL, D.M., 2011. Life-Cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: Accomplishments and challenges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(6), pp. 389-413.

- GARG, A. and DESHMUKH, S.G., 2006. Maintenance management: Literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(3), pp. 205-238.
- HEDSTRÖM, R., 2001. Kriterier för byte alternativt fortsatt underhåll av spårväxlar [Criteria for replacement or maintenance of switches and cross-ings]. N20-2001. Linköping: Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- HUANG, S. and DISMUKES, J.P., 2003. Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis. *International Journal of Production Research*, 41(3), pp. 513-527.
- IEC, 2015. IEC 60050-192: International electrotechnical vocabulary - Part 192: Dependability. Geneva: International Electro-technical Commission (IEC).
- KARIM, R., CANDELL, O. and SÖDERHOLM, P., 2009. E-maintenance and information logistics: Aspects of content format. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(3), pp. 308-324.
- KHALIL, J., SAAD, S.M. and GINDY, N., 2009. An integrated cost optimisation maintenance model for industrial equipment. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(1), pp. 106-118.
- KUMAR, U., GALAR, D., PARIDA, A., STENSTRÖM, C. and BERGES, L., 2013. Maintenance performance metrics: A state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), pp. 233-277.
- LLOYD'S REGISTER CONSULTING, 2015. Riskbedömning av urspårning på grund av rälsbrott på bandel 124. 212103_R01. Sundbyberg: Lloyd's Register Consulting.
- MOUBRAY, J., 1997. *Reliability-Centered Maintenance*. 2nd edn. New York, NY: Industrial Press Inc.
- NISSEN, A., 2009. LCC for Switches and Crossings at the Swedish Railway - A Case Study. *International Journal of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADEM*, 12(2), pp. 10-19.
- NORRBIN, P., 2016. Maintenance strategy optimization for robustness of railway infrastructure: A case study of snow and ice protection for railway switches and crossings at Malmbanan. Artikel under utarbetande, .
- OECD, 2006. *Infrastructure to 2030: Telecom, land transport, water and electricity*. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- PARAHY, M., 2011. Cost effective availability enhancement of switches and crossings using reliability analysis, Luleå University of Technology.
- PARIDA, A. and CHATTOPADHYAY, G., 2007. Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(3), pp. 241-258.
- PEARCE, D., ATKINSON, G. and MOURATO, S., 2006. *Cost-benefit analysis and the environment*. 1st edn. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).

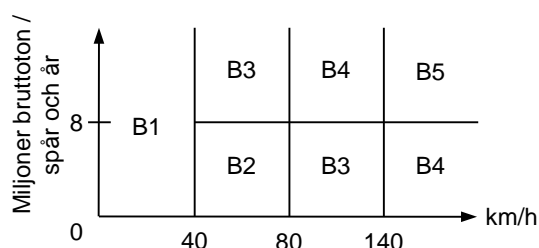
- SALONEN, A. and DELERYD, M., 2011. Cost of poor maintenance: A concept for maintenance performance improvement. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), pp. 63-73.
- SIMÕES, J.M., GOMES, C.F. and YASIN, M.M., 2011. A literature review of maintenance performance measurement: A conceptual framework and directions for future research. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), pp. 116-137.
- SINKKONEN, T., MARTTONEN, S., TYNNINEN, L. and KÄRRI, T., 2013. Modelling costs in maintenance networks. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), pp. 330-344.
- SIS, 1999. SS-EN 50126: Järnvägsanläggningar - Specifikation av tillförlitlighet, funktionssannolikhet, driftsäkerhet, tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet (RAMS). Stockholm: Swedish Standards Institute (SIS).
- SIS, 2000. SS 4410505: Tillförlitlighet - Ordlista. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute.
- SIS, 2010. SS-EN 13306: Maintenance terminology. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute.
- SÖDERHOLM, P. and BERGQUIST, B., 2015. Rail breaks: An explorative case study, ICRESH-ARMS 2015 2015, Luleå University of Technology.
- STENSTRÖM, C., 2014. Operation and Maintenance Performance of Rail Infrastructure: Model and Methods, Luleå University of Technology.
- SWANSON, L., 2001. Linking maintenance strategies to performance. *International Journal of Production Economics*, 70(3), pp. 237-244.
- THOFT-CHRISTENSEN, P., 2012. Infrastructures and life-cycle cost-benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(5), pp. 507-516.
- TRAFIKVERKET, 2010a. BVF 808.20: Felrapportering inom järnvägsinfrastruktur. Borlänge: Trafikverket.
- TRAFIKVERKET, 2010b. BVS 524.31: Oförstörande provning (OFP) av räler och rälskomponenter. Borlänge: Trafikverket.
- WIREMAN, T., 2010. Benchmarking best practices in maintenance management. 2 edn. New York, NY: Industrial Press.
- WSP, 2011. Trafikverkets järnvägsdatabaser - Innehåll, brister och förslag till förbättringar. 2011:3. Stockholm: WSP.

B Sammanfattande statistik

Denna bilaga sammanfattar den järnvägsdata som samlats in från Trafikverket och utgörs av: avhjälpande underhåll, dvs. funktionsfel; och förebyggande underhåll, dvs. inspektioner och åtgärdande av potentiella fel. Trafikverkets databaser för detta ändamål är Ofelia, LUPP, BESSY och BIS. Insamlad data inkluderar sju stråk som tillsammans består av 65 bandelar. Se Figur B.1 och Tabell B.1.

Tabell B.1: Insamlad data.

Tidsperiod	2013-01-01 – 2013-12-31, dvs. 1 år
Fel [ant.]	24 816, 24,7 % (6 131) tåg försenande
Inspektioner [ant.]	352 679
Potentiella fel [ant.]	52 854, 54 % (28 704) åtgärdade



Figur B.1: Inspektionsklasser.

B.1 Bandelar och inspektionsklasser

En beskrivning av bandelarna ges i tabell B.2. Inspektionsfrekvenserna beror på största tillåtna hastighet (STH) och bruttovikt; se figur B.1 och tabell B.3. Förutom dessa allmänna gränser, finns specifika gränser för feltyper, t.ex. storlek på spricka i material eller storlek på avvikelse i spärgeometri. En beskrivning av bandelar visas i tabellerna B.4 och B.5. Största tillåtna axellast (STAX) är enligt (Trafikverket 2013). Transportvolymerna kan inte ges på grund av konfidentialitet.

Tabell B.2: Stråk och bandelar för analys. Spår-km tar hänsyn till flera spår, t.ex. dubbla spår räknas två gånger.

Stråk	Bandelar	Antal bandelar	Spår-km	Antal växlar	Spårtyp
1	410, 412, 414, 416, 418, 419***, 420, 511, 512, 611, 612	11	979	792	Dubbel
2	421*, 422, 502, 504, 505, 810, 811, 813, 814, 815, 817, 909, 910, 912	14	1117	947	Dubbel
3	626, 627, 628, 630, 904*, 920*, 938, 940	8	531	393	Dubbel
4	641, 655, 720, 721, 821, 822, 823, 824, 827	9	413	305	Enkel
5	234, 235, 303, 429, 430**, 433****, 243**	7	629	634	Enkel
7	119, 120, 122, 124, 126, 129, 130, 138, 146, 211	10	723	701	Enkel
21	111, 112, 113, 114, 116, 118	6	467	248	Enkel
Summa:		65	4859	4020	

*Enkelt spår, **Dubbelt spår, ***Blandat (hälften enkelt och hälften dubbelt), ****Dubbla spår eller fler

Tabell B.3: Utdrag ur inspektionsfrekvens per system, klass och år.

Klass:	Inspektioner per klass och år				
	B1	B2	B3	B4	B5
Kontaktledning	1	1	1	1	1
Korsningskryss	2	2	3	3	3
OFP räl och växlar	1/4	1/3	1/2	1	1
Växlar	1	3	4	6	6
Signal	2	3	3	3	3
Signalering	1	1	1	1	1
Spår	1	2	3	3	3
Spårgeometri	1	3	4	6	6

*OFP = Oförstörande provning

Tabell B.4: Beskrivning av bandelarna. Utförda inspektioner per inspektionsklass grundar sig på insamlad data från år 2013.

Stråk	Bandel	Spår-km	Antal växlar	Spårtyp	STAX [ton]	STH [km/h]	Utförda inspektioner per inspektionsklass [%]					
							B1	B2	B3	B4	B5	Främsta klass
1	410	67	137	Dubbel	22.5	130	7	0	82	5	6	B3
1	412	37	45	Dubbel	22.5	200	1	3	66	10	20	B3
1	414	164	73	Dubbel	22.5	200	2	4	2	93	0	B4
1	416	125	38	Dubbel	22.5	200	1	2	0	97	0	B4
1	418	59	32	Dubbel	22.5	250	3	2	0	20	76	B5
1	419	40	98	Mix	22.5	-	7	6	41	7	40	B3/B5
1	420	14	44	Dubbel	22.5	200	6	11	82	1	0	B3
1	511	47	38	Dubbel	22.5	200	2	3	14	0	80	B5
1	512	231	172	Dubbel	22.5	200	9	10	4	77	0	B4
1	611	133	66	Dubbel	22.5	200	3	7	5	85	0	B4
1	612	71	49	Dubbel	22.5	180	6	0	0	94	0	B4
2	421	105	55	Singel	22.5	160	1	10	50	39	0	B3/B4
2	422	76	15	Dubbel	22.5	200	1	2	0	96	0	B4
2	502	11	57	Dubbel	22.5	200	8	47	29	16	0	B2/B3
2	504	10	55	Dubbel	22.5	180	9	40	51	0	0	B2/B3
2	505	153	85	Dubbel	22.5	200	4	5	42	49	0	B3/B4
2	810	12	60	Dubbel	22.5	140	9	9	39	43	0	B3/B4
2	811	173	88	Dubbel	22.5	200	2	5	0	0	93	B5
2	813	170	70	Dubbel	22.5	200	1	4	0	0	95	B5
2	814	101	136	Dubbel	22.5	200	10	7	20	0	62	B5
2	815	95	29	Dubbel	22.5	200	1	4	0	0	95	B5
2	817	13	80	Dubbel	22.5	200	9	36	49	0	6	B2/B3
2	909	6	85	Dubbel	22.5	-	16	22	53	0	9	B3
2	910	56	12	Dubbel	22.5	200	0	3	0	0	97	B5
2	912	102	120	Dubbel	22.5	200	4	3	9	0	84	B5
3	626	47	49	Dubbel	22.5	180	6	4	0	90	0	B4
3	627	242	122	Dubbel	22.5	200	7	3	2	89	0	B4
3	628	87	88	Dubbel	22.5	200	6	2	11	81	0	B4
3	630	16	44	Dubbel	22.5	200	12	11	3	74	0	B4
3	904	7	37	Singel	22.5	-	7	0	89	4	1	B3
3	920	27	15	Singel	22.5	180	0	20	7	72	0	B4
3	938	74	14	Dubbel	22.5	200	0	0	2	31	67	B5
3	940	22	24	Dubbel	22.5	200	2	0	20	34	44	B4/B5
4	641	66	18	Singel	22.5	140	8	0	92	0	0	B3
4	655	6	58	Singel	22.5	100	24	22	55	0	0	B3
4	720	55	65	Singel	22.5	160	5	8	26	61	0	B4

Tabell B.4: Forts.

Stråk	Bandel	Spår-km	Antal växlar	Spårtyp	STAX [ton]	STH [km/h]	Utförda inspektioner per inspektionsklass [%]					
							B1	B2	B3	B4	B5	Främsta klass
4	721	97	33	Singel	22.5	160	8	7	86	0	0	B3
4	821	18	13	Singel	22.5	160	0	6	30	64	0	B3/B4
4	822	58	30	Singel	22.5	160	3	8	20	70	0	B4
4	823	57	19	Singel	25.0	130	1	12	86	1	0	B3
4	824	53	11	Singel	22.5	200	2	3	18	77	0	B4
4	827	6	58	Singel	22.5	140	30	15	54	0	0	B1/B3
5	234	10	44	Singel	22.5	130	13	19	69	0	0	B3
5	235	214	147	Singel	22.5	200	6	5	2	35	52	B5
5	303	14	128	Singel	22.5	140	27	39	34	0	0	B1/B2/B3
5	429	8	68	Singel	22.5	160	10	2	87	0	0	B3
5	430	55	23	Dubbel	22.5	200	1	0	0	99	0	B4
5	433	94	126	Två el. fler	22.5	200	4	3	6	86	1	B4
5	434	212	98	Dubbel	22.5	200	3	2	1	94	0	B4
7	119	33	35	Singel	30.0	140	21	10	0	69	0	B4
7	120	17	130	Singel	22.5	120	48	20	0	32	0	B1
7	122	5	124	Singel	22.5	-	67	33	0	0	0	B1
7	124	175	91	Singel	22.5	160	11	0	3	82	4	B4
7	126	106	36	Singel	25.0	140	10	1	0	89	0	B4
7	129	130	41	Singel	25.0	160	6	0	3	86	5	B4
7	130	91	55	Singel	25.0	130	10	2	0	88	0	B4
7	138	6	51	Singel	22.5	-	47	0	43	9	0	B1/B3
7	146	31	68	Singel	22.5	135	29	0	71	0	0	B3
7	211	131	70	Singel	22.5	120	1	9	9	82	0	B4
21	111	125	55	Singel	30.0	130	4	4	5	88	0	B4
21	112	8	34	Singel	30.0	100	16	8	55	22	0	B3
21	113	102	53	Singel	30.0	160	9	6	73	12	0	B3
21	114	17	38	Singel	22.5	100	35	4	60	0	0	B3
21	116	37	4	Singel	30.0	80	3	3	94	0	0	B3
21	118	163	64	Singel	22.5	135	16	0	1	83	0	B4

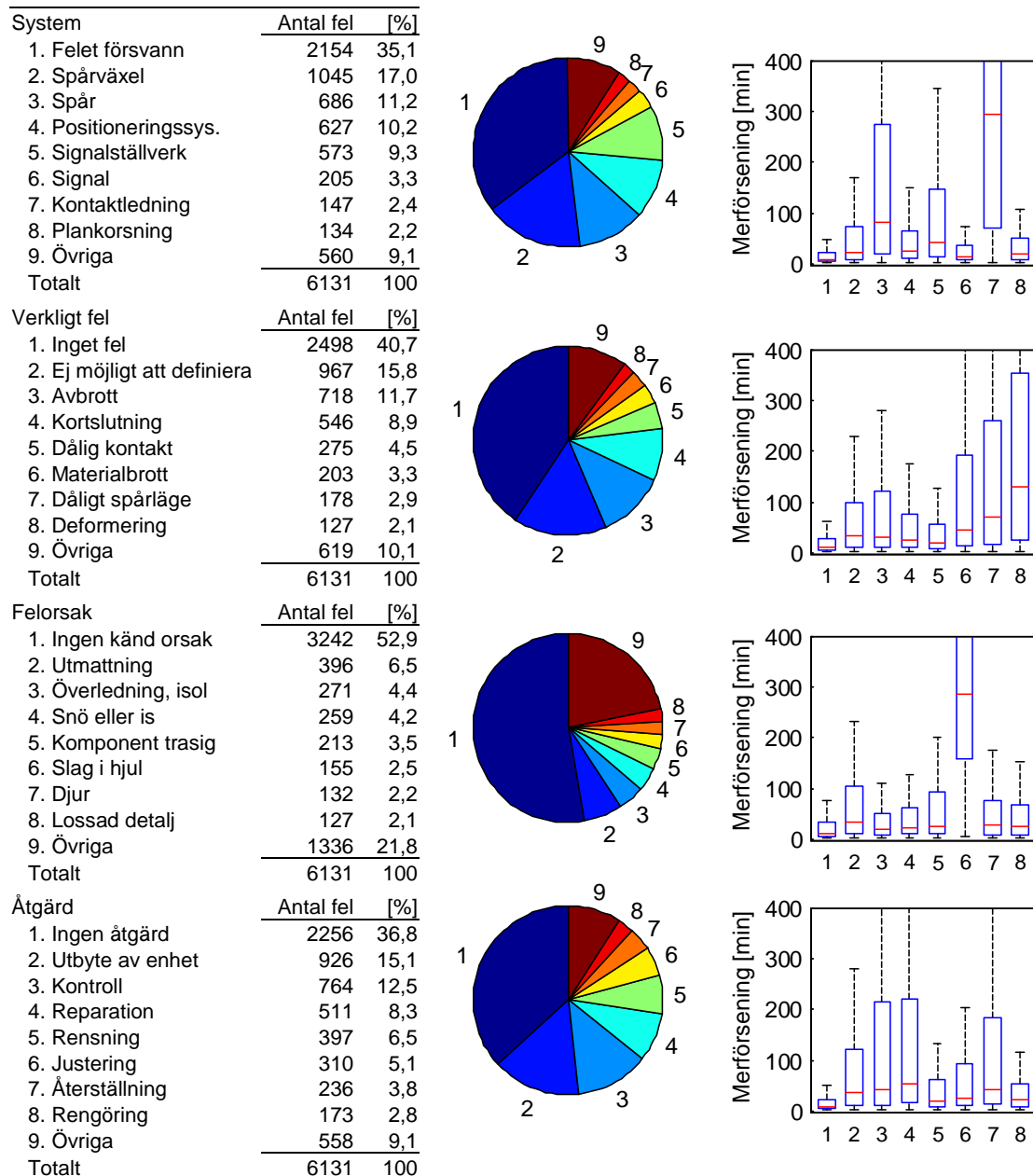
B.2 Data om avhjälpande underhåll

Sammanfattande statistik över tågforsenande fel visas i figur B.2. Vad beträffar lädagram på merforseningar i figur B.2, är mittenmärket i varje låda medianen, kanterna på lådan är 25:e och 75:e percentilerna, och min/max-linjerna sträcker sig till 1,5 IQR (kvartilavstånd). Utliggare utelämnas.

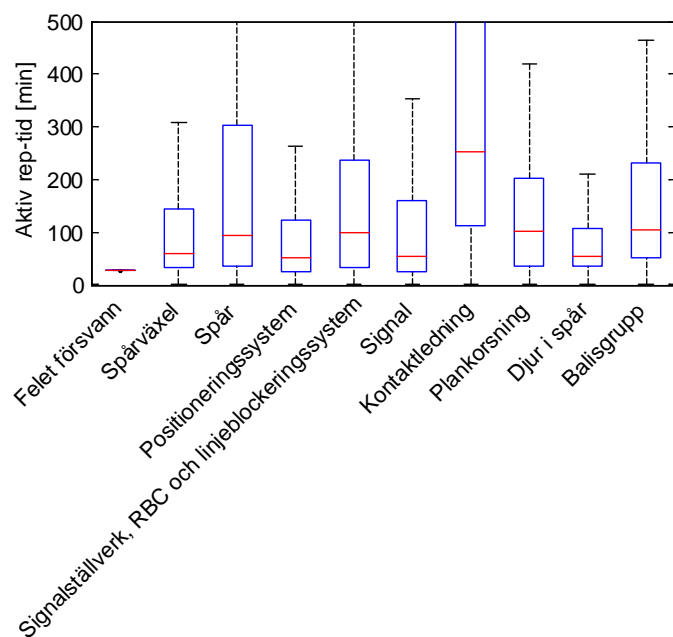
Reparationstiden och inställetiden blir tillsammans återställetiden, även kallat nertid eller otillgänglig tid. Strikt sett ska även administrativa tiden (drift-centralernas tid för vidareanmälan) även inkluderas, men den är vanligtvis end-

ast kring fyra minuter. Exempel på reparationstiden och inställetiden ges i figurerna B.3 och B.4.

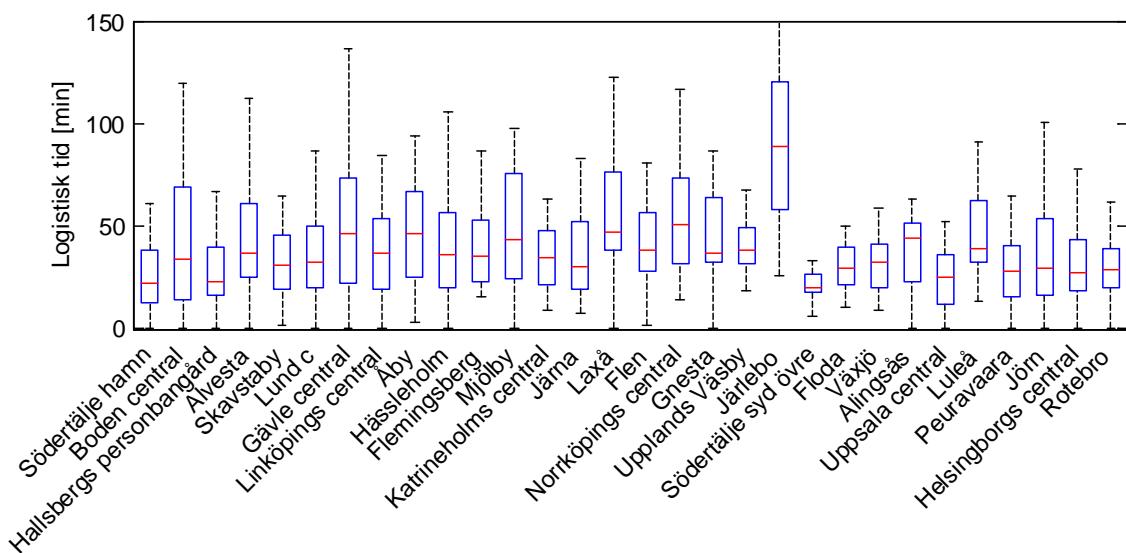
Exempel på utliggare ges i tabell B.5. Tabellen ger korta beskrivningar av de fem felen med den längsta totala merförseningen, de fem felen med den längsta logistiktiden och de fem felen med den längsta reparationstiden. Endast tågförse-
nande fel inkluderas, vilket betyder att varje fel har resulterat i merförseningar på totalt fem minuter eller längre. Merförsening till följd av ett fel kan komma från flera olika tåg.



Figur B.2: Sammanfattande statistik över merförsenande fel.



Figur B.3: Exempel på reparationstider (underhållsmässighet) för funktionsfel som orsakade merförseningar.



Figur B.4: Exempel på inställetid (underhållssäkerhet) för funktionsfel som orsakade merförseningar.

Tabell B.5: De främsta tågförseende felen vad beträffar total merförsening, logistiktid och reparationstid.

Beskrivning	Orsak/åtgärd vidtagen	Merförsening [min]	Logistiktid [min]	Reparationstid [min]
De fem längsta tågförseningarna				
Förlust av krafttillförel. Kontaktledningsfel	Förmodligen nedfallet träd. Utbyte av signal-skåp	>1000	55 min	>1 dag
Urspårat tåg. Tre vagnar	Reparation	>1000	84 min	>1 dag
Kontaktledning ramlat	Utmattning och reparation	>1000	46 min	16 timmar
Urspårat tåg. Två vagnar	Reparation	>1000	123 min	>1 dag
Ställverk. Åska.	Åska. Bytte av signal-skåp	>1000	27 min	16 timmar
De fem längsta logistiktiderna				
Nätstationsfel	Spole trasig i manöverdon	831	>1 dag	>1 dag
Växlar ur kontroll	Snö och is i växlarna. Värmesystem slogs på för sent	108	>1 dag	0 timmar
Varmgångsdetektor utlöser larm på alla axlar	Fel på enhet och byte av enhet	68	>1 dag	3,8 timmar
Fel på ställverk	Trasigt och utbytt relä	33	>1 dag	3 timmar
Vattenförsörjning i teknikhus ur funktion	Inspektion och reparation	5	>1 dag	>1 dag
De fem längsta reparationstiderna				
Dålig spårgeometri	Byte av slipers	>1000	28 min	>1 dag
Vägbank ger med sig	Vägbank reparerad	23	170 min	>1 dag
Odefinierat signalfel	Inget fel hittades	6	45 min	>1 dag
Jordskredsdetektor larmat flera ggr under det senaste åren	Larmkabel utbytt	287	62 min	>1 dag
Rälsbrott provisoriskt reparerat. Dagliga inspektioner	Rälsbyte	5	0 min	>1 dag

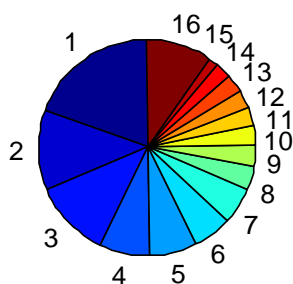
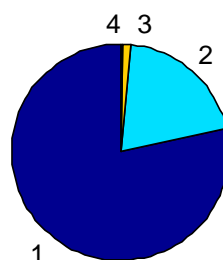
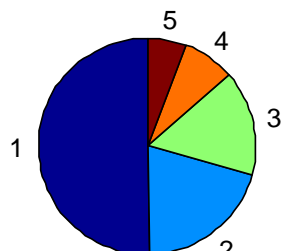
B.3 Data om förebyggande underhåll

Sammanfattande statistik över utförda inspektioner och åtgärdade potentiella fel visas i figurerna B.5 och B.6. Med beaktande av figur B.6, har potentiella fel olika prioritet; se tabell 1.

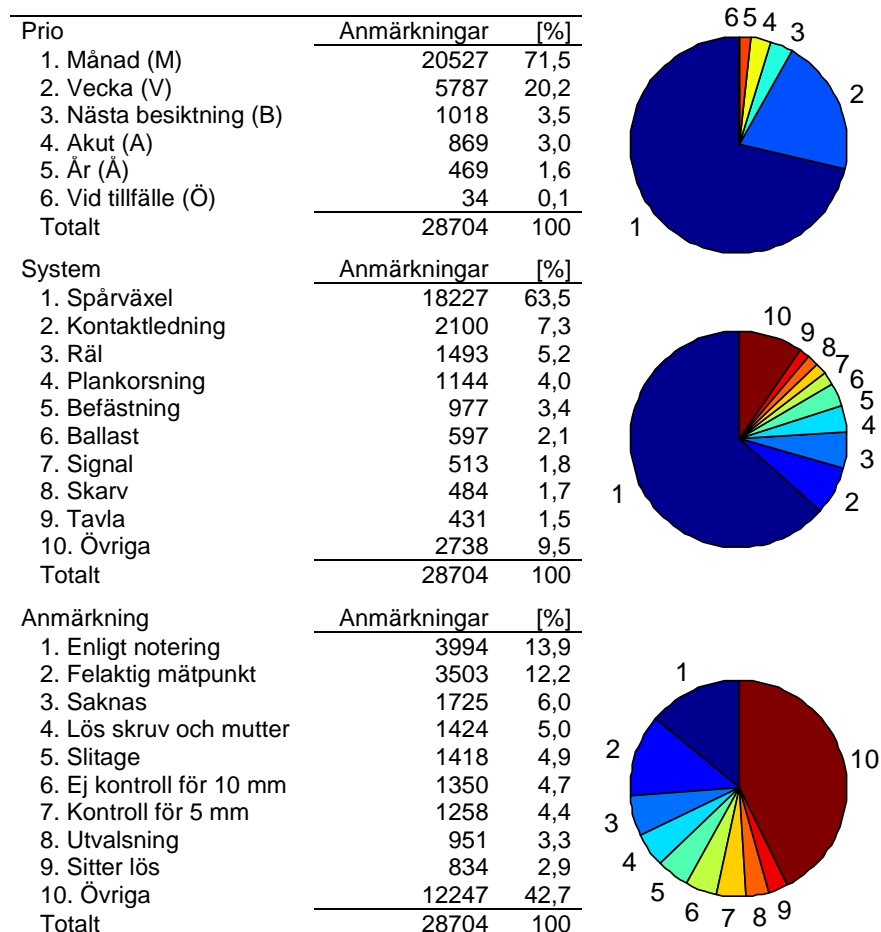
Klass	Inspektioner	[%]
1. B4	177292	50,3
2. B3	71914	20,4
3. B5	55768	15,8
4. B1	27365	7,8
5. B2	20339	5,8
Totalt	352678	100

Typ	Inspektioner	[%]
1. Säkerhet	276649	78,4
2. Underhåll	70532	20,0
3. OFP	4388	1,2
4. Övriga	1109	0,3
Totalt	352678	100

System	Inspektioner	[%]
1. Tavla	68487	19,4
2. Skarv	42097	11,9
3. Signal	40492	11,5
4. Dränering	26915	7,6
5. Balisgrupp	24204	6,9
6. Trumma	21182	6,0
7. Spårväxel	19157	5,4
8. Räl	11787	3,3
9. Byggnad	11676	3,3
10. Sliper	9870	2,8
11. Befästning	9867	2,8
12. Ballast	9679	2,7
13. Underballast	9670	2,7
14. Skärning	7890	2,2
15. Hägnad	5235	1,5
16. Övriga	34470	9,8
Totalt	352678	100



Figur B.5: Sammanfattande statistik över utförda inspektioner.



Figur B.6: Sammanfattande statistik över åtgärdade potentiella fel (inspektion-sanmärkningar).

Referenser

Trafikverket, 2013. *Järnvägsnätsbeskrivning 2015*. Borlänge, Sverige: Trafikverket.

