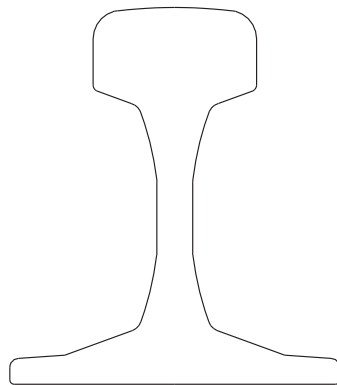


# Åtgärds- och effektmodell för effektivare underhåll av järnvägar



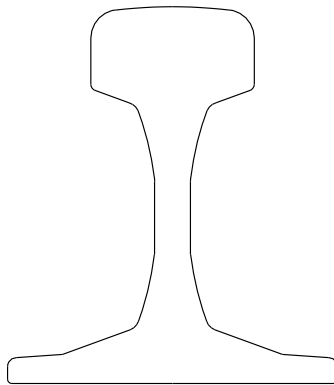
Christer Stenström  
Aditya Parida



Forskningsrapport

# Åtgärds- och effektmodell för effektivare underhåll av järnvägar

Christer Stenström  
Aditya Parida



Järnvägstekniskt Centrum (JVTC), Luleå

Avdelningen för drift, underhåll och akustik  
Luleå tekniska universitet

2013-09-02

Tryck: Universitetstryckeriet, Luleå

ISSN: 1402-1528

ISBN 978-91-7439-720-8 (tryckt)

ISBN 978-91-7439-721-5 (pdf)

Luleå 2013

[www.ltu.se](http://www.ltu.se)

## Sammanfattning

Järnvägar är stora kapitalintensiva system bestående av både elektriska och mekaniska delsystem, och följaktligen är dess drift och underhåll omfattande med många intressenter inblandade. Järnvägar och infrastrukturförvaltare utgörs av tekniska och organisatoriska nivåer, mao.: system-, delsystem- och komponentnivå, samt strategisk, taktisk och operativ nivå. Syftet med detta projekt är att ta fram en metod för att underlätta utveckling av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet i järnvägar. Modellen ska integrera både tekniska och organisatoriska perspektiv, vertikalt såväl som lateralt. Detta omfattar åtskilliga mål, hundratals indikatorer och parametrar, datainsamling och aggregering av data.

Arbetet som har genomförts är enligt följande:

- Övergripande kartläggning av Trafikverkets drift och underhåll av järnvägar, genom intervjuer och litteraturstudie (Avsnitt 4.1).
- Indikatorer och parametrar för mätning av tillförlitlighet inom järnvägar har kartlagts och jämförts med SS-EN 15341:2007, 'Nyckelprestations-indikatorer', för att fungera som referens. Ungefär 120 indikatorer och parametrar har identifierats, varav 11 är likartade med nyckeltal i SS-EN 15341 (Avsnitt 4.2 och Bilaga A).
- En åtgärds- och effektmodell har tagits fram för att underlätta utveckling och kontinuerlig förbättring av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet i järnvägar. Modellen grundar sig på cykeln planera-genomföra-utvärdera-förbättra med betoning på huvudfaktorerna för strategisk planering. En fallstudie på Malmbanan, har gjorts för att verifiera och demonstrera metoden (Avsnitt 4.3).
- Inom fallstudien utvecklades ett drift- och underhållsindex baserat på funktionsfel och tågförseningar med lika viktning (Avsnitt 4.3).
- Index för drift och underhåll utvecklades vidare som en fortsättning på fallstudien för att även inkludera underhållstider, samt lika viktning, beroendeviktning och viktning från expertomdöme, mao. kvantitativ och kvalitativ viktning (Avsnitt 4.4).
- Inverkan av kallt klimat på funktionsavbrott i järnvägar har studerats i en annan fallstudie på Malmbanan och Kust-till-kust-banan (Avsnitt 4.5).
- En programvara för tillförlitlighet, dvs. RAMS-analys (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet/underhållssäkerhet), för järnvägar har utvecklats för att demonstrera kostnadseffektiva analyser, datapresentation och simulering (Avsnitt 4.6 och Bilaga B).
- Som en förstudie har underhållstid i spår mellan tågägen simulerats med avseende på den faktiska tiden för underhåll som funktion av kapacitetsnyttjande, uppställnings-/uppröjningstid och erforderad aktiv tid för reparation (Avsnitt 4.7).

Den gemensamma faktorn i arbetet är tillförlitlighet, dvs. RAMS. Arbetet som har genomförts i detta projekt går att tillämpa enligt följande:

- De kartlagda indikatorerna och parametrarna för mätning av tillförlitlighet kan användas som referens vid utveckling av underhållssystem och styrkort för drift och underhåll av järnvägar. Väl definierade indikatorer underlättar även övervakning av trender och benchmarking (jämförelse).
- Åtgärds- och effektmodellen kan användas i planeringsprocessen av drift och underhåll. Den underlättar: nedbrytning av mål; insamling, analys och presentation av data; kontinuerliga förbättringar; och vid definiering av huvudfaktorer för strategisk planering.

- De framtagna drift- och underhållsindex kan implementeras i infrastrukturförvaltares styrkort för att övervaka järnvägars tillförlitlighet i ett fåtal mått. Andra individuella indikatorer kan även beaktas för ytterligare utveckling.
- Studien om kallt klimat ger insikt i årstidernas inverkan på funktionsfel i järnvägar: i norra och södra Sverige, på system- och delsystemnivå, is- och snörelaterade fel, fel som inte är relaterade till is och snö, temperaturrelaterade fel och årliga avvikelser. Fel- och underhållsprognoser kan göras men med låg precision.
- Den framtagna programvaran för tillförlitlighetsanalys (RAMS) kan användas för analys och övervakning av järnvägar i Sverige. Matlab-koden kan användas som fristående programvara. Det är även möjligt att låta en programmerare att fortsätta utvecklingen av programmet, tex. lägga till förebyggande underhåll. Detsamma gäller för simuleringsverktyget för underhållstid i trafikerade spår; även det framtaget i Matlab.

Dataanalys i det här projektet har behandlat arbetsordrar för funktionsfel, tågförseningar och underhållstider, dvs. avhjälpande underhåll. Vidare forskning på området kan inkludera förebyggande underhåll, följt av monetära kostnader och trafik. Detta skulle sedan ge ett förhållande mellan avhjälpande och förebyggande underhåll. Genom att vidare jämföra en uppsättning bandelar kan en balans mellan avhjälpande och förebyggande underhåll erhållas. Även avkastningen på underhålls-investerings-scenarier skulle då kunna simuleras. Detta ska genomföras i ett fortsättningsprojekt av åtgärds- och effektmodellen. Vidare fortsatt forskning hittas i Avsnitt 6.2.

**Nyckelord:** Järnvägar, tågförseningar, Malmbanan, drift och underhåll, tillförlitlighet, funktions-säkerhet, driftsäkerhet, tillgänglighet, underhållsmässighet, underhållssäkerhet, säkerhet

## **Förord**

Arbetet i denna rapport har utförts inom forskningsämnet drift och underhållsteknik vid Järnvägstekniskt Centrum (JVTC) och Luleå tekniska universitet (LTU).

Forskningsmedel till projektet samt drift- och underhållsdata har tillhandahållits av Trafikverket (TRV). Historiska väderdata har tillhandahållits av SMHI.

Följande personer vid Trafikverket har bidragit till projektet:

Per Hurtig, Vivianne Karlsson, Ulla Ericson, Peter Söderholm, Stefan Jonsson, Helena Eriksson, Veronica Henriksson, Hans Morin, Monika Knutsen, Håkan Sjödin, Jan Spännar, Per Kvick, Rikard Granström, Kenneth Natanaelsson och Arne Nissen.

Följande personer vid Luleå tekniska universitet har bidragit till projektet:

Ulla Juntti (LTU och Performance in Cold), Diego Galar, Stephen Famurewa, Per Norrbin, Per-Olof Larsson-Kråik (LTU och TRV), Matti Rantatalo, Uday Kumar, Veronica Jägare och Matthias Asplund.





# Innehåll

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.1.1 Behovet av att mäta tillförlitlighet i järnvägar.....	1
1.1.2 Behovet av harmonisering och standardisering.....	1
1.1.3 Behovet av åtgärds- och effektmodell.....	1
1.2 Problemuppställning.....	2
1.3 Syfte.....	2
1.4 Mål.....	2
1.5 Tillvägagångssätt.....	2
1.6 Begränsningar.....	3
1.7 Disposition.....	3
2 Litteraturoversikt.....	5
2.1 Tillförlitlighet och RAMS <sup>4</sup> .....	5
2.2 Tillförlitlighet i underhållsfunktionen.....	7
2.3 Styrkort och ledningssystem.....	7
2.4 Utmaningar i implementeringsprocessen.....	8
2.5 Strategisk planering.....	9
2.6 Drift- och underhållsprocessen.....	9
2.7 Avreglering och kontraktering av drift och underhåll i järnvägar.....	11
2.8 Åtgärds- och effektmodell.....	12
3 Datainsamling.....	13
3.1 Intervjuer och information från sakkunniga.....	13
3.2 Insamling av data om drift och underhåll.....	14
4 Sammanfattning av resultat.....	17
4.1 Teknisk rapport: Mätning av tillförlitlighet i järnvägsinfrastruktur med fokus på Trafikverket.....	17
4.1.1 Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar.....	17
4.1.2 Styrkort och benchmarking.....	18
4.1.3 Punktlighet och regularitet.....	18
4.1.4 Ytterligare iakttagelser.....	19
4.2 Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar.....	19
4.3 Åtgärds- och effektmodell: Modellutveckling och fallstudie.....	20
4.3.1 Dynamiskt system för mätning av tillförlitlighet.....	20
4.3.2 Utveckling av modellen.....	21
4.3.3 Fallstudie.....	23
4.4 Konstruktion av index för drift och underhåll av järnvägar.....	29
4.4.1 Teori.....	29
4.4.2 Insamling av data.....	29
4.5 Effekten av kallt klimat på funktionsfel i järnvägar.....	31

4.5.1 Bakgrund .....	31
4.5.2 Resultat .....	32
4.6 Programvara för analys av tillförlitlighet (RAMS) .....	34
4.7 Simulering av underhållstid i spår .....	35
4.7.1 Resultat .....	35
5 Diskussion .....	39
5.1 Mål .....	39
6 Slutsatser och framtida forskning .....	43
6.1 Slutsatser .....	43
6.2 Fortsatt forskning .....	44
Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar .....	47
Programvara för tillförlitlighet (RAMS) .....	55
Referenser .....	63

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Järnvägstrafiken har ökat under det senaste decenniet och förväntas öka ytterligare eftersom passagerar- och godstransporter alltmer övergår från väg till järnväg. Detta till följd av stigande energikostnader, överbelastning av vägar och luftrum och ett strängare krav på minskade utsläpp (EC 2010, EC 2011). Övergripande målen i 2011 års vitbok om europeiska transportsystemet omfattar en 50 % övergång vad beträffar passagerartrafik och godstransporter på medellånga distanser från väg till järnväg och sjöfart, och en 60 % minskning av koldioxidutsläpp senast år 2050 (EC 2011). Konventionella oljeproduktionen nådde samtidigt sin produktionstopp under 2006 (IEA 2010). För att uppfylla de nya kraven inom transportsektorn måste järnvägens tillförlitlighet och kapacitet förbättras, och så även dess intermodalitet mellan länder och transporttyper.

### 1.1.1 Behovet av att mäta tillförlitlighet i järnvägar

Mätning av tillförlitlighet i denna rapport avser både strategisk och operativ nivå, såväl som tekniska och organisatoriska perspektiv.

Järnvägar är kapitalintensiva med lång livscykel och kräver därför övervakning av dess tillförlitlighet, med god framförhållning. Detta görs genom att övergripande mål bryts ner i mer specifika delmål, följt av uppdatering av indikatorer. Exempel på indikatorer finnes inom tillförlitlighet, dvs. RAMS (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet/underhållssäkerhet). Mätning innebär insamling av data, men eftersom rådata inte tillhandahåller någon information i sig själv, måste den bearbetas före användning. Detta tar upp resurser, särskilt om felaktig data samlas in, dvs. den data som inte är enligt de övergripande målen. Ett bra fungerande underhållssystem kräver dock inte en hög nivå av precision; det är viktigare att känna till indikatorernas trenderörelser, nämligen nuvärdet gentemot historiska värden (W. Kaydos 1991). Kontinuitet är därför särskilt viktigt för att fånga upp långtidstrender, förutse framtida utveckling och vidta lämpliga åtgärder i ett tidigt skede. Underhållsprocessen och dess underhållssystem måste även vara flexibelt och klara av multipla intressenter, motstridiga krav och målsättningar, samt organisatoriska och tekniska förändringar.

För diskussion om utveckling av underhållsstrategier för järnvägsinfrastruktur, se U. Espling mfl. (2004).

### 1.1.2 Behovet av harmonisering och standardisering

Mobilitet underlättar ekonomisk tillväxt, skapande av arbetstillfällen och kulturellt lärande. Ökad interoperabilitet och byggande av ett transeuropeiskt järnvägsnät är mål inom Europeiska unionen (EC 1991, EC 1996). Som en följd har harmonisering och standardisering av järnvägar mellan länder ökat. Harmonisering och standardisering av strategisk planering och metoder för att mäta tillförlitlighet gör benchmarking möjligt, dvs. jämförelse för att fastställa bästa praxis. Standardisering kan även minska behovet av att diskutera definitioner och metoder (J. Kahn et al. 2011).

### 1.1.3 Behovet av åtgärds- och effektmodell

Järnvägar är stora linjära system bestående av både elektriska och mekaniska undersystem. Dess infrastrukturförvaltare är därför omfattande med många intressenter inblandade. Både järnvägsinfrastrukturen och infrastrukturförvaltarna består av flera olika nivåer: system-, undersystem- och komponentnivå, samt strategiska, taktiska och operativa nivåer. Syftet med en åtgärds- och effektmodell är att underlätta utveckling av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet i järnvägar. Modellen ska integrera både de tekniska och organisatoriska perspektiven, vertikalt såväl som lateralt. Detta inbegriper åtskilliga mål, hundratals indikatorer och parametrar, datainsamling och aggregering av data. En genomgripande analys krävs därför för att kunna utveckla ett effektivt underhållssystem. Se Kapitel 2 för mer bakgrundsinformation om behovet av en åtgärds- och effektmodell.

## 1.2 Problemuppställning

Överbelastning av vägar och luftrum, ökande energikostnader och behovet av att minska utsläpp har resulterat i ett ökat bruk av järnvägar och följaktligen har behovet av kapacitet inom järnvägar ökat (EC 2010, EC 2011). Järnvägskapaciteten kan förbättras (antagande) genom att: expandera infrastrukturen, introducera bättre teknologi, och genom att förbättra drift och underhåll. Att koppla strategiska mål till indikatorer och styrkort (tex. balanserade styrkort) har visats resultera i mer ändamålsenlig och effektiv ledning (R.S. Kaplan et al. 1992, R.S. Kaplan et al. 1993). Men implementeringsprocessen för ett nytt lednings- eller underhållssystem är dock kritisk för att lyckas (M. Bourne et al. 2002, A. Schneiderman 1999). A. Schneiderman (1999) observerade att styrkort måste ses som toppen av ett isberg beträffande kontinuerliga förbättringar. Organisationer använder olika verktyg för att samla in data för analys, men dessa verktyg används dock ofta sporadiskt och ostrukturerat för tillfälliga/improviserade lösningar. Med bättre mätning av tillförlitlighet i järnvägar kan kraven på kapacitet och tillförlitlighet uppfyllas. Detta problem har även beaktats i andra järnvägsprojekt, såsom AUTOMAIN (Augmented usage of track by optimisation of maintenance, allocation and inspection of railway networks) och BGLC (Bothnian green logistic corridor). Genom bättre användning av drift- och underhållsdata kan underhållsplanering och optimering av förebyggande underhåll minska kostnader, tågförseningar och underhållstider. Väl definierade och kontinuerligt uppdaterade indikatorer kan även användas för att identifiera bästa praxis, tex. mellan olika bandelar.

## 1.3 Syfte

Utveckla en åtgärds- och effektmodell för effektivare underhåll av järnvägar.

## 1.4 Mål

Mer specifikt är målen följande:

1. Kartlägga Trafikverkets drift och underhåll av järnvägar
2. Utveckla stegvis införsel av LCC (livscykelkostnadsanalys) och RAMS i underhållskontrakt
3. Utveckla likartade metoder och verktyg för utbyte av data bland intressenter, dvs. infrastrukturförvaltare, trafikföretag, leverantörer, entreprenörer, etc.
4. Utveckla en åtgärds- och effektmodell för att mäta och övervaka ändringar som påverkar driften av järnvägar

## 1.5 Tillvägagångssätt

### Fas I

1. Litteraturstudie och intervjuer för att kartlägga drift och underhåll av järnvägar
2. Identifikation av faktorer för ledning, strategi och policy för effektivare drift och underhåll av järnvägar
3. Identifikation av nyckeltal och resultatområden för effektivare drift och underhåll av järnvägar

### Fas II

1. Tillämpa åtgärds- och effektmodellen i en fallstudie för verifiering och demonstration
2. Baserat på resultaten från fallstudien, kommer en implementeringsplan för åtgärds- och effektmodellen att formuleras

## **1.6 Begränsningar**

Studien fokuserar huvudsakligen på åtgärds- och effektmodell inom ramen för drift och underhåll av järnvägar, mao. infrastrukturen. En fallstudie kommer även att göras för att verifiera och demonstrera modellen.

## **1.7 Disposition**

Kapitel 2 redogör litteraturstudien rörande mätning och övervakning av tillförlitlighet. Kapitel 3 beskrivs processen för datainsamling. Inom detta projekt har en teknisk rapport och ett antal artiklar publicerats; dessa sammanfattas i Kapitel 4. Resultaten diskuteras i Kapitel 5, följt av slutsatser och möjligheter för fortsatt forskning i Kapitel 6. Rapporten innehåller även två bilagor, en avseende indikatorer och parametrar för tillförlitlighet inom järnvägar, och en annan som demonstrerar mjukvaran för analys av järnvägars tillförlitlighet.

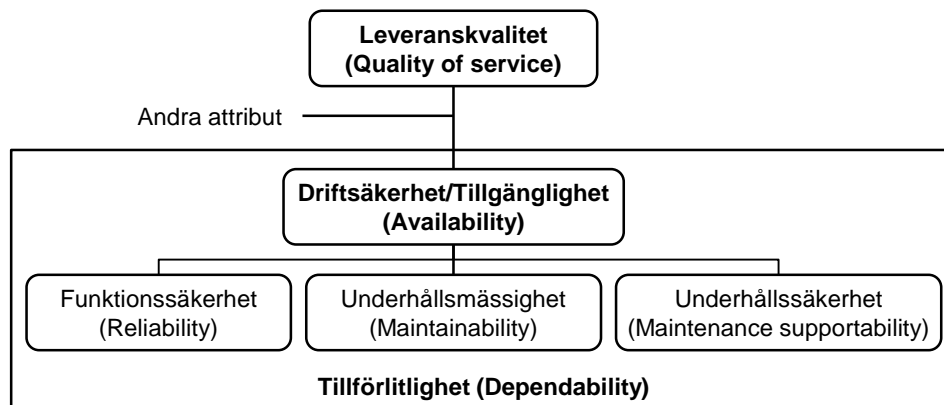


## 2 Litteraturoversikt

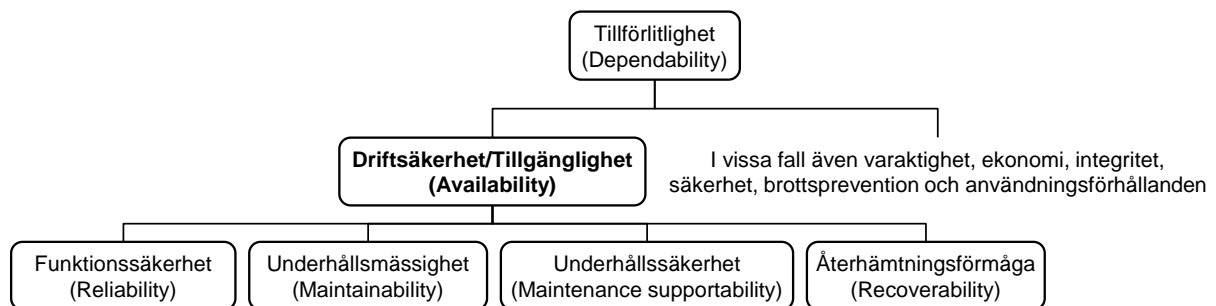
Detta kapitel går igenom forskningsämnet grundläggande begrepp och definitioner, och ger även en bakgrund till åtgärds- och effektmodellen.

### 2.1 Tillförlitlighet och RAMS<sup>4</sup>

Tillförlitlighet är en central term inom drift och underhåll som visar på dess komplexitet i en kompakt form. En vanlig beskrivning av termen är den av International Electrotechnical Commission (IEC) (Figur 1). En annan beskrivning ges av SS-EN 13306:2010 (Figur 2), samt en tredje av International Journal of Performability Engineering (IJPE), som även tar med hållbarhet (Figur 3).

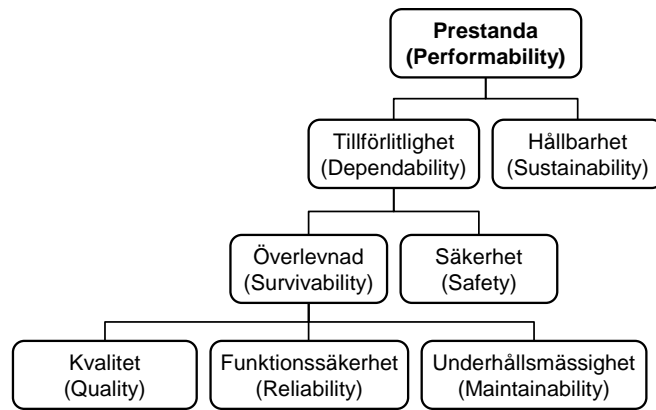


**Figur 1:** Tillförlitlighet och RAMS (funktionssäkerhet, tillgänglighet/driftsäkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet) som beskrivs av den internationella elektrotekniska kommissionen. Bearbetat från (IEC 1990).

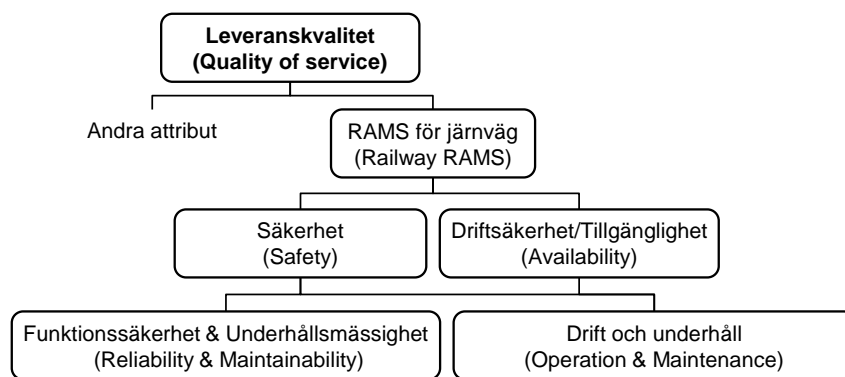


**Figur 2:** Tillförlitlighet och RAMS enligt SS-EN 13306:2010. Bearbetat från (CEN 2010).

RAMS (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet) återfinns inom både IEC och CEN. Bokstaven S i RAMS kan dock stå för underhållssäkerhet (maintenance supportability), säkerhet (safety), brottsprevention (security), såväl som hållbarhet (sustainability), dvs. RAMS<sup>4</sup>. I Figurerna 1 och 2 står bokstaven S för underhållssäkerhet, men i Figur 3 och vad beträffar järnvägar står den för säkerhet, såsom i järnvägsspecifikationen i SS-EN 50126:1999, Figur 4 (CEN 1999).

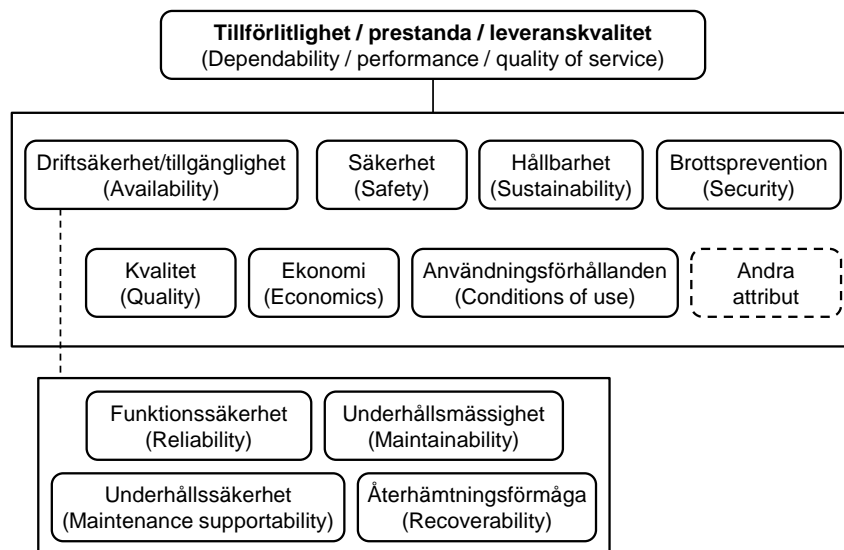


**Figur 3:** Prestanda och tillförlitlighet beskrivet av International Journal of Performability Engineering (IJPE).



**Figur 4:** Leveranskvalitet, tillförlitlighet och RAMS för järnvägar (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet). Bearbetat från (CEN 1999).

Figurerna 1-4 visar att det finns ett antal definitioner av tillförlitlighet, leveranskvalitet och prestanda. Vid harmonisering fås något liknande Figur 5.



**Figur 5:** Harmonisering av IEV, SS-EN 13306, IJPE och SS-EN 13306, som tillsammans inkluderar RAMS<sup>4</sup>.



En annan term inom järnvägar är robusthet (teknisk robusthet):

*Förmåga att upprätthålla funktion trots störningar* (Trafikverket 2012a)

Definitioner liknande Trafikverkets ovan används även av andra verk och organisationer. En nära relaterad term är driftsäkerhet:

*Förmågan hos en enhet att kunna utföra krävd funktion under angivna betingelser vid ett givet tillfälle eller under ett angivet tidsintervall, förutsatt att erforderliga stödfunktioner finns tillgängliga* (CEN 2011)

I detta projekt definieras robusthet enligt följande:

*Förmågan hos en enhet att kunna utföra krävd funktion utöver angivna eller förväntade betingelser*

Vidare kan då robusthet mätas på samma sätt som driftsäkerhet. För terminologi, se:

- SS-EN 13306:2010, "Underhåll – Terminologi". Standarden är skriven på engelska, för svenska; se SS-EN 13306:2001
- SS 441 05 05, utg. 3:2000, "Tillförlitlighet – Ordlista". Internationell motsvarighet: IEC 60050-191:1990: "Dependability and quality of service– Terminology". Kapitel 191 av "International Electrotechnical Vocabulary"
- NE – Nationalencyklopedin: ger längre beskrivningar med historiskt perspektiv, se tex. tillförlitlighet.

## 2.2 Tillförlitlighet i underhållsfunktionen

Underhåll kan beskrivas som alla tekniska, administrativa och styrande åtgärder under en enhets livstid avsedda att vidmakthålla den i, eller återställa den till, ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion (IEC 1990, CEN 2010).

Eftersom underhåll ofta utgör en central del för en lyckad verksamhet har den dragit nytta av utvecklingen av mer balanserade styrkort och ledningssystem (L. Swanson 2001, A.H.C. Tsang 2002, A. Parida et al. 2006). Underhåll svarar för en stor del av kostnaderna i många företag, därmed finns potential för stora besparingar, som visas i forskning av (B. Danielson 1987, M. Cross 1988, J.D. Campbell 1995b, R. Dekker 1996, D.N.P. Murthy et al. 2002, H. Ahlmann 2002, B.S. Dhillon 2002). Underhållets utveckling från ett nödvändigt ont till en värdefull och integrerad del av företagsprocessen har dessutom beskrivits i forskning av L. Pintelon mfl. (2008).

Underhåll skiljer sig från andra företagsfunktioner genom att vara multidisciplinärt. Det handlar till stor del om teknik, men dess värde är svårt att mäta i enkla finansiella ordalag (D.N.P. Murthy et al. 2002).

Tillförlitlighet inom underhåll har studerats av (U. Kumar et al. 2008, U. Kumar et al. 2011, J.M. Simões et al. 2011, H.A. Samat et al. 2011). Se även publikationer av A. Parida och G. Chattopadhyay (2007) för genomgång av diverse ramverk för mätning och övervakning av tillförlitlighet.

## 2.3 Styrkort och ledningssystem

Ett styrkort är en sammanfattning av hur något presterar mätt i ett antal mått. Balanserade styrkort är en metod som använder sig av styrkort för att styra organisationer.

Med ökad konkurrens, internationalisering, och lagstiftning om hälsa, säkerhet och miljö, har traditionell redovisning med finansiella indikatorer visats sig inte vara tillräckligt för att bedömma en organisations framgång (H.T. Johnson 1983, R.S. Kaplan 1984). Nya mätmetoder, indikatorer,

styrkort och ramverk har utvecklats för att inkludera kvantitativa och kvalitativa icke-finansiella faktorer, så som interna processer, kundperspektiv, innovation, underhåll, miljö, hälsa, säkerhet, etc. (R.S. Kaplan et al. 1992, D.P. Keegan et al. 1989, L. Fitzgerald et al. 1991, R.S. Kaplan et al. 1996).

För ytterligare diskussion av ämnet, se (A. Neely 1998, A. Neely et al. 2000, M. Bourne et al. 2003, IDEa 2006, P. Taticchi et al. 2010, S.S. Nudurupati et al. 2011).

## 2.4 Utmaningar i implementeringsprocessen

System för att mäta och övervaka tillförlitlighet/prestanda (tex. affärs- och underhållssystem) har visat sig öka organisationers effektivitet genom att tillhandahålla en mer balanserad styrning, se tex. R.S. Kaplan och D.P. Norton (1992, 1993). Det finns dock problem i genomförandeprocessen. I en litteraturgenomgång, räknade M. Bourne mfl. (2002) upp följande problem som forskare har observerat vid implementering av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet/prestanda:

- Ofta erfordras ett mycket väl utvecklat informationssystem
- Implementeringsprocessen kan vara både tidskrävande och kostsam
- Brist på ledarskap och motstånd mot förändring
- Vision och uppdrag är inte verkställbara, och det särskilt om det finns svårigheter med att bedöma handlingars och problems relativa betydelse för visionen och uppdraget
- Implementeringsprocessen är inte länkad till resursallokering
- Kända förbättringsmetoder används inte alltid
- Strävan efter perfektion kan undergräva framgång
- Strategin är inte alltid länkad till avdelningar, enheter och individer
- Ett stort antal dåligt organiserade indikatorer och parametrar försvagar effekten av ett nytt ledningssystem
- Indikatorer är ofta inte definierad på ett tillfredsställande sätt
- Behov av att kvantifiera resultat i områden som är mer kvalitativa till sin natur måste beaktas

M. Bourne mfl. (2002) gick vidare med en fallstudie om implementering av system för att mäta tillförlitlighet. Tre av sex deltagande företag ansågs framgångsrika i studien och fyra huvudfaktorer som hindrar framgång identifierades:

- Resurserna som krävs (tid och pengar)
- Svårt att komma åt data via IT-systemet
- Konsekvenserna av mätning; kan göras och mottas på fel sätt
- Projektet kan bli övertaget av ett annat projekt

R.S. Kaplan och D.P. Norton (2000) har räknat upp flera av de problem som angetts av M. Bourne mfl. (2002) och lägger tonvikten på två problem: för det första, inhyrning av oerfarna konsulter, och för det andra, förbiseende av strategi för att istället introducera ett datainsamlingsystem (underhållssystem). T.H. Davenport mfl. (2001) genomförde fallstudier och intervjuer med 20 företag och kom fram till att ett större problem i informationsåldern är att de flesta företag har problem med omvandlingen av data till information och kunskap. R. Karim mfl. (2009b) har gjort liknande iakttagelser vid behandling av underhållsdata. Klyftan mellan databehandling och kunskapshantering är alltför stor, förmodligen till följd av en oförmåga att fastställa intressenternas behov.

Vad beträffar problem med ett stort antal indikatorer, The Hackett Group fann att företag i genomsnitt rapporterar 132 indikatorer till den högsta ledningen varje månad, vilket är ungefär nio gånger så många som det rekommenderade antalet mätningar, och därmed förväxlas detaljer med noggrannhet och precision (C.E. Davis et al. 2010).

En människa kan endast ha uppsikt över ett begränsat antal indikatorer och följaktligen beror antalet strategiska indikatorer på antalet personer i ledningen. Därför måste data aggregeras (slås samman)

genom organisationen, men det är en svaghet i traditionella system för tillförlitlighet, eftersom de underliggande faktorerna kan vara gömda, tex. totalt antal fel, tågförsening eller TAK (tillgänglighet × anläggningsutbyte × kvalitetsutbyte).

## 2.5 Strategisk planering

Strategisk planering kan beskrivas som förfarandet för att fastställa mål, generera strategier och bedöma resultat (J.S. Armstrong 1982). Terminologin som används för strategisk planering kan skilja sig åt mellan både organisationer och forskare. Till följd av detta beskrivs huvudfaktorerna av strategisk planering i Tabell 1.

**Tabell 1:** Huvudfaktorer för strategisk planering.

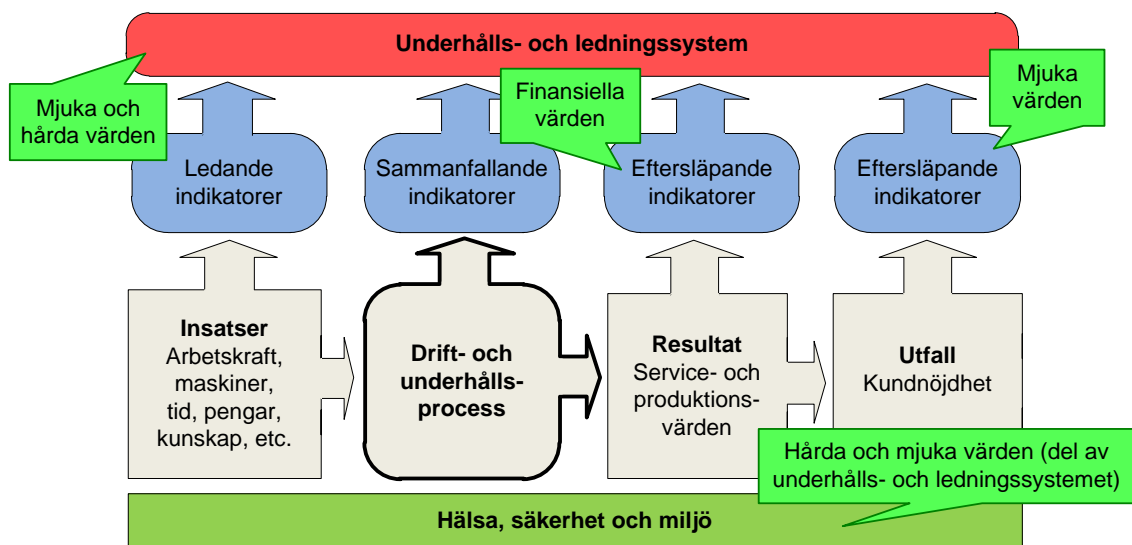
Term	Beskrivning
Vision	En redogörelse för vad en organisation vill åstadkomma i framtiden (U.S. Dept of Energy 1993).
Uppdrag	En redogörelse för en organisations kärnverksamheten (U.S. Dept of Energy 1993).  Anmärkning: Vision och uppdrag ligger på samma hierarkiska nivå, eftersom endera kan formuleras först. Till exempel, en auktoritet har en vision och ger ett uppdrag om att starta en verksamhet. Verksamheten kan i ett senare skede utveckla sin egen vision.
Övergripande/ Strategiska mål	Mål är vad en individ eller ett företag försöker att åstadkomma (E.A. Locke et al. 1981). Mål är allmänt sett breda mätbara riktlinjer för att stödja uppdraget (L.P. Gates 2010).
Delmål	Specifika mätbara aktiviteter nedbrutna från övergripande mål (J.S. Armstrong 1982), eller specifika, kvantifierbara mål på lägre nivå som indikerar uppfyllande av övergripande mål (L.P. Gates 2010).
Strategi	Plan för att styra aktiviteter i riktning mot målen (U.S. Dept of Energy 1993).
Resultat- områden	Områden där resultat visualiseras (J. Boston et al. 1997), tex. underhåll eller perspektiven i ett styrkort.
Framgångs- faktorer	Egenskaper, tillstånd eller variabler som kan ha betydande inverkan på en organisations framgång (J.K. Leidecker et al. 1984), tex. en hög grad av driftsäkerhet/tillgänglighet.
Nyckeltal/Mått	Indikatorer användbara för att bedöma till vilken grad en organisation har uppnått sina mål (U.S. Dept of Energy 1993), eller, de faktiska indikatorerna som används för att kvantitativt bedöma resultat gentemot framgångsfaktorerna (D. Sinclair et al. 1995).
Indikator	Något som indikerar (anger eller påvisar) något.

## 2.6 Drift- och underhållsprocessen

En process är en serie aktiviteter eller steg, med ingående resurser, för att uppnå eller producera ett önskat resultat. Mätning inom drift- och underhållsprocessen är beskrivet i Tabell 2 och Figur 6. För bakgrund, se C. Stenström et al. (2011).

**Tabell 2:** Beskrivning av termer för att mäta drift- och underhållsprocessen (C. Stenström et al. 2011).

Term	Beskrivning
Process	En process är en serie aktiviteter eller steg, med ingående resurser, för att uppnå eller producera ett önskat resultat.
Insats	Ingående resurser till en process, tex. arbetskraft, tid, pengar och kunskap. Insatserna kan delas upp i beståndsdelar och mätas på olika sätt, tex. i antal funktionsfel eller i medarbetarindex. Således kan faktorer studeras hur bra de presterar.
Kostnadsdrivare	Ingående faktor till en process som har en direkt effekt på kostnaderna.
Flaskhals	Faktor som begränsar prestandan hos en process.  Exempel på flaskhalsar är: ett system som ofta felar, ett delsystem som har låg kapacitet i förhållande till andra delsystem, och verktyg/arbetskläder som fungerar dåligt. Flaskhalsar är svårare att greppa än kostnadsdrivare.
Ledande indikator	Indikator som mäter insatserna till en process och därmed ger indikation om framtida händelser.  Anmärkning 1: Indikatorer för förebyggande underhåll, såsom inspektioner och sensorer, kan tolkas som ledande indikatorer eftersom de styr resultatet och därmed de eftersläpande indikatorerna. Anmärkning 2: Huruvida en indikator är ledande eller eftersläpande är subjektivt och beror på vilket perspektiv man har.
Eftersläpande indikator	Indikator som mäter resultat från en process och därmed ger indikation om händelser som redan har ägt rum.
Sammanfallande indikator	Indikator som mäter händelser i en process, samtidigt som de inträffar.  Anmärkning: Underhållsinspektioner och sensorer kan tolkas som sammanfallande indikatorer eftersom de anger det aktuella tillståndet.



**Figur 6:** Insats-process-resultat modell för drift och underhåll med system för mätning (C. Stenström et al. 2011).

## 2.7 Avreglering och kontraktering av drift och underhåll i järnvägar

Statens Järnvägar (SJ), verkande mellan åren 1887-2001, var ett svenskt statligt verk som förvaltade statens järnvägar och spårfordon. Förvaltningen av järnvägar skildes från SJ 1988 för att bilda en ny myndighet, Banverket. Tio år senare, 1998, infördes en ny policy som delade upp Banverket in i beställare- och entreprenörsklass, i syfte att öka effektiviteten (U. Espling et al. 2008). Första kontraktering av underhållet började kort därefter (Banverket 2008). Mer om Sveriges avreglering av järnvägar går att läsa i: (D. Spaven 1993, N. Bruzelius et al. 1994, S. Hultén 2000, A. Jensen et al. 2007, G. Alexandersson et al. 2008, J. Nilsson 2003).

Avreglering av järnvägarna i EU började 1991, då medlemsstaterna fick i uppdrag att separera driften av järnvägstrafiken från infrastrukturförvaltaren enligt direktiv 91/440/EEG (EC 1991). Det är svårt att jämföra olika EU medlemsländers avreglering eftersom deras tillvägagångssätt skiljer sig åt, och jämförelser med USA, som började avregleringen 15-25 år före EU, är ännu svårare eftersom järnvägs-transport i USA är mestadels av gods (G. Alexandersson et al. 2008). Studier på avregleringen i EU och andra länder hittas till exempel i: (C. Nash 2008, S. Bulcsu 2011, M. Mäkitalo 2011, M. Laisi 2011, P. Cantos et al. 2010).

År 2001 delades SJ upp i sex statligt ägda bolag, tex. SJ AB, Green Cargo AB och Euromaint AB (U. Espling et al. 2008). Monopolet på järnvägstrafik upphörde under 2009; fri konkurrens insattes. Under 2010 lämnade 42 operatörer in applikationer för tågplan 2011 (Trafikverket 2010a). Trafikverket är en av de sökande, tex. för underhåll.

Trafikverket arbetar kontinuerligt med att leja ut järnvägsunderhållet. I september 2010 var 87 % av de grundläggande underhållet upphandlade under fri konkurrens, övriga 13 % var kontrakterade till Infranord, tidigare en del av Banverket (Trafikverket 2010b). Målet med att leja ut underhållet är effektivisering/kostnadsbesparingar. Trafikverket använder sig av funktions-baserade kontrakt varigenom järnvägens tillstånd bedöms innan ett avtal inrättas. Ett bonus- och avgiftssystem är bundet till kontraktet, som är en funktion av (beror på) järnvägens tillstånd. Det finns cirka 35 kontrakt för grundläggande drift och underhåll, med ett totalt årsvärde på 1,5 miljarder kronor (Trafikverket 2010b). Alla nya kontrakt är funktionsbaserade, på fem år, med option på ytterligare två år. Att utveckla enhetliga kontrakt är ett pågående arbete på Trafikverket. Se S.M. Famurewa (2013) för en diskussion om funktionsbaserade kontrakt inom järnvägar.

I dagsläget är de grundläggande underhållskontrakten fördelade på fem entreprenörer: Infranord AB, Balfour Betty Rail AB, Strukton Rail AB, VR-track, och Infratek AB.

Avreglering av Sveriges järnvägar är en pågående process och utgången är inte avgjord. Alexandersson och Hultén fann att det konkurrensutsatta anbudsförfarandet av persontrafiken i Sverige har medfört minskade subventioner med omkring 20 %, och godssektorn har fått sänkta kostnader samt nya affärskoncept (G. Alexandersson et al. 2008). VTI (2011) fann att konkurrensutsatta underhållet i Sverige har resulterat i 14 % lägre kostnader, utan någon effekt på felfrekvensen. U. Espling (2004, 2007) har studerat flera aspekter av underhållskontrakteringen, och hittade till exempel att kostnaderna har minskat. Fler studier på effektivitet och produktivitet generellt i järnvägar hittas i: (A. Couto et al. 2009, S.H. Lim et al. 2009, M. Asmild et al. 2009, G. Friebel et al. 2010, R. Merkert et al. 2010, L.-. Li et al. 2011).

Att behålla en organisations kärnverksamhet i egen regi rekommenderas ofta för att säkerställa konkurrenskraft, tillväxt och innovation. Aktiviteter med bäst förutsättningar att lejas ut är de rutinmässiga och lättskötta aktiviteterna (J.D. Campbell 1995a, R. McIvor 2000). Om underhåll är en lämplig kandidat att leja ut är diskutabelt och beror på verksamheten, tex. IT, industri eller järnvägar (M. Levery 2002). En gängse uppfattning är att kontrakt måste förvaltas i nära samarbete mellan beställare och entreprenör. I slutändan är det kanske viktigast att veta vad som är ens kärnverksamhet. Trafikverkets kärnverksamhet är enligt dess instruktion från Näringsdepartementet:

*Trafikverket ska med utgångspunkt i ett trafikslagsövergripande perspektiv ansvara för den långsiktiga infrastrukturplaneringen för vägtrafik, järnvägstrafik, sjöfart och luftfart samt för byggande och drift av statliga vägar och järnvägar (Näringsdepartementet 2010)*

Trafikverket ansvarar för järnvägar; vem som utför arbetet är inte angett.

Ytterligare en komplicerande aspekt vid avreglering är risken för separation mellan spår och fordon, eftersom dem båda kommer att vara i ett liknande tillstånd (D. Lardner 1850).

Ett antal studier har undersökt om man får mer underhåll för pengarna i järnvägar genom konkurrensutsättning, men flera aspekter gör analysen komplicerad, tex. indirekta kostnader, konfidentiella avtal och olika avtalstyper. Fler studier behövs för att inkludera dessa faktorer. Studier har heller inte kunnat visa hur säkerheten i järnvägarna har påverkats av avreglerat underhåll; det statistiska underlaget är begränsat för kvantitativa studier. En större kvalitativ studie är en möjlig väg för att svara på frågan, liksom arbetet av U. Espling (2004, 2007).

## 2.8 Åtgärds- och effektmodell

Efter genomgången i Avsnitt 2.3 utvecklades styrkort med mer övergripande perspektiv genom att lägga tonvikten på företagsövergripande, organisationsövergripande, tvärdisciplinära och tvärhierarkiska perspektiv (A. Parida et al. 2007, J.P. Liyanage et al. 1999, J.P. Liyanage et al. 2003), se Figur 7. Dessa idéer togs sedan till järnvägar av T. Åhrén (2008). T. Åhrén kartlade indikatorer för underhåll som används av Trafikverket (17 totalt sett), och kopplade samman dem med målsättningar, balanserade styrkort, resultatområden och framgångsfaktorer. T. Åhrén och A. Parida (2009a, 2009b) undersökte dessutom underhållsindikatorer av Trafikverket och Jernbaneverket för benchmarking och utveckling av ett index för underhåll av järnvägar.



**Figur 7:** Åtgärds- och effektmodell med dess huvudfaktorer. Bearbetat från (J.P. Liyanage et al. 1999).

Åtgärds- och effektmodellen definieras ytterligare i det här projektet enligt följande: en metod för att underlätta utvecklingen av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet. Se Avsnitt 4.3 och Figur 11 för mer detaljerad information.

### 3 Datainsamling

Data har samlats in från intervjuer, litteraturgranskning och historiska data avseende järnvägsdrift och -underhåll för kunskap om järnvägar och tillförlitlighet. Följande kategorier av litteratur om drift, underhåll och tillförlitlighet har studerats:

- Artiklar avseende järnvägar och tillförlitlighet i vetenskapliga tidskrifter och konferenser
- Rapporter från EU-projekt
- EU vitböcker om transport
- Svensk och EU lagstiftning
- Publicerade böcker
- Dokument från Trafikverket, tex. handböcker, riktlinjer och standarder
- Internationella, europeiska och svenska standarder
- Konsultrapporter

Intervjuer och litteraturgranskningar utfördes för att tillmötesgå projektmålet angående kartläggning av drifts- och underhållsverksamhet för järnvägar (Mål 1).

#### 3.1 Intervjuer och information från sakkunniga

I den tidiga fasen av projektet intervjuades 14 personer vid Trafikverket. Intervjuerna gjordes personligen med öppna frågor, vilket gav frihet att ställa ytterligare frågor och att svara mer fritt. En intervju med öppna frågor valdes för övergripande kartläggning av järnvägsdrift och -underhåll i Sverige. Intervjuerna kompletterade litteraturgranskningen. Frågorna inkluderade, bland annat följande:

- Kan du berätta om den strategiska planeringsprocessen, tex. uppdelning av mål?
- Kan du berätta om planeringsprocessen för underhåll av järnvägar?
- Finns det några dokument som hänför sig till strategisk planering och planering av underhåll, tex. policytexter, handböcker eller strategier?
- Hur mäts järnvägars tillförlitlighet?
- Vilka indikatorer används för att mäta tillförlitlighet?
- Kan du berätta om kontrakteringen av underhåll?

Förutom intervjuerna, ägde även regelbundna möten med Trafikverket rum för att diskutera framsteg, problem och framtida inriktning. Se Tabell 3 för de intervjuades befattningar vid Trafikverket.

**Tabell 3:** Intervjuade personer vid Trafikverket. Asterisken är för den nya organisationsstrukturen.

Intervju-objekt	Befattning	Sektion	Enhet	Division	Avdelning
1	Chef	-	-	Taktisk planering	Drift
2	Chef	Anläggnings-tillgångar	Drift - Norra Sverige	Järnvägar	Drift
3	Chef	Personalstöd	Underhåll	Järnvägar	Drift
4-9 (6 pers.)	Analytiker	-	Analys	Taktisk planering	Drift
10	Kvalitets-ansvarig	Personalstöd	Drift - Mellansverige	Järnvägar	Drift
11	Chef	-	Analys	Taktisk planering	Drift
12	Analytiker, spår	Spårssystem	Järnvägar och vägar	Teknologi	Drift
13	Analytiker, upphandling	-	Personalstödsfunktion	Upphandling	Drift
14	Nationell forsknings-samordnare	-	Utveckling	Infrastruktur-utveckling	Underhåll*

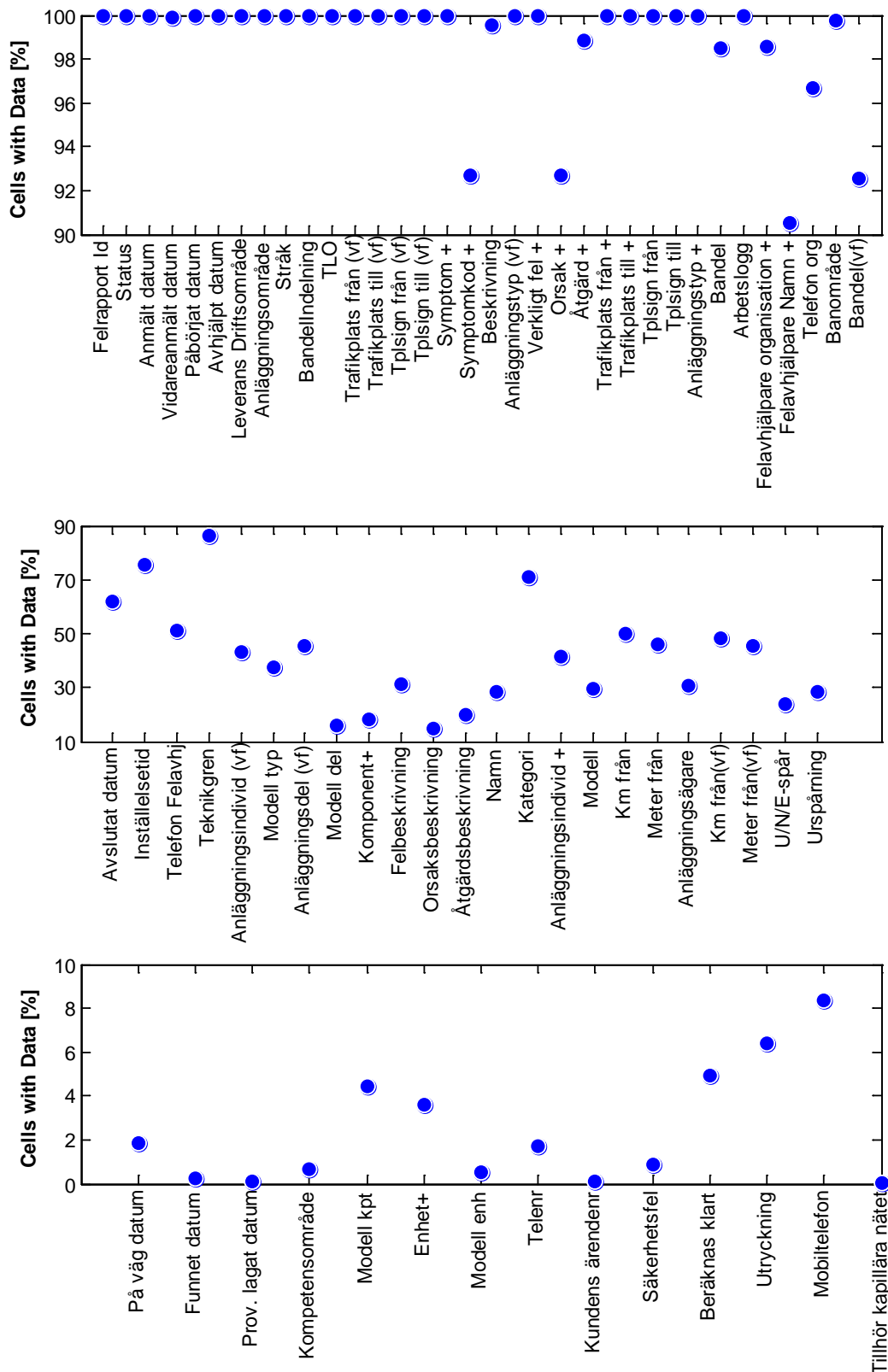
### 3.2 Insamling av data om drift och underhåll

Under utvecklingen och implementeringen av system för att mäta tillförlitlighet ska befintliga underhållsdata användas för att undvika problem enligt följande (se Avsnitt 2.4):

- Behovet av ett mycket väl utvecklat informationssystem
- För kostsamt i tid och pengar
- Underminering av framgång genom att sträva efter perfektion
- För många dåligt organiserade och definierade indikatorer

De historiska data som har samlats in om drift och underhåll från Trafikverket avser arbetsordrar för avhjälpande underhåll (AU) från databasen Ofelia, tågförseningar från databaserna TFÖR och LUPP, samt anläggningsstruktur från databasen BIS. Även väderdata har samlats in från SMHI. Enkla datakvalitetskontroller har utförts på arbetsordrar från Ofelia, se Figur 8. Grafen i figuren bygger på 9815 arbetsordrar från bandel 111 mellan 2001.01.01-2012.04.19, mao. 11 år, 3 månader och 19 dagar. Varje arbetsorder utgörs av 71 fält, men omkring nio fält verkar vara dubletter. Fält som fyllts till 100 % i figuren innebär att alla 9815 arbetsordrar har text eller siffror i de specifika fälten. Till exempel är fält nummer ett arbetsorderns identifieringsnummer. Det bör dock noteras att låg användning av ett fält inte nödvändigtvis behöver innebära att datakvaliteten är låg; vissa fält är inte tillämpliga beroende på funktionsfelet arbetsordern avser. Figuren ger information om vilka fält i arbetsordrarna som är lämpliga för fallstudier. Men det ger också information om hur arbetsorderförfarandet kan förbättras, tex. genom att ta bort onödiga fält och förbättra hur andra fält fylls i. Mer information om insamling och behandling av data ges i Kapitel 4.





**Figur 8:** Användning av fält i arbetsordrar för funktionsfel (Ofelia). Varje arbetsorder utgörs av 71 fält. Fält som fyllts i till 100 % innebär att alla arbetsordrar har text eller siffror i de specifika fälten. Grafen bygger på 9815 arbetsordrar, bandel 111, 2001.01.01-2012.04.19, mao. 11 år, 3 månader och 19 dagar.



## 4 Sammanfattning av resultat

Projektet har utförts i flera olika delar; detta kapitel ger en sammanfattning av resultaten.

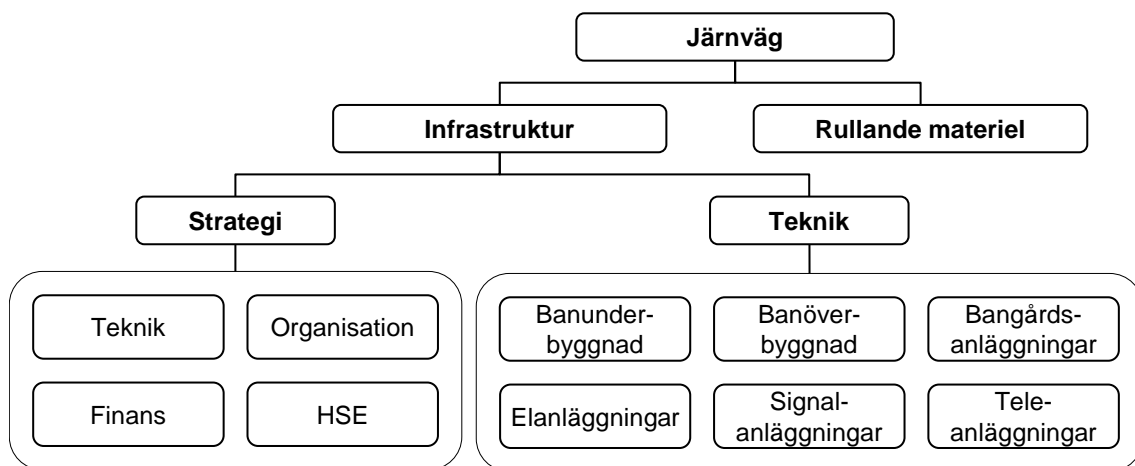
### 4.1 Teknisk rapport: Mätning av tillförlitlighet i järnvägsinfrastruktur med fokus på Trafikverket

Litteraturstudien och intervjuerna sammanställdes till en teknisk rapport: 'Maintenance performance measurement of railway infrastructure with focus on the Swedish network'. Rapporten hittas genom Internetsökning på ISBN: 978-91-7439-460-3. Nedan ges en sammanfattning av vissa delar från rapporten.

#### 4.1.1 Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar

Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar identifierades genom att granska publikationer från vetenskapliga tidskrifter, konferenser, Trafikverket (handböcker, årsrapporten, etc.), EU-projekt och konsulter. Intervjuer gjordes på Trafikverket för komplettering och verifiering. För att kunna hantera ett stort antal indikatorer, har de delats in i två övergripande kategorier: strategi och teknik (Figur 9). Indikatorer för strategi hämtas från olika datorsystem, såsom affärssystem och underhållssystem. Indikatorer för teknik är alla de indikatorer och parametrar som hämtas genom sensorer och olika inspektionsmetoder i järnvägsnätet. Strategi-indikatorerna ligger mer på systemnivå jämfört med teknik-indikatorerna som befinner sig mer på en delsystems- eller komponentnivå.

Indikatorerna har vidare klassificerats i ett styrkort (Bilaga A; Tabell A.6) i enlighet med standard avseende nyckeltal för underhåll, SS-EN 15341 (CEN 2007), och Trafikverkets anläggningsstruktur. Indikatorerna i SS-EN 15341 är indelade i tre kategorier, nämligen tekniska, organisatoriska och finansiella indikatorer. Indikatorer för hälsa, säkerhet och miljö är en del av de tekniska indikatorerna. Indikatorerna för strategi är följaktligen indelade i dessa kategorier, men indikatorerna för hälsa, säkerhet och miljö har ansetts vara av en sådan vikt att de har placerats i en egen kategori. Indikatorerna för teknik har delats in i sex olika kategorier enligt Trafikverkets anläggningsstruktur (Trafikverket 2012b). Dessa kategorier kan även gå under benämningen resultatområden, dvs. de områden där resultat visualiseras (J.K. Leidecker et al. 1984). Se Figur 9.



HSE = Hälsa, säkerhet och miljö

**Figur 9:** Struktur av indikatorer för järnvägsinfrastruktur (C. Stenström 2012a, 2012b, 2013a).

Ungefär 120 indikatorer har kartlagts. Likartade indikatorer har behandlats som en och samma, men vissa indikatorer påträffas två gånger, tex. på system- och komponentnivå. För beskrivning, diskussion och grafer avseende indikatorerna, se Kapitel 4 i den tekniska rapporten.

#### 4.1.2 Styrkort och benchmarking

Styrkort har beskrivits in Avsnitt 2.3. Benchmarking är när man jämför någonting, internt eller externt, med syfte att identifiera bästa praxis, tex. med hjälp av jämförelseindex.

Åtta europeiska infrastrukturförvaltares styrkort för drift och underhåll har identifierades. Främst var det resultat från projektet 'Asset Management Club Project' som sammanställdes (BSL 2009). Avseende benchmarking är projektet 'Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB)' intressant (UIC - LICB 2008). 14 infrastrukturförvaltares kostnader för underhåll och reinvestering normaliserades och jämfördes inom LICB projektet. Data envelopment analysis är en annan intressant metod för benchmarking i järnvägar. Mäta produktionseffektivitet, sett som produktion delat med ingående resurser, är problematiskt eftersom det ofta inte är möjligt att hitta gemensamma vikter för indata och utdata, till följd av olika operativa omständigheter för varje enhet. Med data envelopment analysis (DEA) används relativa vikter genom att beräkna de mest fördelaktiga vikterna för varje enhet i förhållande till de andra enheterna, vilket möjliggör jämförelse. DEA har använts inom rullande materiel av tex. (S.A. George et al. 2008, R. Malhotra et al. 2009).

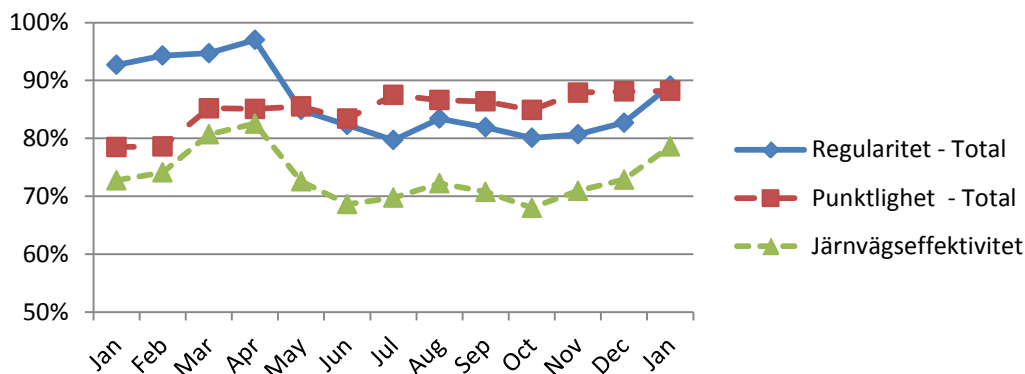
#### 4.1.3 Punktlighet och regularitet

Punktlig het och regularitet bör studeras tillsammans. Inställda tåg (låg regularitet) kan öka punktligheten och vice versa; få inställda tåg kan öka punktligheten. Negativt korrelerade indikatorer bör presenteras tillsammans, tex. punktlighet och regularitet. Om ett kvalitetsindex för spårläge, tex. Q-talet, dessutom beaktas som en tredje faktor, får man fram ett mått på järnvägars totala effektivitet, av liknande typ som TAK (tillgänglighet×anläggningsutbyte×kvalitetsutbyte):

$$\text{Järnvägseffektivitet} = \text{Regelbundenhet}^a \times \text{Punktlig het}^b \in [0,1] \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Total effektivitet} &= \text{Tillgänglig het}^a \times \text{Prestanda}^b \times \text{Kvalitet}^c \\ &= \text{Regelbundenhet}^a \times \text{Punktlig het}^b \times \text{Spårläge}^c \in [0,1] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Konstanterna a, b och c kan väljas för att ge olika vikt till parametrarna för att tillfredsställa särskilda behov. Se Figur 10 som ett exempel på ekvation 4.1. Figuren visar att punktlighet och regularitet är negativt korrelerade. Suboptimering förhindras genom att kombinera de här två indikatorerna till en indikator/index, eftersom båda måste vara höga för att den aggregerade indikatorn ska vara hög. Men en större analys bör göras innan man överväger tillämpning.



**Figur 10:** Järnvägseffektivitet i det svenska järnvägsnätet från januari 2011 till januari 2012. Konstanterna a och b är satta till ett. Data kommer från Trafikverkets publika hemsida och avser alla tåg.

#### 4.1.4 Ytterligare iakttagelser

Granskningen av litteratur rörande forskningsprojekt med statistiska resultat visar att datarensningssprocessen ofta förbises, vilket gör resultat till viss del osäker.

En huvudsaklig fördel med mätning är att aktuell tillstånd kan jämföras med föregående tillstånd, närmare bestämt övervakning av trender. Denna fördel går emellertid ofta förlorad till följd av nya beräknings- eller visualiseringsmetoder, ändrade mål eller förändringar i organisationsstrukturen. Problemet går att undvika genom att behålla äldre beräknings- och visualiseringsmetoder under en övergångsperiod.

## 4.2 Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar

Med utgångspunkt från indikatorerna som kartlades i den tekniska rapporten sammanställdes en artikel (C. Stenström et al. 2012b, C. Stenström et al. 2013a). Den inkluderar även en jämförelse med indikatorerna i SS-EN 15341:2007, 'Underhållsteknik - Nyckelprestationsindikatorer' (CEN 2007).

SS-EN 15341:2007 omfattar 71 nyckeltal indelade i tre kategorier och tre nivåer. Kategorierna är tekniska, organisatoriska och finansiella indikatorer, och nivåerna löper från allmänna indikatorer till mer specifika indikatorer. Nyckeltalen har satts samman genom att ta kvoten av två eller flera termer, eller underliggande indikatorer/parametrar. Järnvägsindikatorerna har därför jämförts både med termerna och nyckeltalen, se Tabeller 4 och 5. Indikatorer på samma rad anses stå i nära samband med varandra.

**Tabell 4:** Förhållandet mellan järnvägsindikatorer och SS-EN 15341:2007 nyckeltal (C. Stenström et al. 2012b, 2013a).

Järnvägsindikatorer		SS-EN 15341 indikatorer	
#	Namn	#	Namn
E3 = E1/T17	Underhållskostnad/Trafikvolym	E3	Total underhållskostnad/ Producerade enheter
E2/E1	Kostnad för ledning av underhåll/Underhållskostnad	E13	Kostnad för indirekt underhållspersonal/Total underhållskostnad
E4/E1	Kostnad för underhållentreprenör/Underhållskostnad	E10	Total entreprenörskostnad/ Total underhållskostnad
E1/H15	Underhållskostnad/ Energiförbrukning per område	E14	Total underhållskostnad/ Total energikostnad
E5/E1	Kostnad för avhjälpande underhåll/Underhållskostnad	E15	Kostnad för avhjälpande underhåll/ Total underhållskostnad
E6/E1	Kostnad för förebyggande underhåll/Underhållskostnad	E16	Kostnad för förebyggande underhåll/ Total underhållskostnad
H10/Tid	Underhållsolyckor/Tid	T5	Personskador på grund av underhåll/Arbetstid
H11/T3	Tillbud och olyckor vid funktionsfel/ Totalt antal funktionsfel	T11	Funktionsfel som orsakar personskada/ Antal funktionsfel
		T12	Fel som orsakar tillbud/Antal funktionsfel
O2+T16	Genomsnittlig väntetid (MWT) + Medeltid för reparation (MTTR)	T21	Total tid för återställning / Antal funktionsfel
O3	Eftersläpande arbetsordrar	O22	Arbetsordrar som utförts enligt schemat/schemalagda arbetsordrar

**Tabell 5:** Förhållandet mellan järnvägsindikatorer och SS-EN 15341:2007 underliggande indikatorer (C. Stenström et al. 2012b, 2013a).

Järnvägsindikatorer		EN 15341 underliggande indikatorer	
#	Namn	#	Namn
E1	Underhållskostnad	E1.1	Total underhållskostnad
T17	Trafikvolym	E3.2	Prestationskvantitet
E2	Kostnad för ledning av underhåll	E13.1	Kostnad för indirekt underhållspersonal
E4	Kostnad för underhållsentreprenör	E10.1	Total entreprenörskostnad
H15	Energiförbrukning per område	E14.2	Totalt förbrukad energi
E5	Kostnad för avhjälpande underhåll	E15.1	Kostnad för avhjälpande underhåll
E6	Kostnad för förebyggande underhåll	E16.1	Kostnad för förebyggande underhåll
H10	Olyckor vid underhåll	T5.1	Personskador på grund av underhåll
T3	Funktionsfel totalt sett	T11.2	Totalt antal funktionsfel
H11	Tillbud och olyckor till följd av funktionsfel	T11.1	Funktionsfel som orsakar personskada
		T12.1	Funktionsfel som orsakar tillbud

11 likartade indikatorer påträffades, vilka kan underlätta extern jämförelse, mao. benchmarking mellan olika infrastrukturförvaltare. Studien ger dessutom en bakgrund till en potentiell framtida standardisering av järnvägsindikatorer. En harmonisering mellan infrastrukturförvaltare för jämförelse av prestanda är trots allt en utmaning i sig, eftersom operativa och geografiska förhållanden varierar starkt.

### 4.3 Åtgärds- och effektmodell: Modellutveckling och fallstudie

Med utgångspunkt från litteraturstudien i Kapitel 2 och den tekniska rapporten (C. Stenström 2012a), har en åtgärds- och effektmodell utvecklats (C. Stenström et al. 2013b) som en fortsättning på forskningen av J.P. Liyanage och U. Kumar (2003), samt T. Åhrén (2008). Nedan ges en sammanfattning av arbetet.

#### 4.3.1 Dynamiskt system för mätning av tillförlitlighet

Infrastrukturförvaltare har växt i takt med järnvägar, och således har drifts- och underhållspraxis utvecklats för varje infrastrukturförvaltares specifika behov. Men harmonisering och ökad användning av standarder har följt med globaliseringen, särskilt inom EU, med tanke på ökat samarbete och uppbyggnad av ett transeuropeiskt järnvägsnät (EC 1996). System för mätning av tillförlitlighet måste därför vara dynamisk/anpassningsbar. En annan viktig faktor vid mätning av tillförlitlighet är den snabba utvecklingen av nya teknologier, så som datorer, mjukvara och tekniker för förebyggande underhåll. Som exempel kan förändringar i affärs- och underhållssystem inom en organisation ändra hur data presenteras och övervakas. Förutom globalisering och teknologiska förändringar, kan organisatoriska förändringar även påverka detta. Processer och system för mätning och övervakning av tillförlitlighet måste på det hela taget ha framförhållning och dynamiska för att kunna hantera förändringar enligt följande:

- Förändring i verksamhetens mål, strategi, policy, osv.
- Förändring i teknologi och kommunikation
- Organisatoriska förändringar
- Utveckling av regelverk, tex. för hälsa, säkerhet och miljö
- Förändringar i intressenters krav
- Konjunktursvängningar

Det är därför viktigt att ha en stark kontinuerlig förbättringsprocess.

Litteraturstudien för åtgärds- och effektmodellen har fokuserat på akademiska publikationer, såväl som publikationer från europeiska projekt, konsultverksamhet, infrastrukturförvaltare och från Europa kommissionen. Det kom sålunda fram att många förbättringsmetoder har sin grund i en kontinuerlig

förbättringsprocess, så som cykeln planera-genomföra-utvärdera-förbättra, plan-do-study-act (PDSA) på engelska, även känd som Deming-, Shewhart- och Kaizen-cykeln (M. Imai 1986). Det har dessutom kunnat påvisas att organisationer använder huvudfaktorerna för strategisk planering, tex. vision, uppdrag, mål, etc., på olika sätt. Åtgärds- och effektmodellen grundar sig därför på PDSA-cykeln med betoning på huvudfaktorerna för strategisk planering.

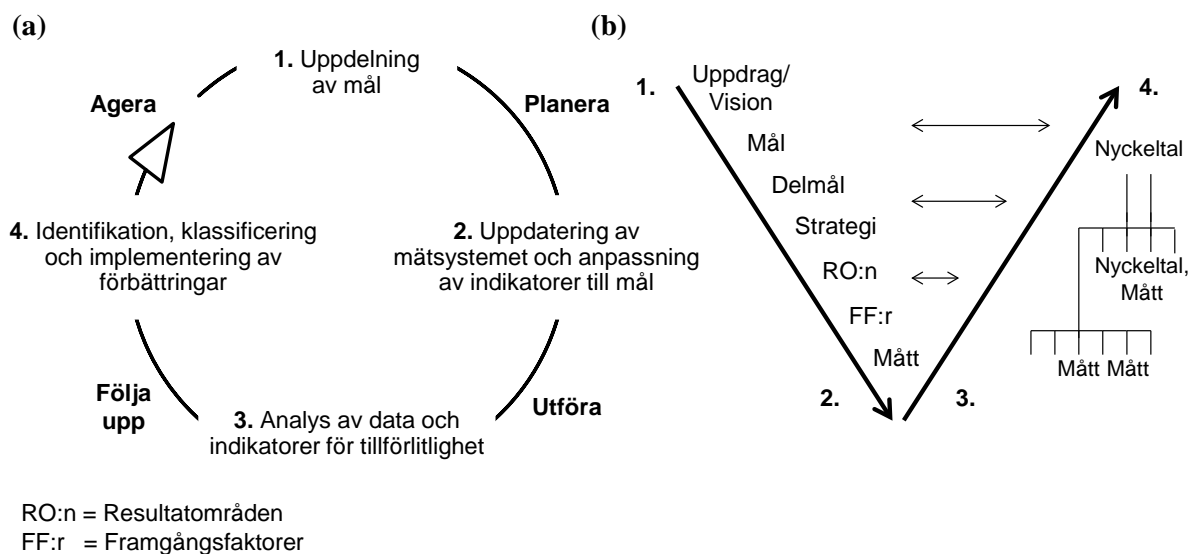
I traditionella system för mätning och övervakning av tillförlitlighet tilldelas gränsvärden till indikatorerna, vilket anger när en åtgärd behöver vidtas. Eftersom indikatorerna normalt sett utgörs av aggregerad data, tex. totalt antal funktionsfel, kan indikatorerna verka abstrakta. De aggregerade indikatorerna med gränsvärden kan därför göra systemet reaktivt om de inte används på ett lämpligt sätt. För att bemöta detta problem, analyseras indikatorer i åtgärds- och effektmodellen efter de underliggande faktorerna, som ligger till grund för det aktuella värdet på indikatorn. På så vis tillhandahålls ett utgångsläge för förbättringar.

Åtgärds- och effektmodellen syftar till att lösa vissa av problemen med de traditionella systemen för mätning och övervakning av tillförlitlighet. Mer specifikt lägger modellen tonvikt på:

- Kontinuerliga förbättringar
- Huvudfaktorerna för strategisk planering
- De underliggande faktorerna som styr indikatorerna

#### 4.3.2 Utveckling av modellen

Åtgärds- och effektmodellen är en metod för att underlätta utveckling och kontinuerlig förbättring av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet. Den utgörs av två komponenter: en fyrstegsprocess för kontinuerlig förbättring och en metod för strategisk planering (Figur 11).

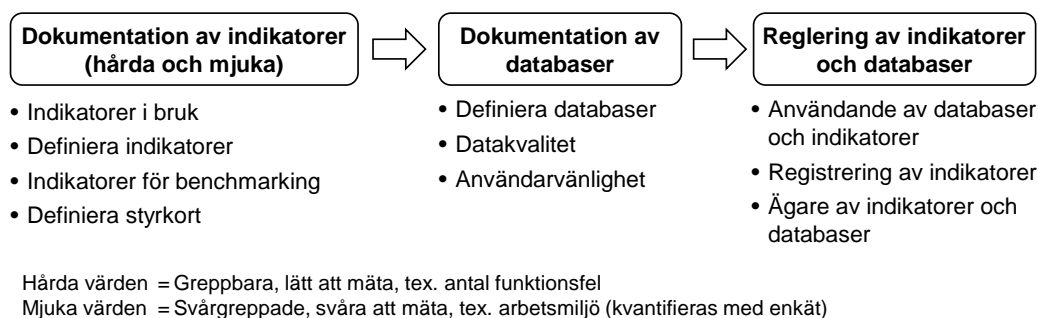


**Figur 11:** Åtgärds- och effektmodellen är baserad på (a) en fyrstegsprocess för kontinuerliga förbättringar och (b) en metod för strategisk planering. Siffrorna i (b) representerar stegen i (a). Se Avsnitt 2.5 för en beskrivning av huvudfaktorerna inom strategisk planering.

**Steg 1:** Det första steget i åtgärds- och effektmodellen fokuserar på strategisk planering, som även inbegriper att samla in intressenters mål, som normalt sett strider mot varandra, och organisera dem i ett gemensamt ramverk. Motstridiga mål som måste harmoniseras är tex. spår mot fordon och framkomlighet mot säkerhet. Vad beträffar järnvägar inom EU, startar anpassning och harmonisering på europeisk nivå och bryts sedan ned på regerings- och infrastrukturförvaltnivåer, nämligen från strategisk till operativ planering. Granskningen av huvudfaktorerna för strategisk planering i

Avsnitt 2.5 (Tabell 1), utfördes särskilt för Steg 1 i åtgärds- och effektmodellen. Vidare har EU-projektet AUTOMAIN (2010) funnit att mål uttrycks på många olika sätt mellan infrastrukturförvaltare, och att de inte alltid är relaterade tillbaka till någon standard, utan endast till termer såsom hållbarhet och tillgänglighet.

**Steg 2:** Organisationers system för att mäta tillförlitlighet är under konstant tryck från strategisk planering, organisationsändringar, nya teknologier och förändringar i anläggningsstrukturen. Steg 2 i åtgärds- och effektmodellen avser därför uppdatering av mätsystemet i enlighet med nya krav och mål från intressenter. Se Figur 12.

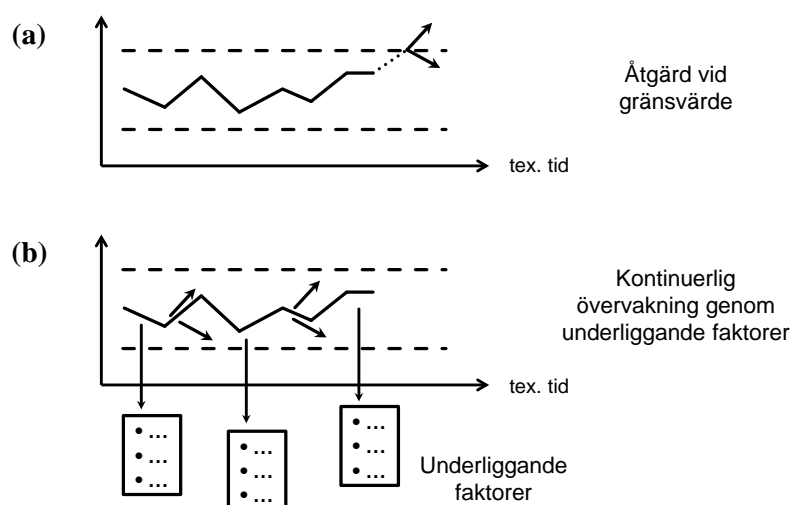


**Figur 12:** Grundkrav för strategisk planering och mätning av tillförlitlighet.

Även uppgifter på önskad data bör samlas in för att stödja innovation och utbyte av data med andra intressenter. Utbyte av data bör alltid ske automatiskt, precis som beräkning och presentation av indikatorer via IT (informationsteknik). Riskanalys får heller inte förglömmas, tex. ändrad finansiering.

**Steg 3:** Organisationer samlar in omfattande mängder data, men ofta är det svårt att omvandla data till information (T.H. Davenport et al. 2001, R. Karim et al. 2009a). Analysmetoderna utvecklas därmed i steg 3 med hjälp av olika statistiska metoder för sammanställning av indikatorer och identifiering av bra respektive dålig prestanda. Eftersom datainsamling förbrukar resurser är kanske den viktigaste aspekten i steg 3 att identifiera vilken data som krävs och vilken data som är överflödigt.

Datainsamling är en svag länk inom traditionella system för mätning och övervakning av tillförlitlighet eftersom det kan göra indikatorerna abstrakta till följd av att de underliggande faktorerna kan vara okända, tex. total tågförseening eller totalt antal underhållsinspektioner. Åtgärds- och effektmodellen kompletterar därför gränsvärdena med de underliggande faktorerna för indikatorn. Se Figur 13.



**Figur 13:** a) Traditionella system för att mäta och övervaka tillförlitlighet med gränsvärden. b) Åtgärds- och effektmodell med underliggande faktorer avseende mått på tillförlitlighet.



Indikatorer med gränsvärden beaktas vanligtvis endast när en gräns har överskridits, vilket gör dem reaktiva till sin art. Åtgärds- och effektmodellen däremot lägger tonvikt på de underliggande faktorerna för bra respektive dålig prestanda, vilket tillhandahåller ett utgångsläge för förbättringar, dvs. mer av en vit låda än en svart låda (ett system vars innehåll/process är okänd).

**Steg 4:** Åtgärds- och effektmodellen tillämpar kontinuerliga förbättring med det slutgiltiga målet att underlätta beslutsfattande, genom att tillhandahålla ett uppdaterat system för mätning och övervakning av tillförlitlighet. Steg 4 inbegriper simulering, klassificering, ändringar i system och processer, implementering av nya tekniker och ytterligare definiering av indikatorer och databaser.

### 4.3.3 Fallstudie

En fallstudie på Malmbanan utfördes för att verifiera och demonstrera åtgärds- och effektmodellen.

#### *Steg 1: Uppdelning av mål*

Målet i Steg 1 är att anpassa och sammanställa de olika intressenternas strategiska planering på de olika organisationsnivåerna. Det finns två utmaningar: för det första, att identifiera huvudfaktorerna i strategisk planering och samordna terminologin, och för det andra, att bryta ner vision, uppdrag och mål, som kan vara generella, till specifika operativa aktiviteter.

På europeisk nivå fastställer 2011 års vitbok om europeiska transportsystemet huvudfaktorerna för strategisk planering enligt följande (EC 2011):

- **Vision:** Ett konkurrenskraftigt och resurseffektivt/hållbart transportsystem.
- **Mål som avser järnvägar:** Senast 2030 ska 30 % av all godstransport på vägsträckor över 300 km ha övergått till järnvägs- eller vattenvägstransport. Senast 2050 ska 50 % av all passagerartrafik och godstransporter på medellånga distanser ha övergått från vägtransport till järnvägs- och vattenvägstransport.
- **Delmål:** 40 initiativ i fyra kategorier (resultatområden).

Det bör observeras att den vision och de mål som anges ovan inte är uttryckligen skrivna att de är vitbokens mål och vision, sålunda krävs det att man läser mellan raderna. Uppdrag kunde inte identifieras i vitboken. Målen definieras dock tydligt kvantitativt. På liknande sätt krävs det en viss erfarenhet för att hitta faktorerna för strategisk planering, eftersom det krävs att man går igenom flera dokument från Trafikverket och Näringsdepartementet.

Huvudfaktorer avseende strategisk planering för transportpolitik i Sverige är följande:

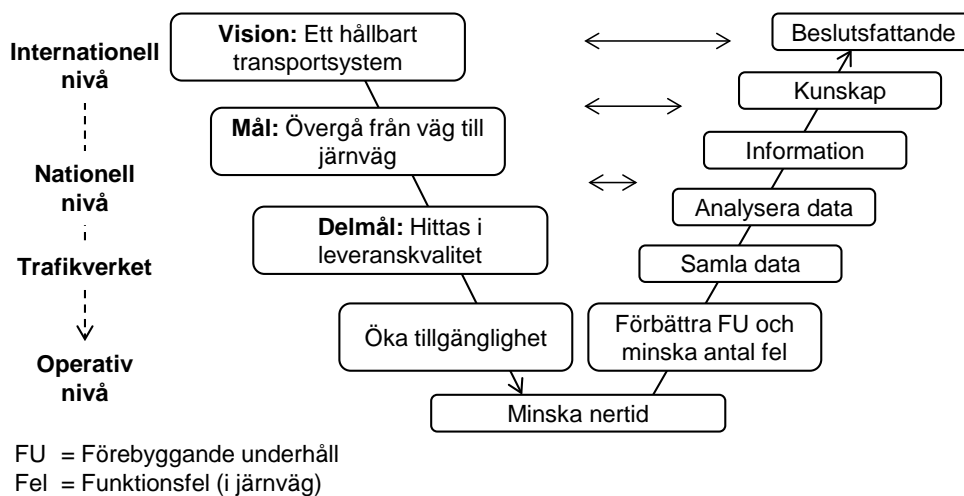
- **Övergripande mål:** Säkerställa en samhällsekonomiskt effektiv och långsiktigt hållbar transportförsörjning för medborgare och näringsliv i hela landet (Näringsdepartementet 2009).
- **Delmål:** Målen för drift och underhåll av järnvägar hittar man i Trafikverkets styrkort för leverans kvalitet (P. Söderholm et al. 2013).

Det övergripande målet har även två delmål: funktionsmålet som handlar om tillgänglighet (se Avsnitt 2.1), och hänsynsmålet som handlar om säkerhet, miljö och hälsa. Tillgänglighet är ett mått på ett systems driftsäkerhet och tillförlitlighet (IEC 1990, CEN 2010, SIS 2000). I fråga om transporter inbegriper det inte bara själva transporten, utan även ombordstigningen, tex. om ombordstigning från plattform till tåg hindras på något vis så föreligger ett funktionsfel och följaktligen påverkas tillgängligheten (plattformen är ett delsystem av järnvägen).

Fler faktorer för strategisk planering, och särskilt på taktisk nivå, finnes i dokument från Trafikverket och Näringsdepartementet men är inte nödvändig för denna fallstudie.

I Trafikverkets styrkort för leverans kvalitet är två indikatorer intressanta för denna fallstudie: tågförseningstimmar på grund av infrastrukturproblem, och ankomstpunktlighet. Leverans kvalitet ges också stor vikt i de 40 initiativen i vitboken för transport. Leverans kvalitet är en funktion av (beror på)

tillgänglighet och andra attribut (se Avsnitt 2.1). Fokus i denna fallstudie ligger på tillgänglighet, eller mer specifikt på funktionsfel i järnvägar, se Figur 14.



**Figur 14:** Nedbrytning av strategi till funktionsfel.

### **Steg 2: Uppdatering av mätsystemet och anpassning av indikatorer till mål**

Systemet för mätning och övervakning av tillförlitlighet ska uppdateras enligt mål. Indikatorer avseende funktionsfel som är specifika för järnvägar inbegriper (Bilaga A):

- Funktionsfel eller arbetsordrar (totalt, per enhet, per spår-km eller per tåg-km)
- Tågförseningstimmar (totalt, per enhet, per spår-km eller per tåg-km)
- Ankomstpunktlighet (per bandel, linje, linjeklass eller område)

Enhet: Varje detalj, komponent, utrustning, delsystem, funktionell del, anläggning eller system som kan betraktas för sig (SIS 2000).

Ankomstpunktlighet och tågförseningstimmar ingår i Trafikverkets styrkort leveranskvalitet, mao. stort fokus sätts på funktionsfel. Indikatorer måste dock definieras ytterligare inom en organisation efter att analys har genomförts. Ett mål med åtgärds- och effektmodellen är som nämnts att presentera indikatorer tillsammans med dess underliggande faktorer, inte enbart som ett aggregerat mått.

### **Steg 3: Analys av data och indikatorer för tillförlitlighet**

Drifts- och underhållsdata för bandel 111 har samlats in. Bandel 111 är en 128 km lång sträcka av Malmбанan (STAX 30; största tillåtna axellast 30 tonn) som sträcker sig från Riksgränsen till Kiruna (Figur 15). Data består av arbetsordrar (AO:r) för avhjälpande underhåll från 2001.01.01 till 2009.12.01; 8 år och 11 månader. Utav 7 476 arbetsordrar totalt, gav 1 966 tågförseningar, dvs. 26 %. Analysen grundar sig på de 1 966 arbetsordrarna som gav tågförseningar. De två procent arbetsordrar som gav de längsta tågförseningarna betraktades som utliggare (kraftigt avvikande), vilket reducerar antalet arbetsordrar från 1 966 till 1 926. Utliggarna bör analyseras före beslutsfattande, men detta omfattas inte av den här studien. Se C. Stenström (2012b) för mer information om arbetsordrarna.

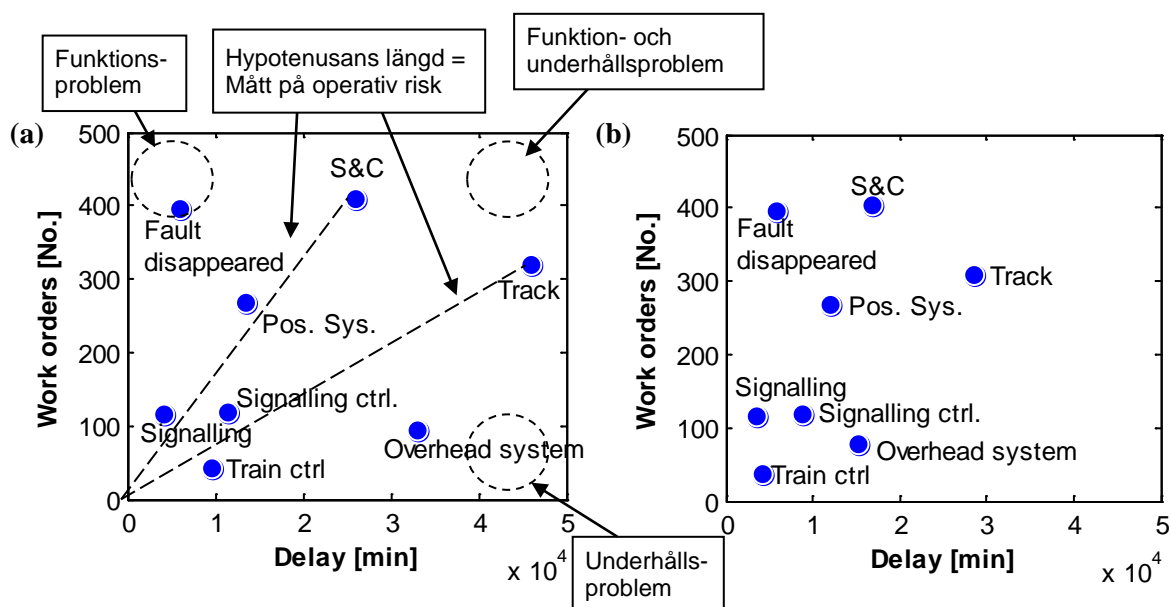


**Figur 15:** Bandel 111, Malmбанan.

Med avseende på feleffektanalys (FMEA; failure mode effect analysis) och riskmatriser, som även går under beteckningen sannolikhets- och konsekvensdiagram, se tex. (CEN 1999, ISO/IEC 2009), konstruerades ett index för operativ risk:

$$R = \sqrt{(a\alpha)^2 + (b\beta)^2} \quad (4.3)$$

Där  $\alpha$  är infrastrukturfel och  $\beta$  är tågförsening.  $a$  och  $b$  är konstanter för viktning. Figur 16 visar den resulterande operativa risken på systemnivå. Systemen med sämst prestanda är växlar och spår, benämna *S&C* och *Track* i figuren. Dessa två system analyseras mer djupgående i Figur 17.

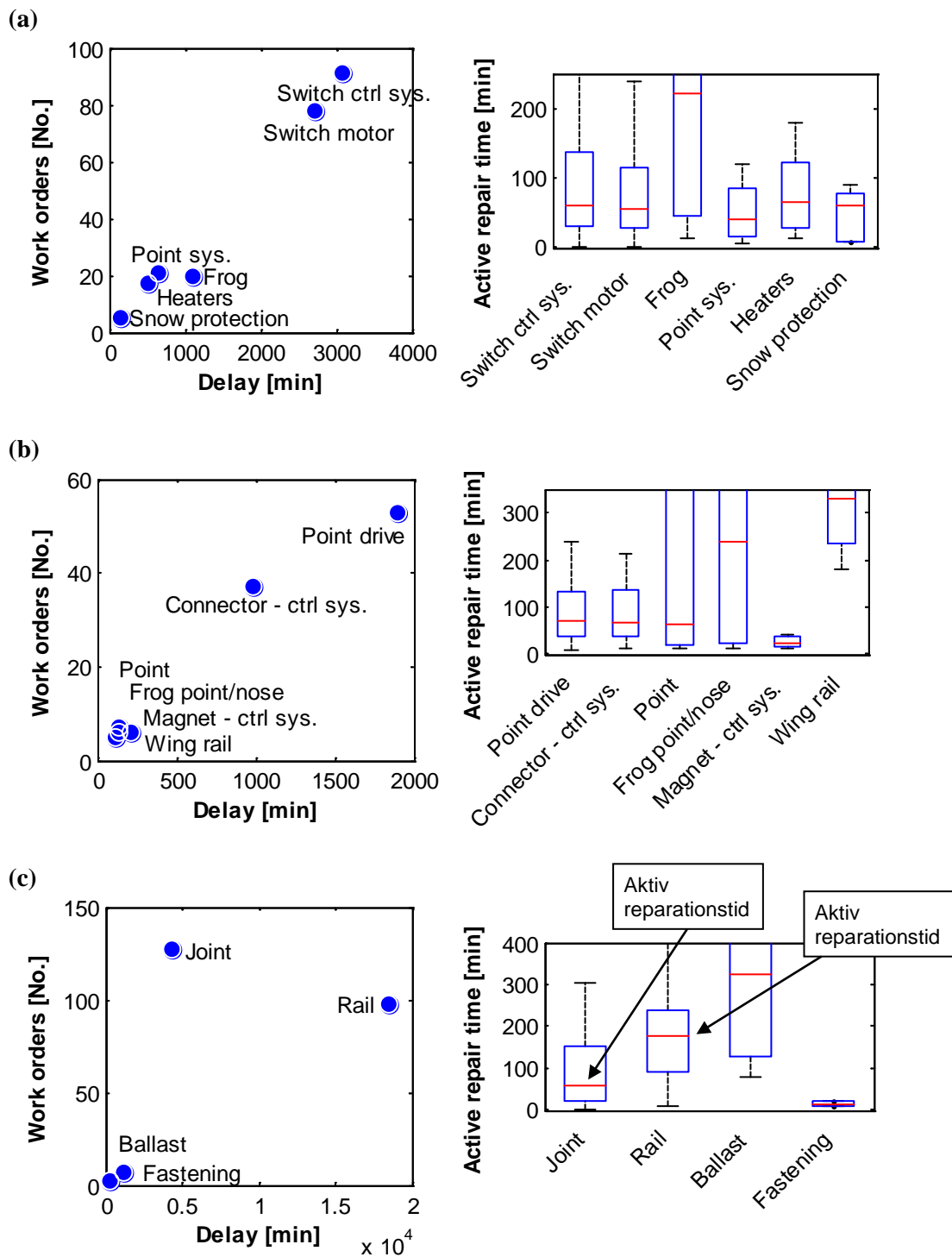


**Figur 16:** Riskmatris på systemnivå som visar arbetsordrar för fel och motsvarande tågförseningar. Komplet datauppsättning (a) och data upp till 98:e percentilen avseende tågförseningar (b).

Figur 17a visar två delsystem i växlar som avviker avsevärt från andra delsystem, nämligen kontrollanordning och omlägningsanordning, benämna *switch ctrl sys* och *switch motor* i figuren. Motsvarande aktiv tid för reparation kan ses på höger sida om figuren som lådagran. Mittensträcket i varje låda motsvarar medianen, medans lådans undre och övre kant motsvarar den 25:e och 75:e percentilen (kvartiler). Morrhåren, de två strecken som kommer ut från lådan, sträcker sig till 1,5 IQR (interkvartilintervall). Utliggare har utelämnats. Mediantiden för reparation av växelkrysset (*frog*) är över 200 minuter, medan andra delsystem tar cirka 50 minuter.

Delsystemen för växlar bryts ytterligare ned till komponentnivå i Figur 17b. Kontaktdon (med tungelement) och växeldriv, som är delar av kontrollanordningen och omlägningsanordningen, presterar sämst, benämna *Connector – ctrl sys* och *Point drive* i figuren. Krysspetsen och vingrälen har dessutom långa aktiva tider för reparation, benämna *Frog point/nose* och *Wing rail* i figuren.

Analys av spårets undersystem visas slutligen i Figur 17c. Figuren visar att skarvar och räls är delsystemen som svarar för spårets låga prestanda, benämna *Joint* och *Rail* i figuren. Det är intressant att notera att skarvar orsakar många fel, men inte så mycket tågförsening, vilket antyder tyder på problem med funktionssäkerheten. I motsats till detta, orsakar rälsen långa tågförseningar men färre fel; tyder på problem med underhållsmässigheten. Rälsens lådagran visar att medianreptiden är tre gånger så lång som skarvarnas medianreptid, vilket bekräftar de stora förseningarna. Huvudsakliga anledningen till fel i skarvar är kortslutning; överledning i mellanlägg och isoleringar, men även en del främmande föremål och övervalsning. Den huvudsakliga orsaken till arbetsordrar för räl är brott, vilket kan resultera i urspårning (J. Santos-Reyes et al. 2005).



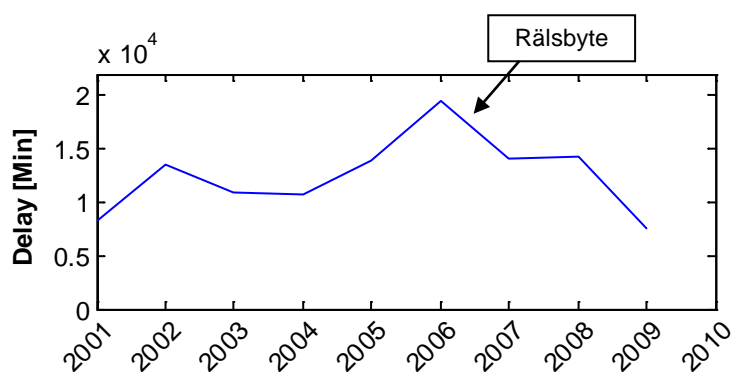
**Figur 17:** Analys av: (a) delsystem för växlar och spår (b) komponenter för växlar och spår, och (c) undersystem för spår. Tågförseingsdata upp till den 98:e percentilen har använts.

Tabell 6 sammanfattar resultaten. Den uträknade risken är lika med hypotenusans längd efter viktning så att arbetsordrar och tågförseing har lika stor påverkan.

**Tabell 6:** Arbetsordrar (AO:r) och tågförseningar för växlar och spår.  
 $R = (\alpha^2 + \{17 \cdot 10^{-3}\beta\}^2)^{1/2}$ .

	AO [Ant.]	Tågförsening [Min.]	Risk
<b>System</b>			
Växlar	404 (21 %)	16880 (15 %)	<b>496</b>
Spår	308 (16%)	28590 (25%)	<b>575</b>
<b>Undersystem</b>			
Växlar: Kontrollanordning	91 (4,7 %)	3069 (2,7 %)	<b>105</b>
Växlar: Omlägningsanord.	78 (4,0%)	2724 (2,4%)	<b>91</b>
Spår: Skarvar	127 (6,6%)	4325 (3,8%)	<b>147</b>
Spår: Räls	98 (5,1%)	18470 (16%)	<b>329</b>
<b>Komponent</b>			
Växlar: Kontaktdon	37 (1,9%)	989 (0,9 %)	<b>41</b>
Växlar: Växeldriv	53 (2,8%)	1898 (1,7%)	<b>62</b>

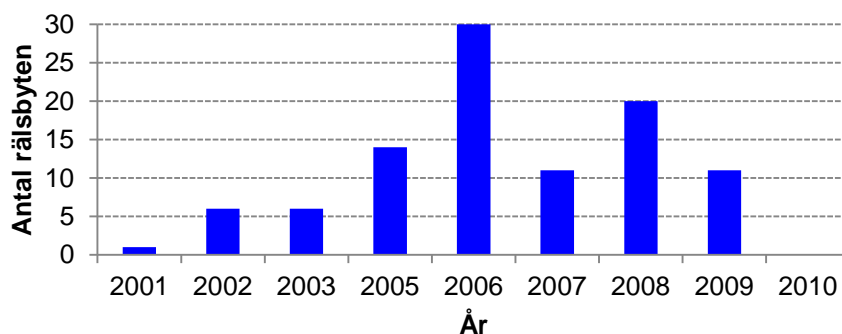
Från Tabell 6 kan potentiella besparingar utläsas, men ett medelvärde över en nioårsperiod ger inte nödvändigtvis information om det nuvarande tillståndet. Ett mål med åtgärds- och effektmodellen är att presentera indikatorer med underliggande faktorer, för att på så sätt ge utrymme för kontinuerliga förbättringar, snarare än att endast presentera en aggregerad mätning. Se Figur 18. För varje år visas de tre systemen med högst operativ risk. Bokstaven B står för spår, dvs. räls, infästning och skarvar. Spåret är i topp tre från 2001 till 2006. Efter 2006 försvinner spåret från topp tre, vilket sammanträffar med rälsbyte i Figur 19.



2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
A: 35	B: 96	B: 68	A: 38	D: 59	D: 150	D: 102	D: 64	A: 42
B: 28	A: 32	A: 47	B: 44	A: 57	B: 78	A: 77	A: 51	D: 24
C: 21	C: 30	C: 46	C: 29	C: 43	A: 63	C: 29	C: 40	C: 20

A: Växlar                      C: Positioneringssystem  
 B: Spår                        D: Felet försvann

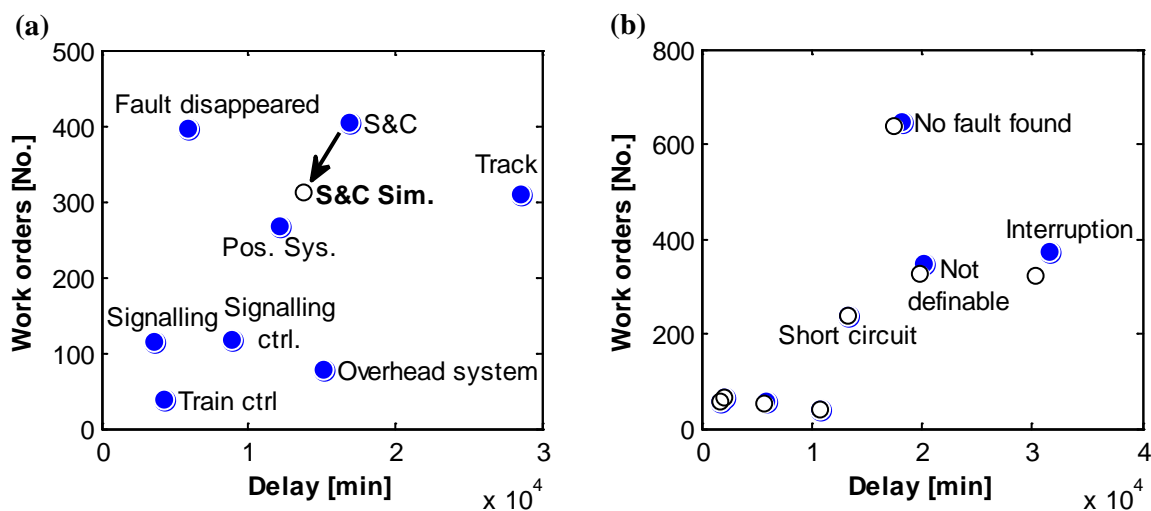
**Figur 18:** Indikator för tågförsening per år visar de tre underliggande systemen med högst riskindex. Spåret (bokstav B) försvinner efter 2006 och är inte längre bland de första tre operativa riskerna, se Figur 19.



**Figur 19:** Antal byten av rälssektioner. Det stora antalet förnyelser under 2006 sammanfaller med försvinnandet av spår i topp tre i Figur 18. 99 utav 188 spårsektioner byttes ut under perioden 2001-2010.

#### Steg 4: Identifikation, klassificering och implementering av förbättringar

Genom att konstruera om eller förbättra det förebyggande underhållet på de enheter som har många funktionsfel och ger stora förseningar kan tillförlitligheten ökas. Men innan man gör ändringar är det fördelaktigt om man kan se vad resultat kan bli. Figur 20 ger ett exempel på simulering. I figuren visar (a) resultatet avseende växlar när alla arbetsordrarna för delsystemet kontrollanordning har tagits bort från datauppsättningen, dvs. kontrollanordning antas aldrig ge några funktionsfel eller tågförseningar. En sådan förändring i datauppsättningen ger påverkan på systemnivå av växlar; se benämning *S&C* och *S&C Sim.* i (a). I (b) är alla arbetsordrar för bandelen sorterade efter orsak till fel som upptäcks av reparationslaget. De ifyllda cirkelarna är resultat när alla arbetsordrar är sorterade på orsak till fel, medan de svarta cirkelarna utan färg i visar resultatet från (a) när alla arbetsordrarna för kontrollanordning har tagits bort från datauppsättningen. Funktionsfel på grund av avbrott (interruption) minskar mest.



**Figur 20:** Simulering på systemnivå. (a) Effekt på systemnivån när alla fel i delsystemet kontrollanordning har tagits bort från datauppsättningen. (b) Effekt på felorsak när alla fel i delsystemet kontrollanordning har tagits bort från datauppsättningen. Orsaken avbrott (interruption) minskar mest.

## 4.4 Konstruktion av index för drift och underhåll av järnvägar

Index kan förenkla övervakning av tillförlitlighet genom att sammanfatta en komplex anläggnings tillförlitlighet i ett fåtal mått, vilket är enklare och går snabbare att tolka än att presentera ett stort antal indikatorer och diagram (M. Saisana et al. 2002, OECD et al. 2008, D. Galar et al. 2012). Utvecklingen av sådana indikatorer är dock mer komplex eftersom ytterligare aspekter måste tas med i beräkningen, såsom korrelation och viktning. Andra ord för denna typ av index är sammansatt indikator och meritall.

I fallstudien om åtgärds- och effektmodellen användes två parametrar för att få ett mått på operativ risk. Denna andra fallstudie har som syfte att ytterligare utveckla den operativa riskindikatorn genom att beakta tre parametrar, nämligen infrastrukturfel, tågförsening och underhållstid. En kombination av två indikatorer kan dock även beaktas som en sammansatt indikator. Nedan ges en sammanfattning av studien. Slutsatserna är preliminära eftersom analysen ännu inte är slutförd. Korrelation och normalisering behöver fortfarande analyseras.

### 4.4.1 Teori

Med avseende på feleffektanalys (FMEA) och riskmatriser, se till exempel (ISO/IEC 2009), har en sammansatt indikator definierats i studien med hjälp av simplexer enligt följande:

$$R = \left( \sum_{i=1}^N \{W_i V_i\}^2 \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

Där  $N$  är lika med det totala antalet individuella indikatorer,  $V_i$  är lika med den  $i^{th}$  individuella indikatorn och  $W_i$  är en viktningfaktor. Det finns flera olika metoder för viktning, vilka kan delas in i två huvudgrupper: statistiska metoder och metoder baserade på sakkunnigutlåtande (L. Hudrlikova et al. 2011). Tre metoder beaktas i ekv. 4.4, som är definierade som en produkt av: lika viktning, viktning från sakkunnighetsutlåtande och regressionsviktning:

$$W_i = \prod_{j=1}^3 w_{ij} \quad (4.5)$$

Om lika viktning behålls och utelämnar de andra två viktningfaktorerna fås  $W_i = w_{i1} = w_i$ . Konstanterna för lika viktning  $w_{i1}$  fås då från:

$$w_{11} \bar{V}_1 = w_{21} \bar{V}_2 = w_{31} \bar{V}_3 = \dots \quad (4.6)$$

Där:

$$\bar{V}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (4.7)$$

Där  $n$  är antalet värden för den  $i^{th}$  individuella indikatorn. Viktning i enlighet med individuell indikator  $\bar{V}_1$  skulle, till exempel, ge  $w_{11} = 1$ ,  $w_{21} = \bar{V}_1/\bar{V}_2$  och  $w_{31} = \bar{V}_1/\bar{V}_3$ .

Viktningen för sakkunnighetsutlåtande beaktas inte i fallstudien eftersom den på sätt och vis är subjektiv och därmed beror på det specifika fallet. De flesta sammansatta indikatorer förlitar sig dock på lika viktning, dvs. att alla variabler ges vikt för lika påverkan (OECD et al. 2008).

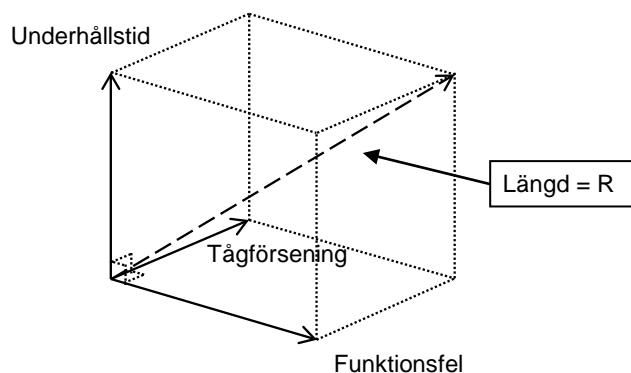
### 4.4.2 Insamling av data

Centrala indikatorer för järnvägars tillförlitlighet med avseende på tillgänglighet och kapacitet anses vara enligt följande: funktionsfel [ant.], tågförsening [min.] och underhållstid [min.], vilket ger  $N = 3$ . Funktionsfel är avhjälpan underhåll som består av akuta och veckoanmärkningar som rapporteras av underhållsentreprenören och lokföraren, men emellanåt av allmänheten. Underhållstid utgörs av

administrativ, logistisk och aktiv tid, nämligen från den tidpunkt då felet hittades till dess att det åtgärdades.

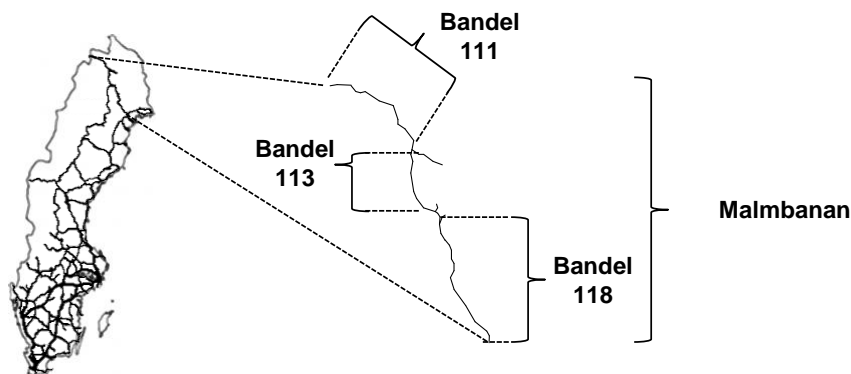
Om man går tillbaka till ekv. 4.4, ger den allmänna satsen med  $N = 3$  den tredimensionella Pythagoras sats, mao. att den sammansatta indikatorn för operativ risk ( $R$ ) är lika med diagonals längd i en kub (Figur 21):

$$R = \sqrt{(W_1V_1)^2 + (W_2V_2)^2 + (W_3V_3)^2} \quad (4.8)$$



**Figur 21:** Illustration av den resulterande sammansatta indikatorn  $R$ . Längden på den streckade vektorn motsvarar  $R$ .

Den bana som valts för fallstudien är Malmbanan i Sverige. Tre bandelar har studerats; se Figur 22.

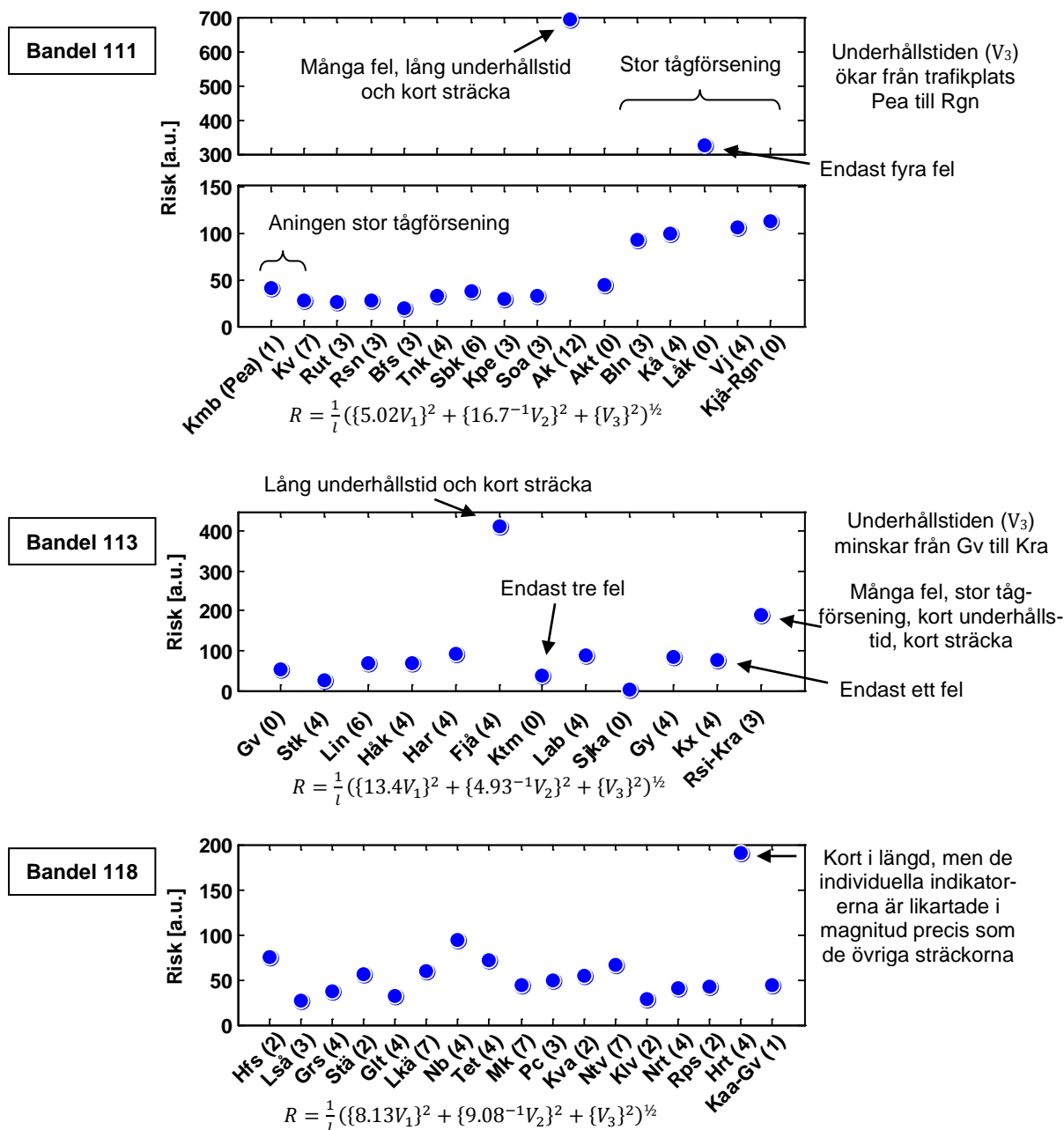


**Figur 22:** Malmbanans större bandelar, som undergått analys.

Feldata är hämtad för tidsperioden 2010.01.01 – 2012.10.31; 1035 dagar, 2 år och 10 månader. Rapporterat antal funktionsfel (arbetsordrar) är 7142, med 1687 (24 %) fel som resulterat i tågförseningar. En del tågförseningar är långa jämfört med medelvärdet och ger därmed en snedfördelad distribution. De två procenten av funktionsfelen med längsta tågförseningarna anses därför vara utliggare (kraftigt avvikande). Det blir då 1640 arbetsordrar kvar av de 1687.

Se Figur 23 för resultat. Figuren visar de tre bandelarnas operativa risk per trafikplats, med inkluderad sträcka till nästkommande trafikplats (tex.  $K_v = K_v + \text{sträckan till Rut}$ ). Risktalet har även delats med längden på sträckan för normalisering. Valet att dela risktalet med sträckans längd beror på vad man vill titta efter. De tre bandelarna bör dock inte jämföras med varandra i det här skedet, eftersom det är ett pågående arbete. För att se de underliggande anledningarna för hög respektive låg operativ risk krävs det att man tittar på de individuella indikatorerna; förklarande text har lagts till i figurerna för detta. Ekvation anges under varje graf i figuren. Konstanterna motsvarar lika viktning.





**Figur 23:** Operativ risk för bandelarna 111, 113 och 118. En jämförelse mellan bandelarna är inte tillämpligt eftersom normalisering saknas.

## 4.5 Effekten av kallt klimat på funktionsfel i järnvägar

Ett mål i detta projekt är att utveckla indikatorer för RAMS (funktionssäkerhet, driftsäkerhet, underhållsmässighet och säkerhet) och livscykelkostnad, medan ett annat mål är att utveckla en åtgärds- och effektmodell. Vintereffekter påverkar både indikatorer och tillförlitlighet. En studie utfördes sålunda (C. Stenström et al. 2012a). Nedan ges en sammanfattning av studien.

### 4.5.1 Bakgrund

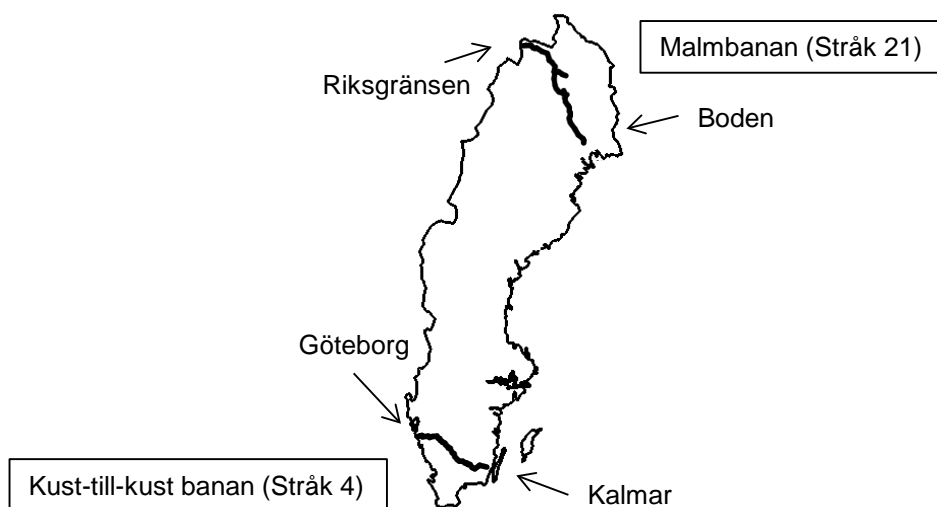
Det är allmänt känt att kallt klimat inverkar på järnvägsinfrastrukturen och dess komponenter. I Sverige var vintrarna särskilt stränga under åren 1965-66 (SJ 1966), 2001-02 (Banverket 2002), 2006-07 (VTI 2007), 2009-10 och 2010-11 (P. Unckel 2010, UIC 2011b, UIC 2011a).

Vetenskapliga publikationer om kallt klimat och järnvägar är få. I en undersökning som genomfördes av Internationella järnvägsunionen (UIC), nämnde 11 europeiska länder att deras huvudsakliga utmaningar beträffande rullande materiel på vintern härrör från: tågdesign (58 %) och infrastruktur (34 %). Sjuttion europeiska länder svarade att huvudutmaningarna i järnvägsinfrastruktur på vintern är: snöröjningsutrustning (29 %), växlar (27 %) samt räls och svetsning (20 %). Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) har undersökt data från två svenska järnvägssektioner under perioden 2001-03 och kom fram till att antalet funktionsfel som orsakar tågväntetider var 41 % högre på vintern än på sommaren (VTI 2007). Ökningen var 130 % i växlar och 24 % i övriga system. Man utgick från att vintern börjar den 1 oktober och tar slut den 30 april, närmare bestämt 58 % av året totalt sett.

Effekten av kallt klimat beror på typen av anläggningstillgångar. Temperaturen inverkan på olika typer av material är en viktig parameter. Stål undergår en övergång från duktilt (segt) till sprött tillstånd i takt med att temperaturen sjunker, vilket minskar slagåtligheten (G.J. Roe et al. 1990, T.A. Siewert et al. 2000). Dess slagseghet kan minska till 1/10 beroende på legering och bearbetning. Ett liknande fenomen, nämligen glasomvandlingstemperaturen, uppstår i amorfa material, polymerer (plast) och glas (J. Zarzycki 1991, ISO 1999). Under glasomvandlingstemperaturen blir vissa typer av plast styvare och mer spröda till följd av reducerad molekylär rörlighet. Väl kända problem som orsakats av temperaturomvandlingar i material är fartygshaverierna under andra världskriget (G.J. Roe et al. 1990, T.A. Siewert et al. 2000) och rymdskytteln Challengers olycka 1986 (Rogers Commission 1986).

I rullande materiel, har kalla klimat visat tecken på att bidra till ett ökat rälshjulsslitage och skada (M. Palo et al. 2012).

Syftet med arbetet är att undersöka järnvägfelens beroende av årstiderna vad beträffar storlek och signifikans. De bandelar som har studerats är Malmbanan och Kust-till-kust banan, stråk 21 respektive 4, se Figur 24.

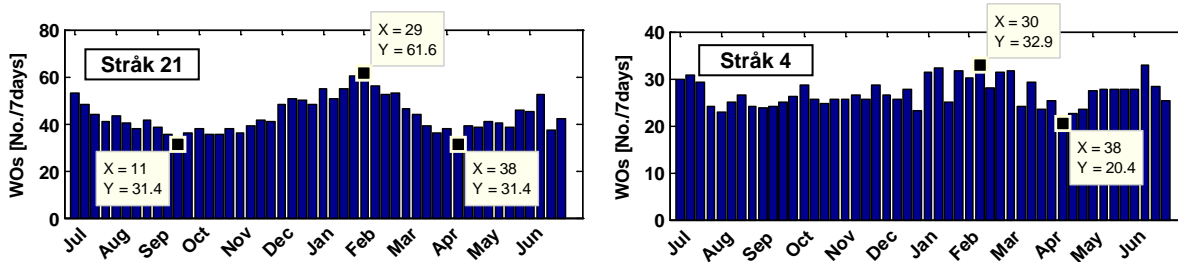


**Figur 24:** Stråk 21 och 4. Avståndet mellan Boden och Kalmar är cirka 130 mil.

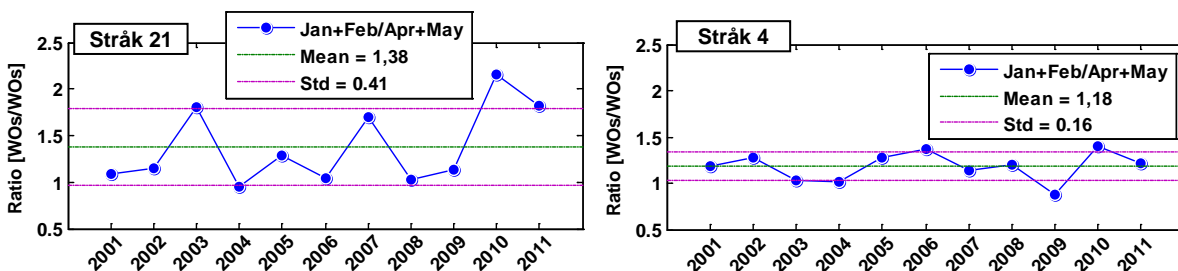
#### 4.5.2 Resultat

Årstidsskillnader i antalet funktionsfel visar sig vara statistiskt signifikant, och att det är en större effekt mellan stråk 21 och 4 visar sig också vara statistiskt signifikant. Statistisk information finns att tillgå i C. Stenström mfl. (2012a).

Antalet funktionsfel är i genomsnitt dubbelt i januari och februari på stråk 21, jämfört med på våren och sommaren. Denna effekt är inte lika uttalad på stråk 4. Se Figur 25. Effekten skiljer sig dock starkt åt från år till år, och därför är det inte möjligt att göra någon prognos för kommande vintrar genom att endast beakta medeltalet (Figur 26; standardavvikelsen är 0,41 från år till år på linje 21).



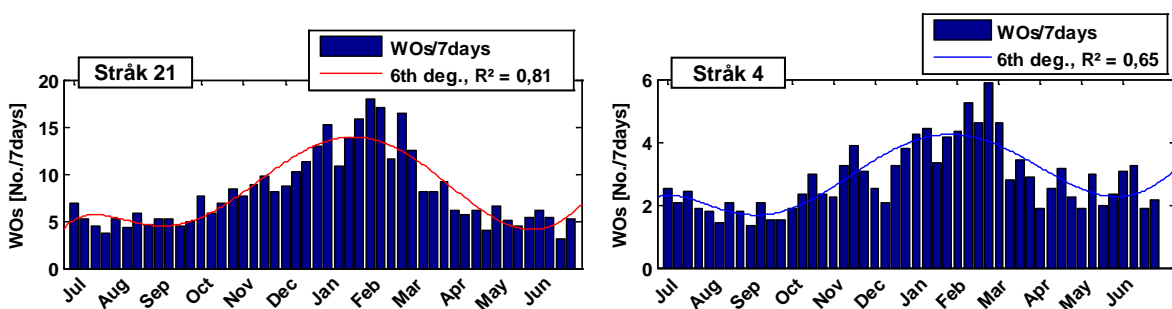
**Figur 25:** Antal funktionsfel per 7 dagar. Medel över 11 år.



**Figur 26:** Vinter- till vårförhållande för åren 2001-2011. Förhållandet mellan funktionsfel är beräknat enligt (jan+feb)/(apr+maj). Skillnad i antalet dagar per månad har kompenserats för. Std står för standardavvikelse.

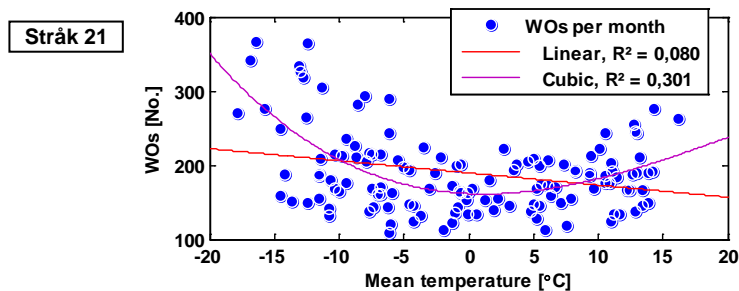
Genom att ytterligare studera stråk 21 och bortse från de 8 % av funktionsfel pga. snö och is, är skillnaden i antalet funktionsfel cirka 60 % mellan sommar och vinter jämfört med 100 %, dvs. att 40 % av ökningen kommer från växlar. Se figur i C. Stenström mfl. (2012a).

Genom att enbart studera växlar är antalet funktionsfel 2-3 gånger högre under vintern än under sommaren för både stråk 21 och stråk 4 (Figur 27). Om man bortser från snö- och isproblem, går det fortfarande att notera en ökning på 50 % för stråk 21. Se figur i C. Stenström mfl. (2012a). Förklaringsgraden är relativt bra: 0,86 och 0,65. Notera även att förklaringsgraden ökar om färre staplar används i stapeldiagrammen.

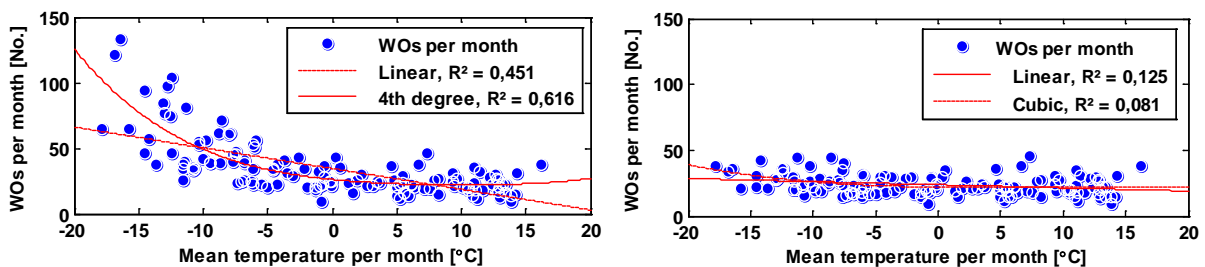


**Figur 27:** Funktionsfel i växlar per 7 dagar. 11 års genomsnitt. Snö- och isproblem är även med i beräkningen.

Vidare så har funktionsfel som funktion av temperatur undersökts på en månatlig basis. Förklaringsgraden ( $R^2$ ) är inte bra när alla funktionsfel är inkluderade, men funktionsfelen verkar öka både vid höga och låga temperaturer och vara som lägst runt, noll grader (Figur 28). Vid likadan analys på växlar visar det att snö- och isproblem har ett stort inflytande på felfrekvensen (Figur 29). Förklaringsgraden är även ganska bra, 0,62 i grafen till vänster i Figur 29.



**Figur 28:** Funktionsfel och medeltemperatur per månad i Malmbanan; minst fel vid noll grader. Baseras på 11 års data.



**Figur 29:** Funktionsfel i växlar som funktion av temperatur per månad för linje 21. På vänster sida i figuren beaktas alla fel. På höger sida beaktas inte snö- och isproblem. 11 år av data ger 132 punkter i graferna.

#### 4.6 Programvara för analys av tillförlitlighet (RAMS)

Analyserna av data i åtgärds- och effektmodellen och i effekten av kallt klimat ovan gjordes genom programmering i Matlab. Koderna har sammanställts till en programvara/demonstrator där data från Trafikverkets databaser Ofelia, TFÖR och LUPP analyseras med avseende på RAMS (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet/underhållssäkerhet). Se Bilaga B för exempel på analys.

Marknaden för affärssystem och underhållssystem (CMMS) är stor, räknat i miljarder dollar världen över, se till exempel statistik från Gartner Inc. Att kundanpassa affärssystem till att tillfredsställa specifika behov är en balans mellan vinst och kostnader. En alternativ metod är att komplettera programvarulicenser med egenutvecklad programvara. Analyserna av data inom detta projekt gjordes därför i Matlab och sammanställdes till en demonstrator för att kunna visa hur data kan analyseras automatiskt på ett kostnadseffektivt sätt för tillförlitlighet och RAMS. Följande analys kan genomföras med hjälp av programvaran (Se Bilaga B):

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| Sammanslagning av data:        | Slå samman funktionsfels- och tågförseningsdata (Ofelia, TFÖR och LUPP).  |
| Datakvalitet:                  | Plottning av ifyllningsgrad för arbetsordrar. Används för att studera arbetsorderprocessen, tex. varför vissa fält används oftare än andra. Ifyllnadsgrad över tid kan även studeras för att se effekten av policy- och kontraktsändringar. |
| Årstids- och åldringseffekter: | Plottning av fel per månad för undersökning av årstidseffekter och över år för att notera om felen ökar i antal över åren (åldrande).   |

Funktionsfel och tåg försening:	Plottning av arbetsordertyp mot tåg försening, dvs. felfrekvens (funktionssäkerhet) mot underhållstid (underhållssäkerhet och -mässighet). Arbetsordrar kan analyseras efter felsymtom, faktisk orsak, åtgärd, system, undersystem, komponent eller geografiskt område. Vissa arbetsordrar kan även medföra mycket långa tåg förseningar, såsom kontaktledningsfel. Analysen kan därför utföras genom att bortse från en viss procentsats av de längsta tåg förseningarna. Uppgifterna visas i stapel-, Pareto- och tårtdiagram.
Underhållstid:	Plottning av administrativ, logistik och aktiv underhållstid, dvs. underhållssäkerhet och underhållsmässighet.

## 4.7 Simulering av underhållstid i spår

Kapacitetsnyttjande av järnvägar har en betydelsefull inverkan på underhållsmässighet och underhållsplanering. Om det efter ingående av underhållskontrakt visar sig att kapacitetsnyttjandet ökar och detta inte återspeglas på lämpligt sätt i avtalet, kan det resultera i ytterligare och kostsamma förhandlingar. Genom att simulera underhållstiden i spår för olika kapacitetsnyttjande är det möjligt att förbättra underhållsplaneringen för järnvägar. En förstudie genomfördes för att simulera den faktiska reparationstiden till följd av tåg i trafik. Indata är:

- Tågtidtabell
- Tid för säkerhet/uppställning/undanröjande ( $t_{\text{Säkerhet}}$  eller  $t_{\text{NVA}}$  i figurerna nedan)
- Tid i spår, mao. aktiv tid för reparation ( $t_{\text{Reparation}}$ )
- Minsta tid för att utföra underhåll ( $t_{\text{Min.}}$ )
- Ankomstpunkt i tidtabellen

Utdata är:

- Faktisk tid för reparation (ATTR)

### 4.7.1 Resultat

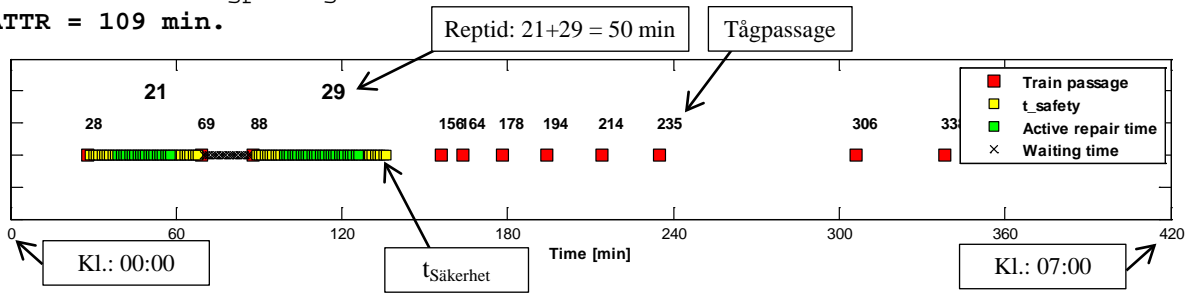
Simuleringen av underhållstiden i spår har utförts på Rautas (RUT) trafikplats, Malmbanan. Tågpassager har hämtats ur tågtidtabellen för 2011 (Trafikverkets hemsida). Figur 30 visar effekten av olika ankomsttider för underhållslaget. Tiden på x-axeln startar vid midnatt. Kapacitetsnyttjandet skiljer sig vid de olika ankomsttiderna i tidtabellen, vilket man ser effekten av i Figur 30. På liknande vis kan man simulera effekten av ökande kapacitetsnyttjande. Faktisk tid är upp till tre gånger så lång som aktiv tid beroende på underhållslagets ankomstpunkt i tidtabellen.

Figur 31 visar effekten av ett mer tidskrävande arbete och effekten av olika lång tid för säkerhet. Aktiva tiden är 150 min i både (a) och (b). Tiden för säkerhet är 10 respektive 5 minuter. Faktisk tid är upp till tre gånger så lång som aktiv tid även här.

I motsats till godståg, såsom Malmbanan, har passagerartåg i tätorter regelbundna tidtabeller. Det kan då vara intressant att studera hur pass trafikerad ett spår kan vara för att det ska vara lönt att göra underhåll. Ett fiktivt arbete på 120 minuter har simulerats med regelbundna tidtabeller med olika frekvenser. Se Figur 32. Man kan se att underhållet börjar närma sig en asymptot vid 40 minuters tågfrekvens, vilket kan vara en bra avvägning mellan trafik och underhåll i detta exempel.  $t_{\text{Säkerhet}}$  ( $t_{\text{NVA}}$ ) är inställd på 5 min och  $t_{\text{min}}$  till 10 min i detta exempel.

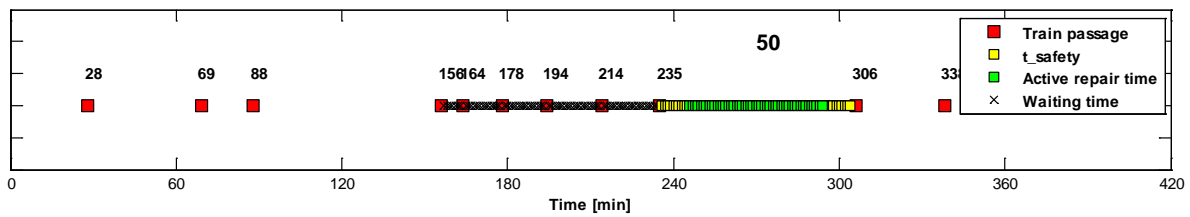
a)

Ankomst till tågpassage = 1  
**ATTR = 109 min.**



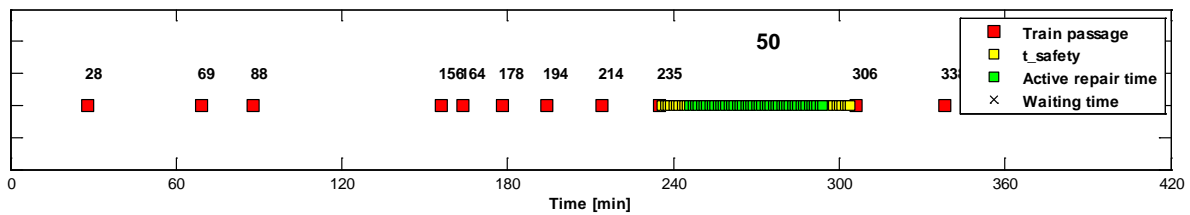
b)

Ankomst till tågpassage = 4  
**ATTR = 149 min.**



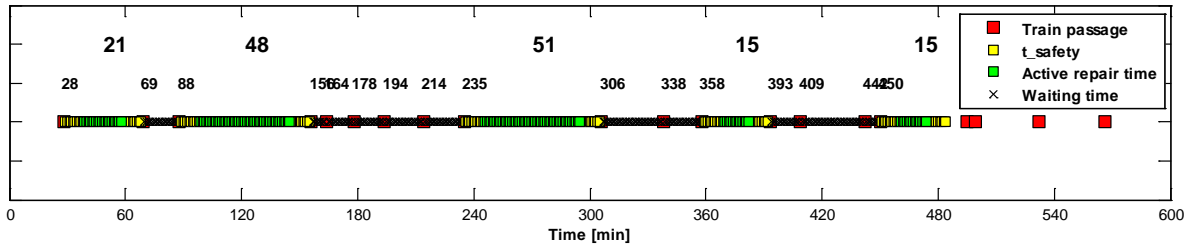
c)

Ankomst till tågpassage = 9  
**ATTR = 70 min.**

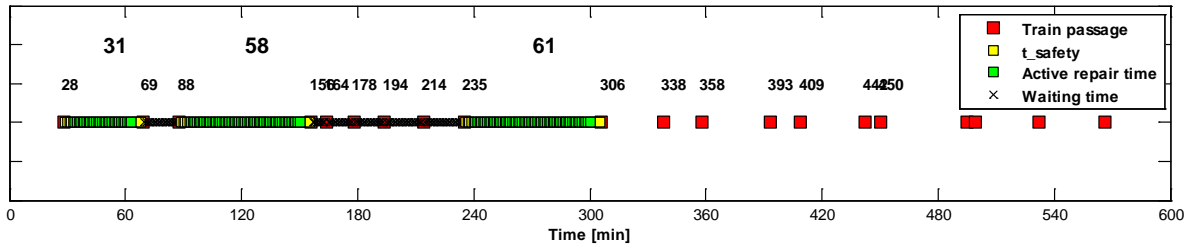


**Figur 30:** Effekten av olika ankomsttider. Kapacitetsnyttjandet skiljer sig åt för varje ankomsttid. De svarta kryssen är väntetid när perioden för att göra underhåll är för kort.  $t_{\text{Reparation}} = 50 \text{ min}$ ,  $t_{\text{Säkerhet}} = 10 \text{ min}$  och  $t_{\text{Min.}} = 0$ ,  $t_{\text{Reparation}} = 5 \text{ min}$ .

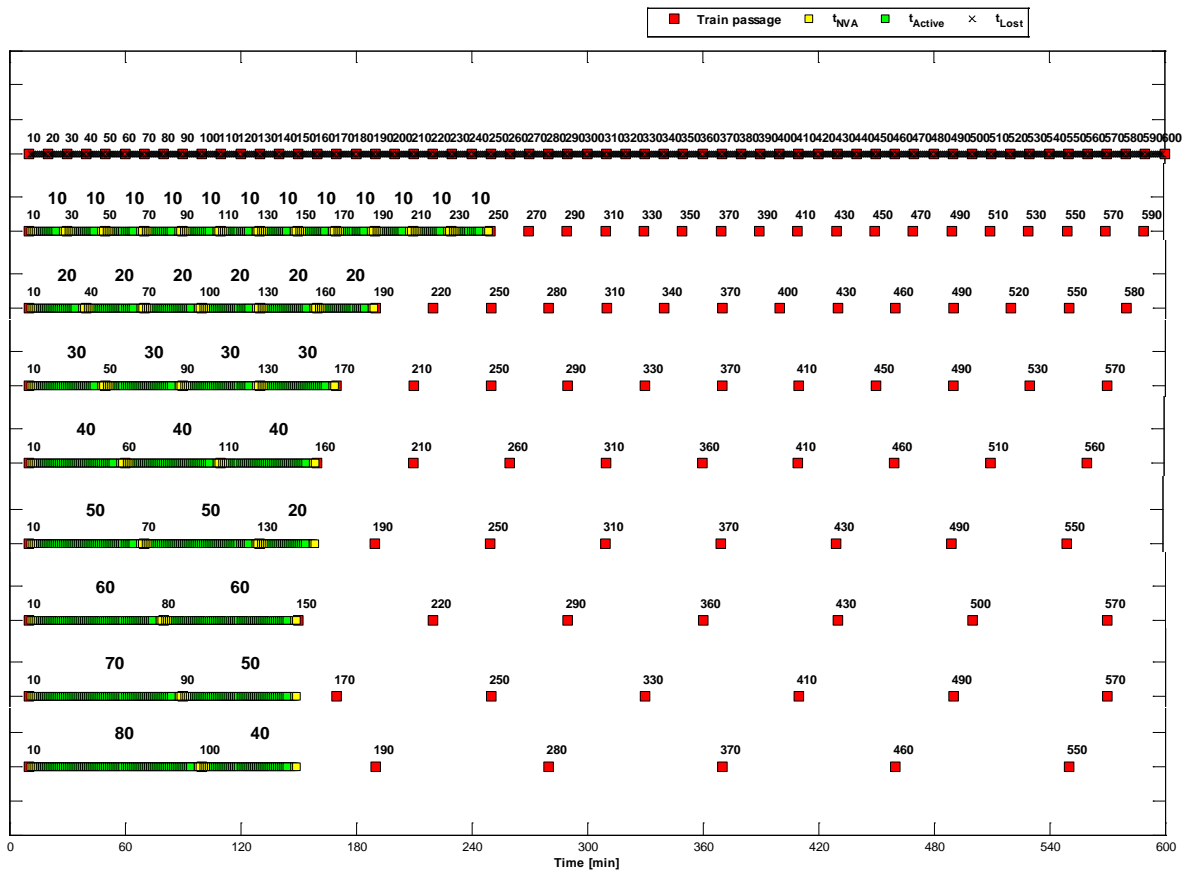
a)  
 $t_{\text{säkerhet}} = 10 \text{ min.}$   
**ATTR = 457 min.**



b)  
 $t_{\text{säkerhet}} = 5 \text{ min.}$   
**ATTR = 278 min.**



**Figur 31:** Effekten av 150 min reparation och olika  $t_{\text{säkerhet}}$  på den faktiska tiden för reparation (ATTR).



**Figur 32:** Underhållsarbete på 120 minuter mellan tåg med olika regelbundna avgångar.  $t_{\text{NVA}} = 5 \text{ min}$  och  $t_{\text{Min}} = 10 \text{ min}$ . Faktiska tiden för underhållet börjar stabiliseras på 40 minuters tågintervall.





## 5 Diskussion

Syftet med projektet är att utveckla en åtgärds- och effektmodell för effektivare underhåll av järnvägar. Modellen som utvecklats beskrivs enligt följande: Åtgärds- och effektmodellen är en metod för att underlätta utveckling och kontinuerlig förbättring av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet.

För att lyckas med implementering och utveckling av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet måste processen kunna hantera en rad faktorer, så som: organisatoriska förändringar, teknisk och mjukvaruutveckling, ändringar i anläggningsstruktur och dess användning, data-information-kunskap, ändringar i mål och ändringar i krav från intressenter (Avsnitten 2.4 och 4.3). Detta förenat med att strategisk, taktisk och operativ planering (Avsnitt 2.5) inte alltid följer dess huvudfaktorer på ett systematiskt vis (Avsnitt 4.3.3), medförde att åtgärds- och effektmodellen utvecklades med tonvikt på:

- Kontinuerlig förbättring
- Huvudfaktorerna för strategisk planering
- De underliggande faktorerna som styr indikatorerna

Åtgärds- och effektmodellen skiljer sig från andra förbättringsmetoder till följd av att den tillhandahåller en beskrivning av huvudfaktorerna för strategisk planering, samt för dess fokus på indikatorers underliggande faktorer. I traditionella förbättringsmetoder och system för mätning och övervakning av tillförlitlighet tilldelas gränsvärden till indikatorerna, vilket indikerar när en åtgärd behöver vidtas; det kan göra systemet reaktivt om det inte används på lämpligt sätt. Indikatorer för tillförlitlighet är dessutom ofta aggregerade indikatorer, såsom total tågförsening, som kan göra indikatorerna abstrakta och inte lyckas tillhandahålla någon djupare information.

### 5.1 Mål

Måluppfyllelse enligt målen i Avsnitt 1.4 diskuteras här nedan:

**Mål 1:** Kartlägga Trafikverkets drift och underhåll av järnvägar.

Underhållsförfarandet vid Trafikverket har kartlagts på övergripande nivå genom intervjuer och litteraturgranskning (C. Stenström 2012a). Projektet utgörs även av två faser (Avsnitt 1.5) som konstaterar att nyckeltal och nyckelresultatområden bör fastställas, se kartläggning i Avsnitt 4.1-4.2. Cirka 120 indikatorer identifierades (Bilaga A). Likartade indikatorer har betraktats som en och samma indikator. Vissa indikatorer har lagts till, eftersom de betraktas som allmänna indikatorer, tex. frånvaro av underhållspersonal. De listade indikatorerna ger en bas för att bygga upp ett system för mätning och övervakning av tillförlitlighet. Även om fokus har legat på järnvägsspåret, och till vissa delar på kontaktledningssystemet, har inga andra system tagits med, såsom broar, tunnlår eller signalsystem. Studier har dessutom visat att infrastrukturen och tågoperatörerna står för 20-30 % respektive 30-40 % av tågförseningarna (U. Espling et al. 2004, B. Nyström et al. 2003, R. Granström 2008). Studierna visade även att rullande materiel, såsom fordonsfel, står för 10-20 % av tågförseningarna. Mätning av tillförlitlighet i rullande materiel är sålunda lika viktig för järnvägarnas tillförlitlighet. Omfattande forskning om indikatorer och benchmarking för rullande materiel har utförts i (EQUIP 2000, IMPROVERAIL 2001, W. Adeney 2003, R. Anderson et al. 2003, UTBI 2004).

De fastställda indikatorerna har jämförts med SS-EN 15341 (CEN 2007) i Tabellerna 4 och 5. Resultatet var att 11 stycken indikatorer ansågs vara likartade. Men man bör dock komma ihåg att standarden huvudsakligen gäller för tillverkningsverksamheter och inte för service och linjära anläggningstillgångar (tex. järnvägar och eldistribution). Många järnvägsindikatorer finns sålunda inte med i standarden.

I styrkortet i Tabell A.6 är en av indikatorerna kapacitetsnyttjande, som överensstämmer med UIC (UIC 2004). En allmän indikator för tillgänglighet i järnvägar kunde dock inte hittas, såsom mått på upptid eller indikator T1 i SS-EN 15341: Total drifttid/(total drifttid + otillgänglig tid på grund av underhåll). Nyligen har emellertid en metod utvecklats av P. Söderholm mfl. (2013). Vad beträffar kapacitet, används UIC-indikatorn för kapacitetsnyttjande i stor utsträckning av infrastrukturförvaltare. Det är ett mått på hur mycket en infrastruktur är belastat i antal tåg. Mängden transporterat mäts sålunda inte.

Mätning av tillförlitlighet i järnvägar ger information om systems och komponenters skick, förutom underhållssäkerhet och andra organisationsrelaterade aspekter. Felintensitet, felorsaker och motsvarande tågförseningar kan övervakas och jämföras med beräkningar av förväntad livslängd. Det ger sålunda extra indata till en livscykelkostnadsanalys. Det erfordras dock ett väl utvecklat system för mätning och övervakning av tillförlitlighet med konsistens över tid för att kunna spåra trender. För en analys av kostnadsberäkningen för järnvägsunderhåll, se D. Ling (2005).

**Mål 2:** Utveckla stegvis införel av LCC (livscykelkostnadsanalys) och RAMS i underhållskontrakt

Indikatorer för RAMS har kartlagts och utvecklats i fallstudier (Kapitel 4). Funktionssäkerhet har studerats i form av funktionsfel, underhållsmässighet i form av aktiv underhållstid och underhållssäkerhet i form av administrativ och logistisk tid, som alla påverkar driftsäkerheten och tillförlitligheten.

Det har inte utförts någon livscykelkostnadsanalys. Så här långt har analysen fokuserat på avhjälpande underhåll. Kostnaden för avhjälpande underhåll (AU) kan fås fram genom att sätta kostnad på funktionsfel, tågförseningar och underhållstid. Uppgifter om förebyggande underhåll (FU) har samlats in för likartad analys som den som har gjorts på avhjälpande underhåll. Därefter är det enkelt att jämföra bandelars kostnadsförhållande för avhjälpande och förebyggande underhåll. Olika bandelar kommer att ge olika förhållande mellan AU och FU. Om man då jämför dess driftsäkerhet och produktivitet kan man få fram ett optimalt förhållande mellan AU och FU. Även simulering av underhållsinvesteringens kan då göras. Det här arbetet ska genomföras i fortsättningsprojektet av åtgärds- och effektmodellen.

**Mål 3:** Utveckla likartade metoder och verktyg för utbyte av data bland intressenter, dvs. infrastrukturförvaltare, operatörer, leverantörer, entreprenörer, etc.

Arbetet som har utförts i detta projekt är i kortfattat:

- Övergripande kartläggning av drift och underhåll av järnvägar på Trafikverket
- Kartläggning av indikatorer för järnvägar
- Utveckling av en åtgärds- och effektmodell
- Utveckling av en indikator och index för drift och underhåll / operativ risk
- Studie av kallt klimat
- Utveckling av programvara (demonstrator) för tillförlitlighet i järnvägar
- Utveckling av kod för att simulera tid för underhåll mellan tåglägen

Kartläggningen av indikatorer kan vara av intresse för entreprenörer för att kunna se vilken typ av data som infrastrukturförvaltare samlar in och för att hitta ömsesidiga indikatorer för datautbyte.

Åtgärds- och effektmodellen är av intresse för underhållsentreprenörer eftersom metoder och verktyg för förbättring av affärsprocesser ofta sägs användas av Fortune Global 500-företag (världens 500 största företag), tex. balanserade styrkort kombinerat med kontinuerliga förbättringar och en förbättringsmetod, såsom Sex sigma, totalkvalitet och ISO 9000.

Resultatet från analysen av kallt klimat är av intresse både för trafikoperatörer och underhålls-entreprenörer, för att jämföra med deras egen erfarenhet och använda som bas för ytterligare forskning.

RAMS-analysen i denna studie har utförts på operativ nivå; på bandelar och dess sträckor. Infrastrukturförvaltare och underhållsentreprenörer kan finna det intressant att se hur dessa presterar, tex. var flest fel inträffar och var underhållstiden är som längst. Men vid en implementering ska dessa, och likartade indikatorer, beräknas automatisk och presenteras för användarna direkt via datorer.

Metoder och verktyg för utbyte av nyckeldata bland intressenter har dock inte utförts inom projektet.

**Mål 4:** Utveckla en åtgärds- och effektmodell för att mäta och övervaka ändringar som påverkar driften av järnvägar.

**Resultat:** En åtgärds- och effektmodell har utvecklats (se diskussionen om projektets syfte ovan). Metoden utför inte mätning eller övervakning i sig själv, utan det är en förbättringsметод för mätning och övervakning av tillförlitlighet. Den framtagna RAMS-mjukvaran och simuleringsalgoritmen för underhållstid i spår motsvarar snarare mål 4:a.

Enligt de två projektfaserna (Avsnitt 1.5), bör en implementeringsplan för åtgärds- och effektmodellen utvecklas. I det här skedet har en sådan plan inte tagits fram. Arbetet med implementering kommer istället att äga rum i fas två av projektet.



## 6 Slutsatser och framtida forskning

### 6.1 Slutsatser

Följande slutsatser har gjorts i projektet:

#### **Tekniska rapporten** (ISBN: 978-91-7439-460-3)

- Punktlighet och regularitet bör studeras tillsammans. Motiveringen är att inställning av tåg kan öka punktligheten och vice versa. Punktlighet och regularitet kan även multipliceras för att ge ett mått på effektivitet (Figur 10). Suboptimering kan på så sätt motverkas. Se Avsnitt 4.1.
- En fördel med att regelbundet uppdaterade indikatorer är att det aktuella värdet kan jämföras med tidigare värden, dvs. spårning av trender. Som ett resultat av nya mättekniker, ändrade mål och organisationsförändringar, kan beräkningsmetoder av indikatorer ändras. Fördelarna med mätning, mao. möjligheten att följa trender, kan därmed gå förlorade, och därför bör de tidigare metoderna för beräkning bevaras under en viss överlappande tidsperiod. Vissa indikatorer kan ganska snabbt ge en bra trend, medan andra tar flera år. Att ta fram hållbara indikatorer är ett arbete som pågår på Trafikverket.

#### **Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar**

- En genomgång av indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar genomfördes (C. Stenström et al. 2012b, C. Stenström et al. 2013a). Indikatorer för järnvägar (huvudsakligen för spår) har listats och klassificerats i två grupper, nämligen strategi och teknik. De uppgår till cirka 120 indikatorer, vilka har jämförts med SS-EN 15341 (CEN 2007). 11 likartade indikatorer hittades, vilket kan underlätta benchmarking (jämförelse). Se Bilaga A och Avsnitt 4.1-2.

#### **Åtgärds- och effektmodell**

- En åtgärds- och effektmodell har tagits fram för att underlätta utveckling och kontinuerlig förbättring av system för att mäta och övervaka tillförlitlighet. Modellen grundar sig på cykeln planera-genomföra-utvärdera-förbättra (plan-do-study-act; PDSA) med betoning på huvudfaktorerna för strategisk planering. En fallstudie på Malmbanan har gjorts för att demonstrera och verifiera modellen (Avsnitt 4.3).
- Indikatorer är ofta av aggregerad data från flera olika system och komponenter, eller gjorda av flera olika individuella indikatorer, tex. total tågförsening eller TAK (tillgänglighet  $\times$  anläggningsutbyte  $\times$  kvalitetsutbyte), som kan göra indikatorerna abstrakta. Indikatorer bör därför presenteras med sina underliggande faktorer så att åtgärder kan vidtas snabbare. Se Figurer 13, 18 och 19.
- Arbetsordrar för funktionsfel (Ofelia) i järnvägar och tågförseningsdata (TFÖR/LUPP) har använts i fallstudien med åtgärds- och effektmodellen. Arbetsordrar utgörs av tre nivåer: system, delsystem och komponenter. Detta ger egenskapen att effekten av förändringar på komponentnivå kan simuleras på systemnivå (se Figur 20).

#### **Drift- och underhållsindex för järnvägar**

- Tre index för drift och underhåll har utvecklats. Ett där punktlighet, regularitet och eventuellt spåräge multipliceras (Figur 10). Ett index baserat på funktionsfel och tågförsening (Figurer 16-19). Samt ett index baserat på funktionsfel, tågförsening och underhållstid (Figurer 21 och 23).
- Systemet *Track* (spår) i fallstudien på bandel 111 har ett av de tre högsta indexvärdena mellan åren 2001-2006. Ett större rälsbyte utfördes 2006, vilket gjorde att spår försvann från topp tre. Se Figurer 18 och 19.

## Effekten av kallt klimat på funktionsfel i järnvägar

- Effekten av vinterklimat är statistiskt signifikant. Antalet fel under januari och februari kan i genomsnitt vara 100-200 % högre jämfört med under vår och sommar. Snö- och isrelaterade fel är inte ensamt ansvariga för den ökande andelen fel, varken på en övergripande nivå eller i växlar. Det är dock svårt att förutse och planera för en kommande vinter eftersom vinterförhållandena varierar stort från år till år. Se Avsnitt 4.5.
- Antalet funktionsfel i järnvägsinfrastrukturen verkar öka både vid höga och låga temperaturer. Antalet funktionsfel i Malmbanan är som lägst vid noll grader (Figur 28). Vad beträffar växlar ger ökningen av antalet funktionsfel i takt med att temperaturen sjunker ganska bra förklaringsgrad,  $R^2 = 0,62$  (Figur 29). Med hjälp av modellen i Figur 29 och väderprognoser kan funktionsfel och underhållsbehov förutspås på upp till ~10 dagar när det gäller växlar. Liknande prognoser kan göras för flera år i förväg med hjälp av klimatmodeller. Men en förklaringsgrad på 0,62 förenat med osäkra väderprognoser och klimatmodeller begränsar dock dess användning.

## Programvara för RAMS

- Utvecklingen av demonstratorn visar att organisationsspecifika analyser kan utföras med lönsamhet. Det minst kostsamma systemet för dataanalys kan vara att kombinera internt framtagna algoritmer med affärssystem på licens, eftersom beställning av organisationsspecifika funktioner i affärssystem är en balans mellan kostnad och vinst.
- Indikatorer för RAMS (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet/underhållssäkerhet) är enkla att få fram. Men att göra funktionssäkerhetsanalys med prediktion är dock mer komplicerad eftersom det krävs åldersdata. Beträffande Trafikverket, kan installationsåret för anläggningstillgångar i BIS-programvaran möjligtvis användas för det här ändamålet, tex. rälers installationsår.

Begreppen RAMS (funktionssäkerhet, driftsäkerhet/tillgänglighet, underhållsmässighet och säkerhet/underhållssäkerhet) och robusthet har granskats i Avsnitt 2.1. Resultatet är att termerna *tillförlitlighet*, *leveranskvalitet* och *prestanda* kan sättas på samma hierarkiska nivå och användas synonymt. Se även Avsnitt 2.1 för definiering av robusthet.

Användning av fält i Ofelia arbetsordrar har studerats i Figur 8. Varje arbetsorder består av 71 fält, varav omkring nio fält verkar vara dubletter. Figuren ger information om vilka data som kan användas i analys, men det ger också information om hur arbetsorderförfarandet kan förbättras, tex. genom att ta bort onödiga fält och förbättra hur andra fält används.

## 6.2 Fortsatt forskning

Under arbetet har flera möjliga framtida forskningar kommit fram, nämligen:

- Indikatorer för underhåll av järnvägar har identifierats, men endast några få av dem har studerats i detalj. Detta gör att indikatorerna behöver analyseras mer genomgående, tex. för att titta närmare på syfte, betydelse, fördelar, nackdelar, målnivåer, formel och frekvens. Se Avsnitten 4.1-4.2.
- Standardiserade indikatorer för tillförlitlighet och motsvarande gränsvärden (benchmarks) saknas för järnvägar. Arbete med standardisering, liknande den europeiska standarden SS-EN 15341 och harmoniseringsprojektet, kan förenkla planeringen av underhåll och jämförelse mellan olika järnvägar, och sålunda kan järnvägars kapacitet och konkurrenskraft öka (J. Kahn et al. 2011, CEN 2007).
- Multiplikation av regularitet och punktlighet kan ge ett mått på järnvägseffektivitet (Figur 10). Om ett index för spårläge, till exempel Q-värdet, dessutom beaktas får man ett mått på järnvägars totala effektivitet, liknande TAK (tillgänglighet×anläggningsutbyte×kvalitetsutbyte) som används inom tillverkningsindustrin. Denna metoder kan utvärderas ytterligare.

- Att hitta den optimala andelen förebyggande underhåll (FU) mot avhjälpande underhåll (AU) för olika enheter, såsom bandelar eller system som växlar, kan vara en utmaning. Jämförelse (benchmarking) av en uppsättning bandelar är en metod som kan användas, där en metod är att använda produktionseffektivitet, sett som producerade produkter delat med ingående resurser. Att hitta gemensamma vikter för indata och utdata är dock normalt sett inte möjligt till följd av olika operativa omständigheter för varje enhet. Med data envelopment analysis (DEA) används relativa vikter genom att beräkna de mest fördelaktiga vikterna för varje enhet i förhållande till de andra enheterna, vilket möjliggör jämförelse. DEA är en icke-parametrisk statistisk metod som kan undersökas för att jämföra bandelar och hitta bästa praxis. Se den tekniska rapporten.
- Kartläggningen av indikatorer för järnvägar har i huvudsak varit fokuserad på järnvägsspåret. Ytterligare kartläggning kan fokusera på andra system i infrastrukturen, rullande materiel och underhållsentreprenörer. Ett par europeiska projekt har emellertid studerat indikatorer och benchmarking för rullande materiel, se Kapitel 5, s. 61, i den tekniska rapporten.
- Framtida forskning skulle kunna fokusera på en mer detaljerad analys av arbetsorderprocessen och datakvalitet (Figur 8).
- Det framtagna drift- och underhållsindexet i Avsnitt 4.4 bygger på avhjälpande underhåll: funktionsfel, tågförsening och underhållstid. Arbetsordrar för förebyggande underhåll är många fler till antalet än arbetsordrar för avhjälpande underhåll. Det kan vara intressant att utveckla den sammansatta indikatorn ytterligare eller komplementera genom att inkludera förebyggande underhåll, och sedan järnvägstrafik.
- Eftersom fördelningen av funktionsfel, tågförseningar och underhållstider är kända kan kostnader knytas till. Kostnader kan tillkomma på ett liknande sätt för förebyggande underhåll. Det skulle ge förhållandet mellan avhjälpande och förebyggande underhåll, och jämförelse av bandelar skulle därefter kunna ge det optimala förhållandet mellan avhjälpande och förebyggande underhåll. Detta kommer att äga rum i fortsättningsprojektet av åtgärds- och effektmodellen.
- I analysen av kallt klimat (Avsnitt 4.5) studerades fel i järnvägar som en funktion av temperatur. Förklaringsgraden var inte bra på systemnivå där alla arbetsordrar var med, men den var bättre för delsystemet växlar. Fortsatt forskning på delsystem- och komponentnivå, inklusive temperatur, nederbörd och vind, kan vara intressant. Även skillnader i underhållstid mellan vinter och sommar kan vara intressant att studera pga. längre restid och allmänt besvärligare arbete.
- Järnvägarnas underhållsmässighet påverkas starkt av kapacitetsnyttjandet. Förstudien föreslår ytterligare forskning på den faktiska tiden för reparation som en funktion av kapacitetsnyttjande, typ av underhållsarbete, tågtidtabell och krav på säkerhet-/uppställningstid. Optimering av banarbetstider är ett arbete som precis har startats på Trafikverket.
- Ett antal studier har undersökt om man får mer underhåll för pengarna i järnvägar genom konkurrensutsättning, men flera aspekter gör analysen komplicerad, tex. indirekta kostnader, konfidentiella avtal och olika avtalstyper. Fler studier behövs för att inkludera dessa faktorer. Studier har heller inte kunnat visa hur säkerheten i järnvägarna har påverkats av avreglerat underhåll; det statistiska underlaget är begränsat för kvantitativa studier. En större kvalitativ studie är en möjlig väg för att svara på frågan, likt arbetet av U. Espling (2004, 2007).



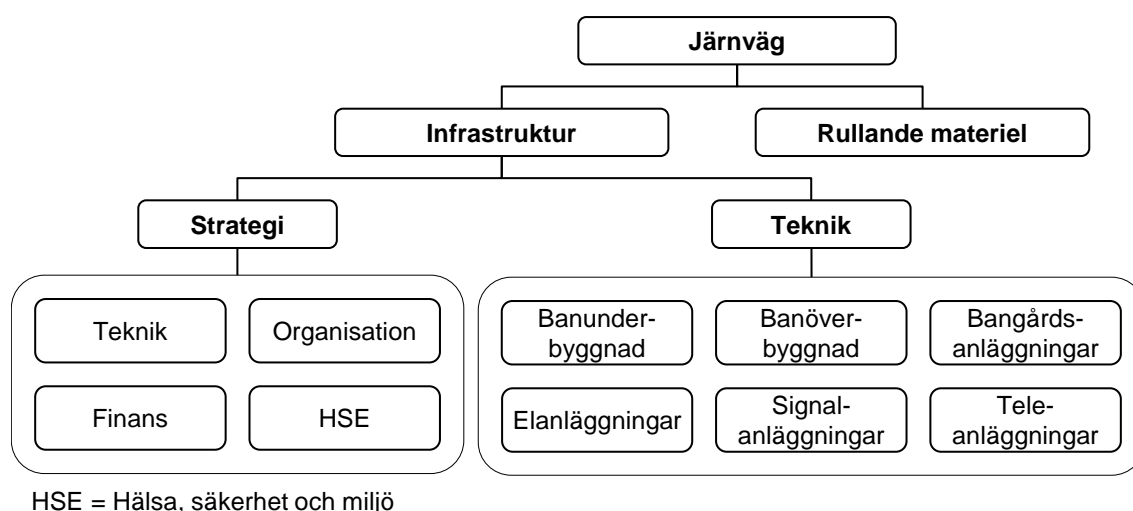


## Indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar

Denna bilaga presenterar indikatorer för tillförlitlighet i järnvägar utifrån kartläggningen i Avsnitten 4.1-2 (C. Stenström et al. 2012b, C. Stenström et al. 2013a).

### Indikatorer för strategi

Strategi-indikatorer delas in i system- och undersystemnivåer. System är hela järnvägsnätet under en infrastrukturförvaltare, tex. Trafikverket. Undersystem utgörs av stråk, bandelar, klasser och enheter (anläggningstyper, anläggningsdelar och komponenter). Vissa indikatorer kan påträffas på båda nivåer, medan andra påträffas endast på en nivå. Strategi-indikatorerna är uppdelade i fyra grupper/perspektiv enligt Figur A.1. Varje indikator har getts ett identifieringsnummer (#) som är likartat med det system som används i SS-EN 15341 (CEN 2007), dvs. startar med E, T, O och för den fjärde gruppen, startar numret med H.



**Figur A.1:** Struktur av indikatorer för järnvägsinfrastrukturen (C. Stenström 2012a, C. Stenström et al. 2012b, C. Stenström et al. 2013a).

Tekniska indikatorer har ett nära samband med tillförlitlighet, tillgänglighet och underhållsmässighet (RAM). Se Tabell A.1.

**Tabell A.1:** Tekniska indikatorer för drift och underhåll av järnvägar.

Tekniska indikatorer (tekniskt perspektiv)			
Kategori	Indikator (kommentar) [enhet]	Referens	#
Tillgänglighet	<b>Systemnivå</b>		
	Ankomstpunktlighet [ant. eller %; passagerar- och godstrafik]	(Banverket 2010, P. Söderholm et al. 2011)	T1
	Regularitet [ant. eller %; passagerar- och godstrafik]	(Banverket 2010)	T2
	Funktionsfel [ant.]	(CEN 1999, VTI 2011,	T3
	Tågförsening [tid; passagerar- och godstrafik]	B. Nyström et al. 2003,	T4
Tågförsening per ägare (driftledningscentral, sekundära förseningar, infrastruktur, tågoperatörer, olyckor och trafikincidenter, osv.) [%/ägare]	R. Granström 2008, R. Granström et al. 2005, B. Nyström 2009)	T5	

**Tabell A.1:** Fortsättning.

<b>Tekniska indikatorer</b> (tekniskt perspektiv)			
<b>Kategori</b>	<b>Indikator</b> (kommentar) [enhet]	<b>Referens</b>	<b>#</b>
Tillgänglighet	<b>Systemnivå</b>		
	Tågstörande funktionsfel [ant. eller %]	(C. Stenström 2012b, Banverket 2007)	T6
	Tillfälliga hastighetsbegränsningar [ant., timmar]	(BSL 2009)	T7
	<b>Undersystemnivå</b>		
	Ankomstpunktlighet per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [ant., % eller i tid]	(Banverket 2010)	T8
	Regularitet per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [ant. eller % per stråk, bandel, etc.]	-	T9
	Funktionsfel per enhet (anläggningstyper, anläggningsdelar eller komponenter) [ant. per enhet]	(VTI 2011, B. Nyström et al. 2003, R. Granström 2008, R. Granström et al. 2005, B. Nyström 2009)	T10
	Funktionsfel per spår-km, stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [ant. per spår-km, stråk, etc.]		T11
	Tågförsening per enhet (anläggningstyper, anläggningsdelar eller komponenter) [tid per enhet]		T12
	Tågförsening per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [tid per stråk, bandel, etc.]		T13
Tillfälliga hastighetsbegränsningar per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [ant. per stråk, bandel, etc.]	(BSL 2009)	T14	
Underhållsmässighet	<b>Systemnivå</b>		
	Medelreparationstid (mätt på underhållsmässighet)	(CEN 1999, INNOTRACK 2009)	T15
	<b>Undersystemnivå</b>		
	Medelreparationstid per enhet (mätt på underhållsmässighet)	(B. Nyström et al. 2003, INNOTRACK 2009)	T16
Kapacitet	<b>Systemnivå</b>		
	Trafikvolym [tåg-km och ton-km]	(Banverket 2010, T. Åhrén et al. 2004)	T17
	<b>Undersystemnivå</b>		
	Trafikvolym per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [tåg-km och ton-km per stråk, bandel, etc.]	(Banverket 2010, T. Åhrén et al. 2004)	T18
	Kapacitetsnyttjande (per 24h och 2h) [%]	(UIC 2004, Banverket 2010, T. Åhrén et al. 2004)	T19
	Kapacitetsnyttjande per unespårmeter (upp, ned och enkelspår) [tåg-km per unemeter]	(Banverket 2007)	T20
Komfort	<b>Undersystemnivå</b>		
	Spårläge (tex. K- och Q-värde) [index]	(BSL 2009)	T21
OEE och DEA	<b>Undersystemnivå</b>		
	Produktionseffektivitet (OEE) per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [%/linje, klass eller område]	(T. Åhrén et al. 2009b)	T22
	Data envelopment analysis (DEA) [-]	(S.A. George et al. 2008, R. Malhotra et al. 2009)	T23
Ålder	<b>Undersystemnivå</b>		
	Anläggningstillgångars medelålder (räls, växlar, sliprar, ballast, etc.) [tid]	(Trafikverket 2011)	T24

Kvantitativa indikatorer bör alltid kompletteras med kvalitativa indikatorer, tex. genom frågeformulär som kvantifierar kvalitativa aspekter genom att använda en skala, tex. 1-5 (mao. Likertskaala). Detta är särskilt viktigt ur ett organisationsperspektiv (medarbetarperspektiv) till följd av starka mänskliga interaktioner. Se Tabell A.2 för kvantitativa organisationsindikatorer.

**Tabell A.2:** Organisationsindikatorer för drift och underhåll av järnvägar.

<b>Organisationsindikatorer</b> (organisatoriskt perspektiv)			
<b>Kategori</b>	<b>Indikatorer</b> (kommentarer) [enhet]	<b>Referens</b>	<b>#</b>
Ledning/styrning av underhåll	<b>Systemnivå</b>		
	Andel förebyggande/avhjälpande underhåll [%]	(U. Espling et al. 2004)	O1
	Medelväntetid (Administrativ tid + transporttid) (mått på underhållssäkerhet/organisationsberedskap/reaktionstid/ankomsttid) [tid]	(INNOTRACK 2009)	O2
	Eftersatt underhåll [ant. eller tid]	(BSL 2009, INNOTRACK 2009)	O3
	Överskridande av underhållstid i spår [ant. eller tid]	(U. Olsson et al. 2004)	O4
	<b>Undersystemnivå</b>		
	Andel förebyggande/avhjälpande underhåll per enhet eller per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [% per enhet, stråk, bandel, etc.]	(Banverket 2007)	O5
	Medelväntetid per enhet eller per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område (Administrativ tid + transporttid) (mått på underhållssäkerhet/organisationsberedskap/reaktionstid/ankomsttid) [% per enhet, stråk, bandel, etc.]		O6
Felrapporteringsprocess	<b>Systemnivå</b>		
	Funktionsfel i infrastruktur med okänd orsak [ant. eller %]	(C. Stenström 2012b, Banverket 2007)	O7
	<b>Undersystemnivå</b>		
	Funktionsfel i infrastruktur med okänd orsak per enhet eller per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [Ant. eller % per enhet, stråk, bandel, etc.]	(C. Stenström 2012b, Banverket 2007)	O8

Många övergripande finansiella indikatorer regleras av departementet som handhar infrastrukturförvaltarna och är därför enkla att hitta, se Tabell A.3.

**Tabell A.3:** Finansiella indikatorer för underhåll av järnvägsinfrastruktur.

<b>Finansiella indikatorer</b> (Finansiellt perspektiv)			
<b>Kategori</b>	<b>Indikator</b> (kommentar) [enhet]	<b>Referens</b>	<b>#</b>
Kostnadsallokering	<b>Systemnivå</b>		
	Underhållskostnad (inklusive och exklusive administrativa kostnader) [monetär]	(BSL 2009, Banverket 2010, Trafikverket 2011)	E1
	Administrativ kostnad för underhåll (eller indirekt underhållskostnad) [monetär]	(Banverket 2010, Trafikverket 2011)	E2
	Underhållskostnad per tåg-km, spår-km eller ton-km [kr per tåg-km, spår-km eller ton-km]	(BSL 2009, UIC - LICB 2008, Banverket 2010, T. Wireman 2003)	E3
	Kostnad för underhållsentreprenör	(Trafikverket 2011)	E4
	Kostnad för avhjälpande underhåll [monetär]	(Banverket 2007)	E5
	Kostnad för förebyggande underhåll [monetär]		E6
	<b>Undersystemnivå</b>		
	Underhållskostnad per enhet eller per stråk, bandel, trafikplats, klass eller område [Ant. eller % per enhet, stråk, bandel, etc.]	(REMAIN 1998, A. Nissen 2009a, A. Nissen 2009b)	E7

Faror och dålig ergonomi är vanligare för underhållspersonal än för produktionspersonal på grund av färre standardiserade arbeten, sänkta barriärer, läckage, tryck, elektricitet, osv. (D. Galar et al. 2011). Precis som i alla former av järnvägstransport, är säkerheten en oerhört viktig faktor. Allmänna indikatorer för hälsa, säkerhet och miljö är enkla att hitta och krävs ofta enligt lag, men specifika indikatorer för underhåll är mer sällsynta. Båda typerna har beaktats i Tabell A.4.

**Tabell A.4:** Indikatorer för hälsa, säkerhet och miljö för underhåll av järnvägsinfrastruktur.

Indikatorer för hälsa, säkerhet och miljö			
Kategori	Indikator (kommentar) [enhet]	Referens	#
Hälsa	Frånvaro av underhållspersonal [tid, ant. eller %]	Allmänt	H1
	Omsättning av underhållspersonal [ant. eller %]		H2
	Samtal med underhållspersonal [ant. eller %]		H3
Säkerhet – Allmän	Besiktningssmärkningar med allvarlighetsgrad Akut och Vecka [ant.]	(Banverket 2007)	H4
	Besiktningssmärkningar med allvarlighetsgrad Akut och Vecka per spårmeter el. fiktiv spårmeter [Ant. per/ meter]		H5
	Död och personskador (eller döda och sårade och olyckor) [ant.]	(BSL 2009, Trafikverket 2011, M. Holmgren 2005)	H6
	Olyckor vid järnvägs korsningar [ant.]	(BSL 2009, T. Åhrén et al. 2004)	H7
	Olyckor som involverar järnvägsfordon [ant.]	(T. Åhrén et al. 2004)	H8
	Tillbud [ant.]	(Trafikverket 2011)	H9
Säkerhet – Underhåll	Olyckor och tillbud i samband med underhåll [ant.]	(M. Holmgren 2005)	H10
	Olyckor och tillbud i samband med funktionsfel [ant.]		H11
	Urspårningar [ant.]	(BSL 2009, Trafikverket 2011, S.M. Famurewa et al. 2011)	H12
	Solkurvor [ant.]	(BSL 2009)	H13
Miljö	Miljöolyckor och -tillbud till följd av funktionsfel [ant.]	Allmänt	H14
	Energiförbrukning per område [J/område]	(T. Åhrén et al. 2004)	H15
	Användning av miljöfarlig materiel [-]		H16
	Användning av icke förnybart materiel [-]		H17

## Indikatorer för teknik

Teknik-indikatorer för övervakning av järnvägars tillstånd har delats in i följande sex kategorier: banunderbyggnad, banöverbyggnad, bangårdsanläggningar, elanläggningar, signalanläggningar och teleanläggningar. Tillståndsovervakning av järnvägar har kartlagts genom att studera olika inspektionsmetoder, huvudsakligen i (BSL 2009, C. Esveld 2001, INNOTRACK 2008); se Tabell A.5. Okulära och manuella inspektioner har inte beaktats till följd av de många rutiner de medför. Övervakning av broars och tunnars tillstånd har inte heller tagits med i beräkningen, eftersom de inte ligger inom ramen för den här studien. Detektorer övervakar rullande materiel; endast infrastrukturen har beaktats i denna studie. Den rullande materiet är trots detta lika viktig som infrastrukturen eftersom dem båda kommer att vara i ett liknande tillstånd (D. Lardner 1850). Se A. Bracciali (2012) för en översikt av detektorer i järnvägar.

**Tabell A.5:** Tillståndsövervakning av järnväg; metoder, parametrar och indikatorer.

Egenskap	Metod	Parameter (komponentnivå)	Indikator (undersystemnivå)
<b>Banunderbyggnad</b>			
<b>Järnvägsbank</b>			
Ballastsammansättning	- Georadar (automatisk)	- Ballastsammansättning	-
Spårstyvhet (avseende bärförmåga)	- Hydraulisk belastning (automatisk med stopp)	- Spårnedböjning/-styvhet/hållfasthet	Därmed dras slutsatsen: Inspektionsanmärkingar om förlust av styvhet [ant. eller ant./km]
	- Nedböjningsmätare (kontinuerlig)	- Spårnedböjning/-styvhet/hållfasthet och böjningshastighet	
Ballastförening	- Termografi	- Förening (relaterat till dränering)	Därmed dras slutsatsen: Inspektionsanmärkingar om förorenad ballast och dålig dränering [ant. eller ant./km]
Fukttinhåll	- Resistivitets-tomografi	- Fukttinhåll (relaterat till dränering)	
<b>Spårgeometri</b>			
Geometri	- Mekanisk kontakt - Optiskt system - Gyroskopsystem	- Spårvidd (räl till räl) - Rälsförhöjning - Lutning (längsgående nivå) - Vridning - Rälposition (spatial pos.)	- TQI (spårkvalitetsindex), baserat på standardavvikelse, normalt sett för var 200:e meter. Därmed dras slutsatsen: - Inspektionsanmärkingar på spårgeometri [ant. eller ant./km]
	- Felrapportering	- Solkurvor - Punktfel	
<b>Spårromgivningar</b>			
Trädsäkring och skyltar/signaler	- Videosystem	- Vegetationsröjning - Signalsikt	- Inspektionsanmärkingar på spårromgivningar [ant. eller ant./km]
<b>Spår</b>			
Material	- Kontinuerlig övervakning med hjälp av sensorer	- Temperatur - Rälspänning (mekanisk)	Därmed dras slutsatsen: - Fara för solkurvor [ant. eller ant./km] - Fara för rälbrott [ant. eller ant./km] - Solkurvor [ant. eller ant./km] - Rälbrott [ant. eller ant./km]
	- Ultraljud	- Dikontinuiteter i huvud, liv och fot.	
	- Virvelström	- Dikontinuiteter i körytan	

**Tabell A.5:** Fortsättning.

Egenskap	Metod	Parameter (komponentnivå)	Indikator (undersystemnivå)
<b>Banöverbyggnad</b>			
<b>Spår</b>			
Rälsprofil, rälsyta och skarvar	- Optiskt system för rälprofil - Differential-transformator för korrugering - Lagerbox-accelerometer	- Rälprofil - Sidoslitage - Höjdsitage - Rällutning - Rältyp - Korrugering (amplitud och $\lambda$ )	Därmed dras slutsatsen: - Inspektionsanmärkningar från profilmätning [ant. eller ant./km] - Inspektionsanmärkningar med krav på komponentbyte [ant. eller ant./km] - Diskontinuiteter i farbana [ant.]
	- Videosystem	- Rälbrott - Skarvar - Diskontinuiteter i farbana - Korrugering - Befästning	
<b>Växlar</b>			
Geometri och material	- Mätvagn	- Spårnedböjning i växlar	Därmed dras slutsatsen: Inspektionsanmärkningar om spårnedböjning i växlar [ant. eller ant./växlar]
	- Kontinuerlig övervakning med hjälp av sensorer	- Växeltungans läge - Kontaktområde för tunga och räl - Spel tunga/räl - Mekanisk spänning - Effekt- och strömförbrukning	Därmed dras slutsatsen: Felfunktioner efter växeltyp [ant. eller %] (i öppet läge, i stängt läge, vid restspänning, detektorstavar, effekt- eller strömförbrukning)
		- Slag i korsningsspets (slitage)	Därmed dras slutsatsen: - Axelpassager [ant.] - Energiupptag i korsningsspets [J]
		- Temperatur - Mekanisk spänning (längsgående)	-
	- Mobil mätvagn (trolley)	- Växelgeometri	Därmed dras slutsatsen: - Total geometrisk avvikelse [mm] - Inspektionsanmärkningar [ant.]
	- Ultraljudstestning	- Ojämnheter vid kritiska punkter	Därmed dras slutsatsen: Anmärkningar om ultraljudstestning [no. or no./switches]
<b>Elanläggningar</b>			
<b>Kontaktledningssystem</b>			
Position och skick	- Optiskt system (laser)	- Kontakttrådens vertikala och laterala position - Kontakttråds-slitage - Diskontinuiteter på kontakttråd	Därmed dras slutsatsen: Inspektionsanmärkningar om krav på justering eller byte av kontaktledningskomponenter [ant. eller ant./km]
	- Videosystem	- Bärinans, bärtrådens och kontakttrådens skick	

**Tabell A.6:** Styrkort för drift och underhåll av järnvägar.

Perspektiv	Aspekt	Indikatorer [antal]	
		System	Undersystem
<b>Strategi</b>			
Teknik	Tillgänglighet	7	7
	Underhållsmässighet	1	1
	Kapacitet	1	3
	Komfort	-	1
	OEE och DEA	-	2
	Ålder	-	1
Organisation	Ledning/styrning av underhåll	4	2
	Felrapporteringsprocess	1	1
Finans	Kostnadsallokering	6	1
Hälsa, säkerhet och miljö	Hälsa	3	-
	Säkerhet – Allmän	6	-
	Säkerhet – Underhåll	4	-
	Miljö	4	-
<b>Teknik</b>		<b>Undersystem</b>	<b>Komponent</b>
Teknik	Banunderbyggnad	7	14
	Banöverbyggnad	16	26
	Bangårdsanläggningar	-	-
	Elanläggningar	1	4
	Signalanläggningar	-	-
	Teleanläggningar	-	-





## Programvara för tillförlitlighet (RAMS)

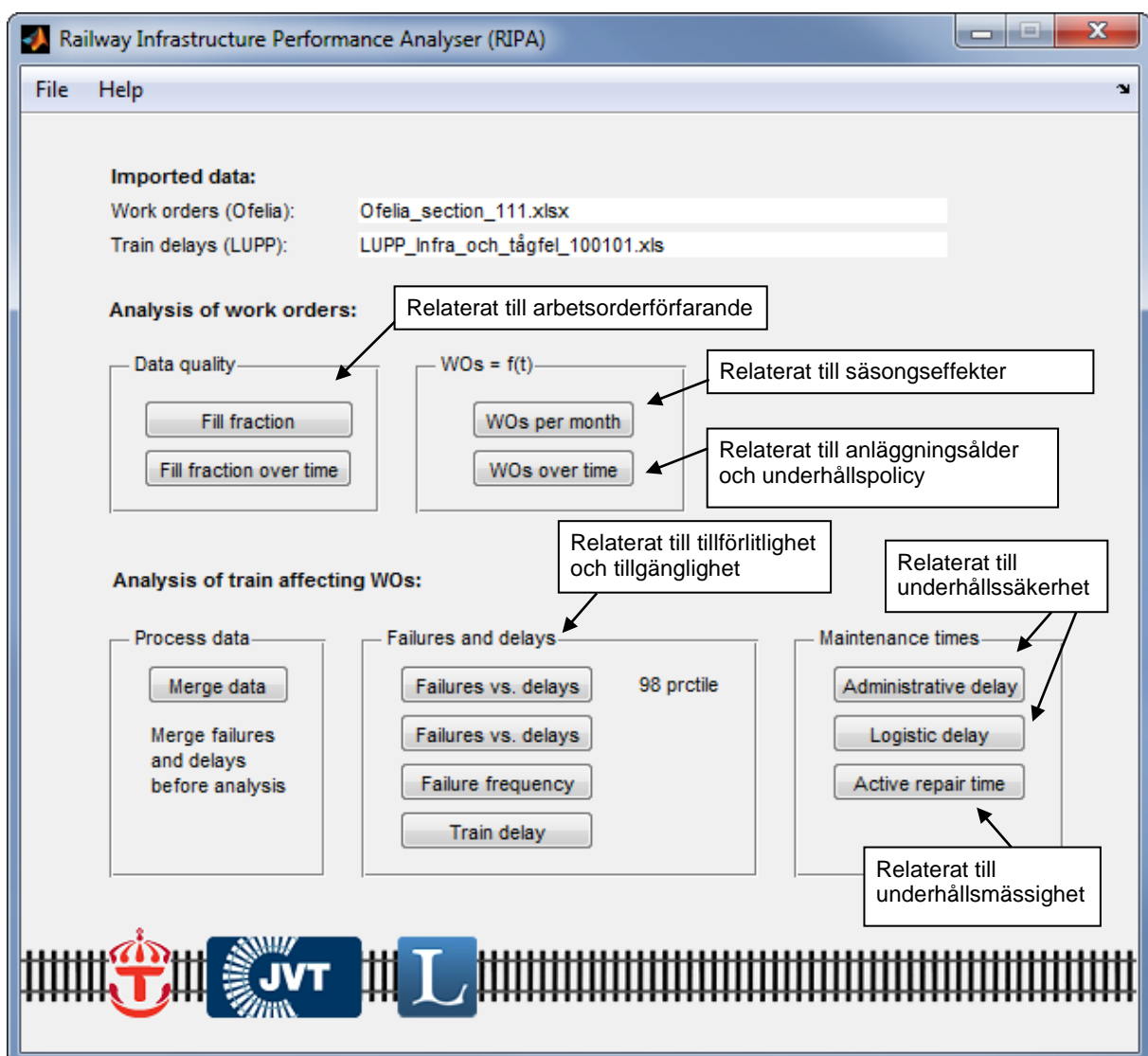
**Grafiskt användargränssnitt:** Christer Stenström och Mahantesh Nadakatti

**Algoritmer:** Christer Stenström

En demonstrator har utvecklats i Matlab för analys av arbetsorder- och tågförsejningsdata från Trafikverket. Grafiska användargränssnittet visas i Figur B.1. Användarinstruktioner tillhandahålls i hjälpmenyn. Analyser kan göras bland annat med avseende på funktionsfel (funktionssäkerhet), väntetid (underhållssäkerhet) och medelreparationstid (underhållsmässighet), på system, undersystem, komponentnivå, felsymtom, orsak, åtgärd, geografisk region, osv.

Simuleringar kan utföras genom att ändra ingående Ofelia-, LUPP- och TFÖR-filer (Excel-filer från Trafikverket), tex. simulering av effekter på systemnivå genom ändringar på komponentnivå.

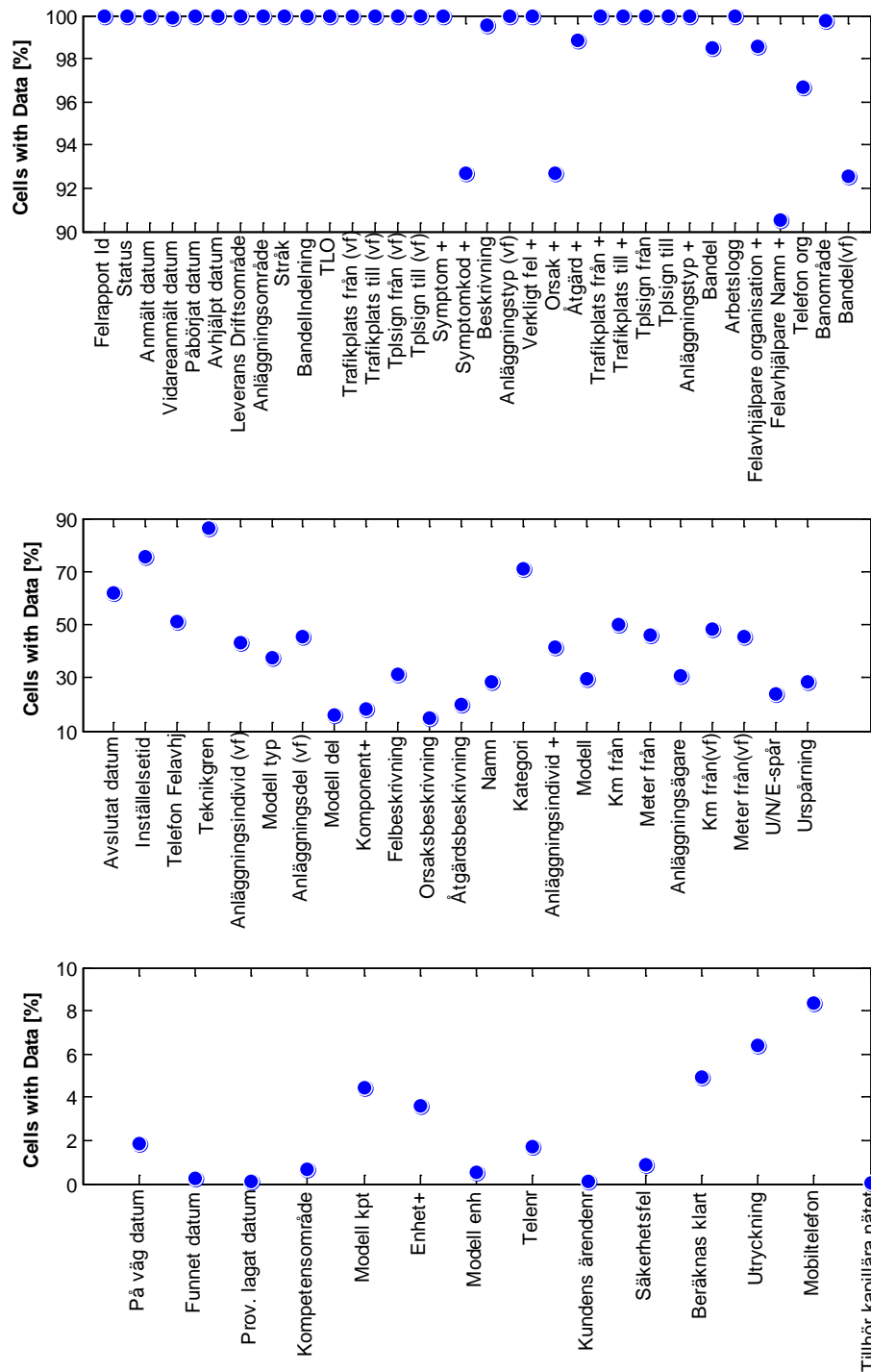
För att ändra vilken kolumn i Excel-filerna som ska analyseras krävs det att man ändrar indata i skriptfilerna. Vidare innehåller inte demonstratorn alla algoritmer som utvecklats för resultaten i Kapitel 4. Exempel på analys ges i figurerna nedan.



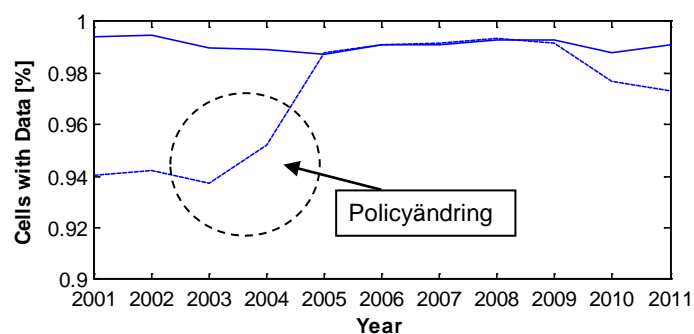
Figur B.1: Grafiskt användargränssnitt.

## Analys av användningsfrekvensen av datafält i Ofelia

Analys av användningsfrekvensen av datafält i Ofelia (arbetsordersystemet för avhjälpande underhåll) ger information om datakvalitet och underhållspolicy. Ofelia-data är från bandel 111 (Malmbanan) som sträcker sig från Kiruna till Riksgränsen, och är över perioden 2001.01.01-2012.01.01. Det totala antalet arbetsordrar är 9 815. Se Figurer B.2 och B.3.



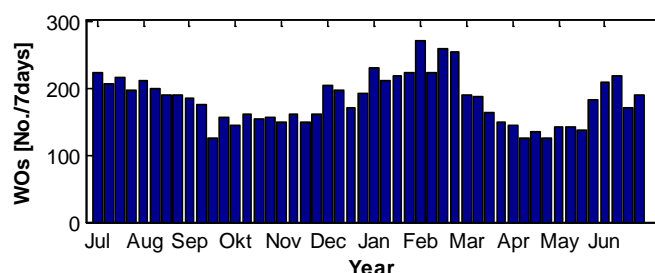
**Figur B.2:** Användning av fält i arbetsordrar för funktionsfel (Ofelia). Varje arbetsorder utgörs av 71 fält. Fält som fyllts i till 100 % innebär att alla arbetsordrar har text eller siffror i de specifika fälten. Diskussion i Avsnitt 3.2.



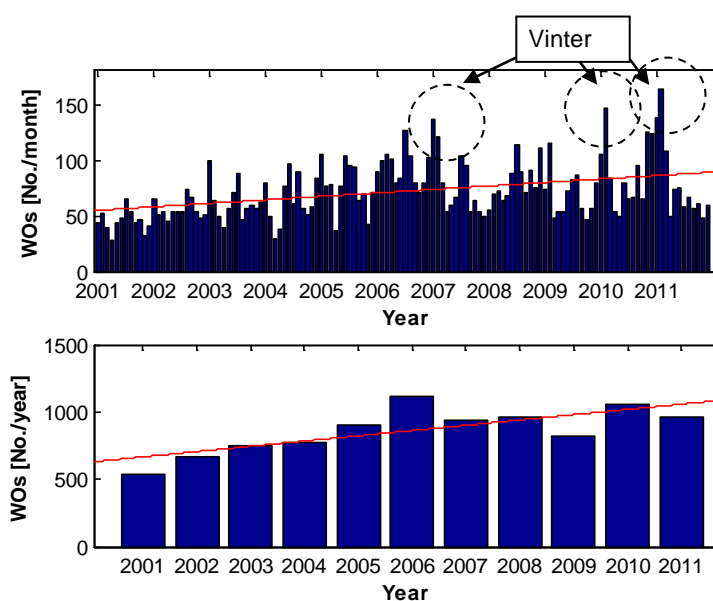
**Figur B.3:** Dataifyllningsintensitet för arbetsordrar över tid. Den heldragna linjen är lika med fältens ifyllningsfrekvens med en ifyllningsfrekvens på över 90 %. Den streckade linjen är lika med fältens ifyllningsfrekvens med en ifyllningsfrekvens på över 80 %.

### Analys av arbetsordrar över tid

Arbetsordrar över tid ger information om säsongseffekter, nedbrytning/åldring av anläggningar och underhållspolicy. Ofelia-data är från bandel 111 (Malmbanan) som sträcker sig från Kiruna till Riksgränsen, och är över perioden 2001.01.01-2012.01.01. Det totala antalet arbetsordrar är 9 815. Se Figurer B.4 och B.5.



**Figur B.4:** Arbetsordrar per 7 dagar. Närmare bestämt 12 år i genomsnitt.

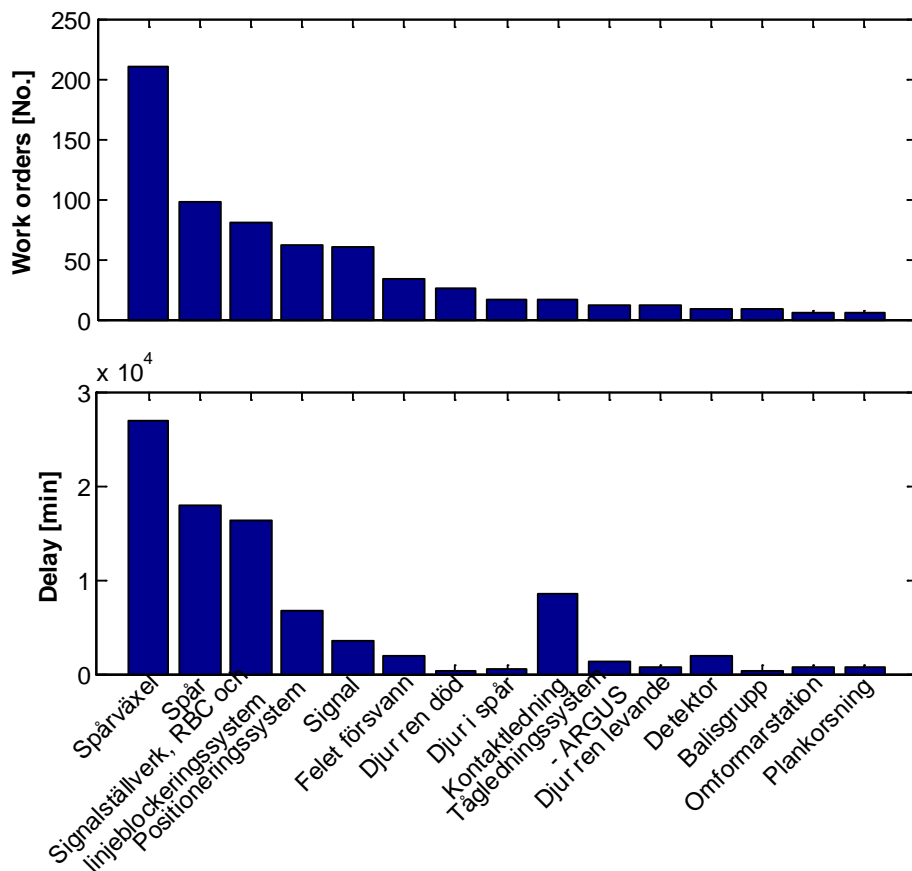


**Figur B.5:** Funktionsfel över tid (ökande).

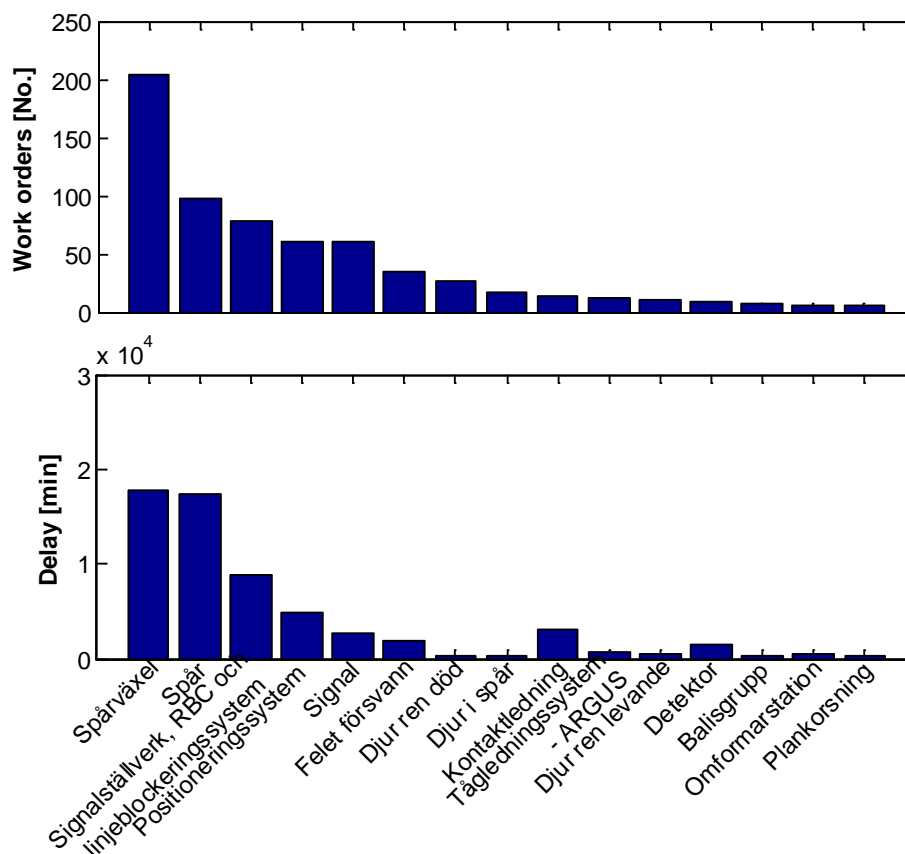
## Analys av funktionsfel som gett tågförseningar

Datorsystemet och förfarandet för registrering av tågförseningar på Trafikverket ändrades under 2009; data före och efter slutet av 2009 ska därför helst analyseras separat. Demonstratorn kan analysera data både före och efter systemändringen. Ofelia och TFÖR används före slutet av 2009, och Ofelia och LUPP används därefter.

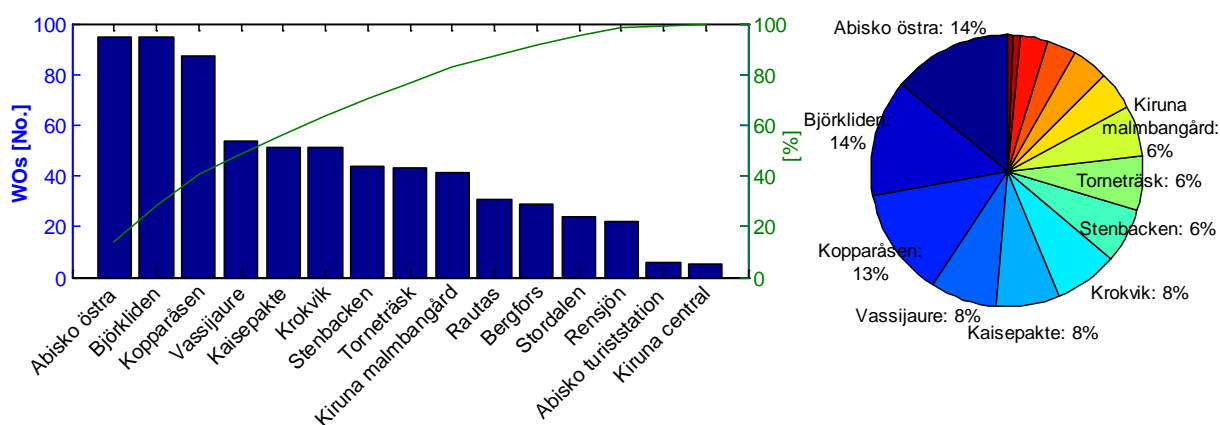
Analysen nedan gäller för bandel 111 mellan 2010.01.01-2012.03.27. Antalet arbetsordrar kopplade till tågförseningar är 686 av 2 222 stycken. De 686 arbetsordrarna består av 562 infrastrukturfel, 82 hjul- och pantograf-fel, samt 42 för djur på spåret. Analys av arbetsordrar och motsvarande tågförseningar visas i Figurena B.6-9. Underhållstider för dessa arbetsordrar visas i Figurena B.10-12.



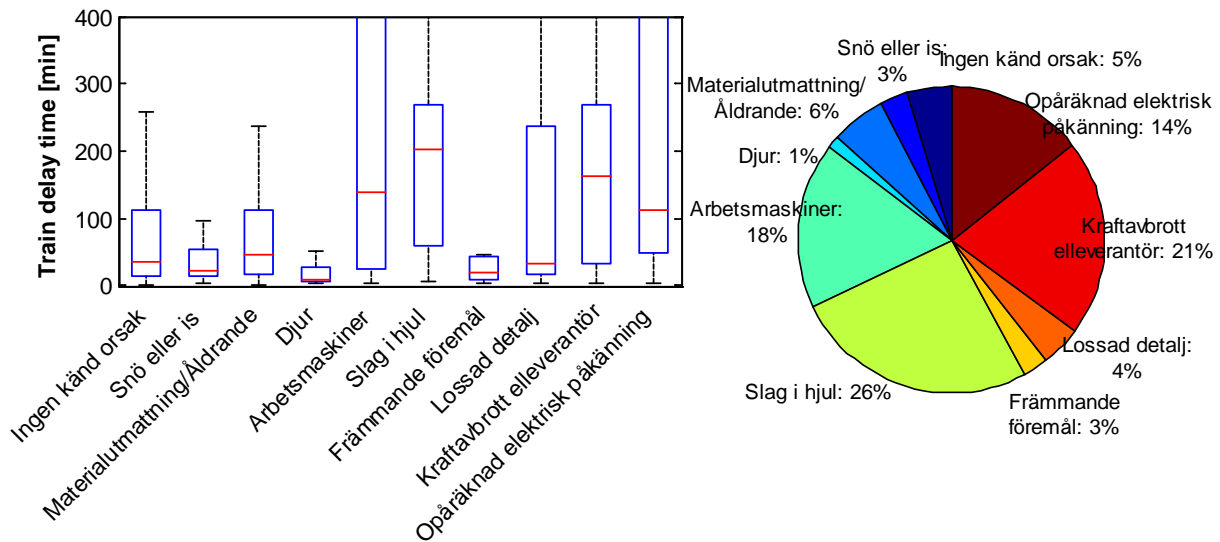
**Figur B.6:** Funktionsfel överst och motsvarande tågförsening nederst på systemnivå. Alla 686 arbetsordrar beaktas.



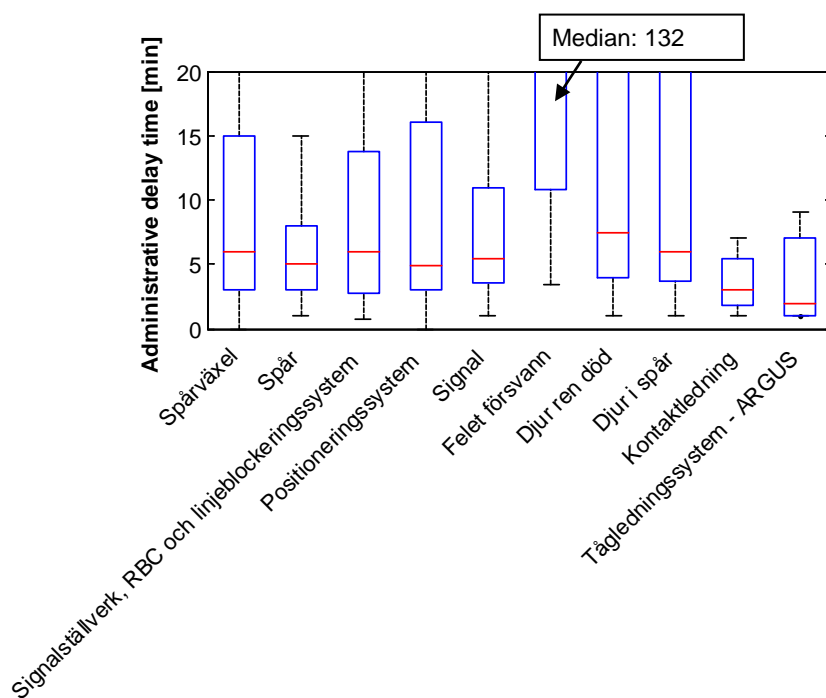
**Figur B.7:** Funktionsfel överst och motsvarande tågförsening nederst på systemnivå. De 2 % av arbetsordrarna med största tågförseningarna har uteslutits. Jämför med Figur B.6.



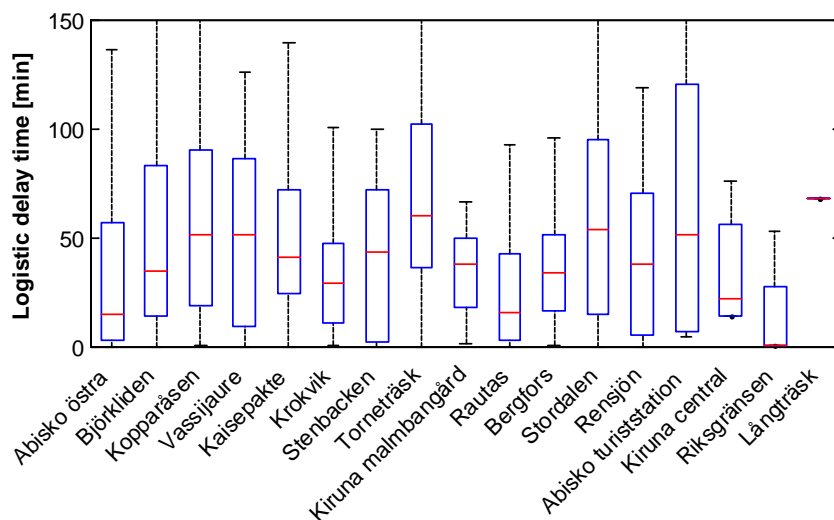
**Figur B.8:** Pareto- och cirkeldiagram för järnvägens trafikplatser, dvs. geografiskt läge.



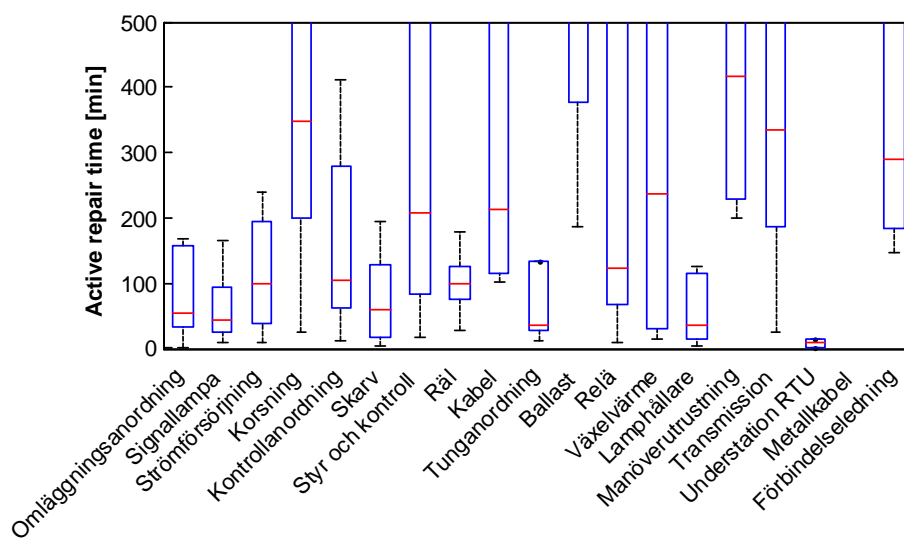
**Figur B.9:** Boxplot- och cirkeldiagram över orsaker till funktionsfel. Boxplot: mittenmärket är median, kanterna på boxen är den 25:e och 75:e percentilen, och whiskerna sträcker sig till 1,5 IQR (kvartilavstånd). Cirkeldiagrammet grundar sig på medianerna.



**Figur B.10:** Administrativa väntetider (underhållssäkerhet); tiden från att driftledningscentralen får meddelade om funktionsfel till dess att underhålls-entreprenören kontaktas.



**Figur B.11:** Transporttid per underavdelning (underhållssäkerhet); tid för underhållspersonalen att anlända från att meddelande mottagits från driftledningscentral.



**Figur B.12:** Aktiv reparationstid (underhållsmässighet) per anläggningsdel; tiden från aktiv reparation av enhet startar tills enheten är återställd.





## Referenser

- Adeney, W. (2003), "Metro Benchmarking - CoMET and Nova deliver tangible benefits", *Railway Gazette; Metro report*, Vol. 159 , pp. 15-18.
- Ahlmann, H. (2002), "From traditional practice to the new understanding: the significance of life cycle profit concept in the management of industrial enterprises" in *Proceedings of the International Foundation for Research in Maintenance, Maintenance Management & Modelling*, .
- Åhrén, T. and Parida, A. (2009a), "Maintenance performance indicators (MPI) for benchmarking the railway infrastructure - a case study", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 16 No. 2, pp. 247-258.
- Åhrén, T. and Parida, A. (2009b), "Overall railway infrastructure effectiveness (ORIE): A case study on the Swedish rail network", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 1, pp. 17-30.
- Åhrén, T. (2008), *Maintenance Performance Indicators (MPIs) for Railway Infrastructure: Identification and Analysis for Improvement*. Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, .
- Åhrén, T. and Kumar, U. (2004), "Use of Maintenance Performance Indicators: A Case Study at Banverket" in *Conference proceedings of the 5th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS2004)*, pp. 30.8.1-30.8.9.
- Alexandersson, G. and Hultén, S. (2008), "The Swedish Railway Deregulation Path", *Review of Network Economics*, Vol. 7 No. 1, pp. 18-36.
- Anderson, R., Hirsch, R., Trompet, M. and Adeney, W. (2003), "Developing benchmarking methodologies for railway infrastructure management companies" in *Proceedings of the European Transport Conference 2003*, Association for European Transport (AET), .
- Armstrong, J.S. (1982), "The value of formal planning for strategic decisions: Review of empirical research", *Strategic Management Journal*, Vol. 3 No. 3, pp. 197-211.
- Asmild, M., Holvad, T., Hougaard, J.L. and Kronborg, D. (2009), "Railway reforms: Do they influence operating efficiency?", *Transportation*, Vol. 36 No. 5, pp. 617-638.
- AUTOMAIN, 2010. *Augmented Usage of Track by Optimisation of Maintenance, Allocation and Inspection of railway Networks*. Seventh Framework Programme edn. www.automain.eu.
- Banverket (2010), *Annual Report 2009*, Banverket, Borlänge.
- Banverket, 2008. *Uppföljning av Banverkets drift- och underhållskontrakt - 20010101-20071231*. Borlänge: Banverket.
- Banverket, 2007. *BVH 800: Vägledning till Banverkets underhållsstrategi*. Borlänge: Banverket.
- Banverket, 2002. *Vinterutredningen åtgärdsprogram inom järnvägssektorn 2001/2002*. Borlänge: Banverket.

- Boston, J. and Pallot, J. (1997), "Linking strategy and performance: Developments in the New Zealand public sector", *Journal of Policy Analysis and Management*, Vol. 16 No. 3, pp. 382-404.
- Bourne, M., Neely, A., Mills, J. and Platts, K. (2003), "Implementing performance measurement systems: a literature review", *International Journal of Business Performance Management*, Vol. 5 No. 1, pp. 1-24.
- Bourne, M., Neely, A., Platts, K. and Mills, J. (2002), "The success and failure of performance measurement initiatives: Perceptions of participating managers", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22 No. 11, pp. 1288-1310.
- Bracciali, A. (2012), "Wayside Train Monitoring Systems: A State-of-the-Art and Running Safety Implications", *International Journal of Railway Technology*, Vol. 1 No. 1, pp. 231-247.
- Bruzelius, N., Jensen, A. and Sjöstedt, L. (1994), *Swedish Railway Policy – A critical study*, Transportation & Logistics, Chalmers University, Göteborg.
- BSL (2009), *Asset Management Club Project*, BSL Management Consultants, London.
- Bulcsu, S. (2011), "The process of liberalising the rail freight transport markets in the EU: The case of Hungary", *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 9 No. 1, pp. 89-107.
- Campbell, J.D. (1995a), "Outsourcing in maintenance management: A valid alternative to self-provision", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1 No. 3, pp. 18-24.
- Campbell, J.D. (1995b), *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Productivity Press, New York, NY.
- Cantos, P., Pastor, J.M. and Serrano, L. (2010), "Vertical and horizontal separation in the European railway sector and its effects on productivity", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 44 No. 2, pp. 139-160.
- CEN (2010), *EN 13306: Maintenance Terminology*, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007), *EN 15341: Maintenance - Maintenance Key Performance Indicators*, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN, 1999. *EN 50126: Railway Specifications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Couto, A. and Graham, D.J. (2009), "The determinants of efficiency and productivity in European railways", *Applied Economics*, Vol. 41 No. 22, pp. 2827-2851.
- Cross, M. (1988), "Raising the value of maintenance in the corporate environment", *Management Research News*, Vol. 11 No. 3, pp. 8-11.
- Danielson, B. (1987), *A Study of Maintenance Problems in Swedish Mines*, Idhammar Konsult AB (in Swedish), Sweden.

- 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*, Vol. 43 No. 2, pp. 117-138.
- Davis, C.E. and Davis, E.B. (2010), *Managerial Accounting*, John Wiley & Sons,.
- Dekker, R. (1996), "Applications of maintenance optimization models: a review and analysis", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 51 No. 3, pp. 229-240.
- Dhillon, B.S. (2002), *Engineering Maintenance: A Modern Approach*, CRC Press,.
- EC (2011), *White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System*, European Commission (EC), Brussels.
- EC, 2010. *White Paper: European Transport Policy for 2010: Time to Decide*. White Paper edn. Brussels: European Commission.
- EC (1996), "Council Directive 96/48/EC of 23 July 1996 on the interoperability of the trans-European high-speed rail system", *Official Journal of the European Communities*, No. L235, pp. 6-24.
- EC (1991), "Council Directive 91/440/EEC of 29 July 1991 on the development of the Community's railways", *Official Journal of the European Communities*, No. L237, pp. 25-28.
- EQUIP (2000), *Extending the Quality of Public Transport: Final Report*, TRKC (Transport Research Knowledge Centre), [www.transport-research.info](http://www.transport-research.info).
- Espling, U. and Kumar, U. (2008), "Benchmarking of the Maintenance Process at Banverket (The Swedish National Rail Administration)", in K.A.H. Kobbacy and D.N.P. Murthy (Eds.), *Complex System Maintenance Handbook*, Springer, London, pp. 559-583.
- Espling, U. (2007), *Maintenance Strategy for a Railway Infrastructure in a Regulated Environment*. Luleå University of Technology, .
- Espling, U. (2004), "Part II. Partnering in a railway infrastructure maintenance contract: a case study", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 10 No. 4, pp. 248-253.
- Espling, U. and Kumar, U. (2004), "Development of a Proactive Maintenance Strategy for Railway Infrastructure; A Case Study" in *Workshop Proceedings of the International Maintenance Congress Euromaintenance*, pp. 31-38.
- Esveld, C. (2001), *Modern Railway Track*, MRT-Productions, Netherlands.
- Famurewa, S.M., Asplund, M., Galar, D. and Kumar, U. (2013), "Implementation of performance based maintenance contracting in railway industries", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Vol. 4 No. 3, pp. 231-240.
- Famurewa, S.M., Juntti, U. and Kumar, U. (2011), "Performance Based Railway Infrastructure Maintenance: Towards Achieving Maintenance Objectives" in *1st International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM)*, Luleå University of Technology, pp. 233-240.
- Fitzgerald, L., Johnston, R., Brignall, S., Silvestro, R. and Voss, C. (1991), *Performance Measurement in the Service Business*, CIMA, London.

- Friebel, G., Ivaldi, M. and Vibes, C. (2010), "Railway (De)regulation: A European efficiency comparison", *Economica*, Vol. 77 No. 305, pp. 77-91.
- Galar, D., Peters, R., Berges, L., Stenström, C. and Kumar, U. (2012), "Composite indicators in asset management" *in null*, University of Sunderland, .
- Galar, D., Stenström, C., Parida, A., Kumar, R. and Berges, L. (2011), "Human Factor in Maintenance Performance Measurement" *in Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1569-1576.
- Gates, L.P. (2010), *Strategic Planning with Critical Success Factors and Future Scenarios: An Integrated Strategic Planning Framework*, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon.
- George, S.A. and Rangaraj, N. (2008), "A Performance Benchmarking Study of Indian Railway Zones", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 15 No. 5, pp. 599-617.
- Granström, R. (2008), "A system and stakeholder approach for the identification of condition information: a case study for the Swedish railway", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 222 No. 4, pp. 399-412.
- Granström, R. and Söderholm, P. (2005), "Punctuality measurements effect on the maintenance process: a study of train delay statistics for the Swedish railway" *in Proceedings of the 8th international conference and exhibition of Railway Engineering, London, UK*, .
- Holmgren, M. (2005), "Maintenance-related losses at the Swedish Rail ", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11 No. 1, pp. 5-18.
- Hudrlikova, L. and Fischer, J. (2011), "Composite indicators and weighting scheme: the case of Europe 2020 indicators", *Journal of Applied Mathematics (Aplimat)*, Vol. 4 No. 3, pp. 291-299.
- Hultén, S. (2000), "Opening Up the Pandora Box of Deregulation - The Deregulation Process of the Swedish Railway System" *in Proceedings of the 3rd Research Conference, Vinnova*, .
- IDeA (2006), *Review of Performance Improvement Models and Tools*, Local Government Improvement and Development (formerly the IDeA), London.
- IEA (2010), *World Energy Outlook 2010*, International Energy Agency (IEA), Paris.
- IEC (1990), *IEC 60050-191: International Electrotechnical Vocabulary: Chapter 191: Dependability and quality of service*, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva.
- Imai, M. (1986), *Kaizen: the key to Japan's competitive success*, McGraw-Hill, New York.
- IMPROVERAIL (2001), *Improved Tools for Railway Capacity and Access Management: D2 Benchmarking Methodologies and Harmonisation of Concepts in the Railway Sector*, Competitive and Sustainable Growth Programme, .
- INNOTRACK (2009), *D6.4.1 Key values for LCC and RAMS*, International Union of Railways (UIC), Paris.
- INNOTRACK (2008), *D4.4.1 – Rail Inspection Technologies*, International Union of Railways (UIC), Paris.

- ISO (1999), *Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 2: Determination of glass transition temperature*, International Organization for Standardisation (ISO), Geneva.
- ISO/IEC (2009), *ISO/IEC 31010: Risk Management – Risk Assessment Techniques*, International Organization for Standardisation (ISO), Geneva.
- Jensen, A. and Stelling, P. (2007), "Economic Impacts of Swedish Railway Deregulation: A Longitudinal Study", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 43 No. 5, pp. 516-534.
- Johnson, H.T. (1983), "The search for gain in markets and firms: A review of the historical emergence of management accounting systems", *Accounting, Organizations and Society*, Vol. 8 No. 2–3, pp. 139-146.
- Kahn, J., Svantesson, T., Olver, D. and Poling, A. (2011), *Global Maintenance and Reliability Indicators: Fitting the Pieces Together*, EFNMS (European Federation of National Maintenance Societies) and SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals), Brussels.
- Kaplan, R.S. and Norton, D.P. (2000), *The Strategy-Focused Organization: How Balanced Scorecard Companies Thrive in the New Business Environment*, Harvard Business Press Books, Boston.
- Kaplan, R.S. and Norton, D.P. (1996), *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action* Harvard Business Press, Boston.
- Kaplan, R.S. and Norton, D.P. (1993), "Putting the balanced scorecard to work", *Harvard Business Review*, Vol. Sep./Oct. , pp. 134-147.
- Kaplan, R.S. and Norton, D.P. (1992), "The Balanced Scorecard - Measures that Drive Performance", *Harvard Business Review*, Vol. 70 No. 1, pp. 71-79.
- Kaplan, R.S. (1984), "The Evolution of Management Accounting", *The Accounting Review*, Vol. 59 No. 3, pp. 390-418.
- Karim, R., Candell, O. and Söderholm, P. (2009a), "E-maintenance and information logistics: aspects of content format", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 3, pp. 308-324.
- Karim, R., Candell, O. and Söderholm, P. (2009b), "E-maintenance and information logistics: Aspects of content format", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 3, pp. 308-324.
- Kaydos, W. (1991), *Measuring, Managing and Maximizing Performance*, Productivity Press, Portland.
- Keegan, D.P., Eiler, R.G. and Jones, C.R. (1989), "Are your performance measures obsolete?", *Management Accounting*, Vol. 70 No. 12, pp. 45-55.
- Kumar, U., Galar, D., Parida, A., Stenström, C. and Berges, L. (2011), "Maintenance Performance Metrics: A State of the Art Review" in *1st International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM)*, Luleå University of Technology, pp. 3-34.
- Kumar, U. and Parida, A. (2008), "Maintenance Performance Measurement (MPM) System", in K.A.H. Kobbacy and D.N.P. Murthy (Eds.), *Complex System Maintenance Handbook*, Springer, London, pp. 459-478.

- Laisi, M. (2011), "Barriers to entry in railway freight market: Building knowledge through Swedish and Polish operators' experiences", *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 8 No. 3, pp. 350-362.
- Lardner, D. (1850), *Railway Economy*, Taylor, Walton and Mabe, London.
- Leidecker, J.K. and Bruno, A.V. (1984), "Identifying and using critical success factors", *Long range planning*, Vol. 17 No. 1, pp. 23-32.
- Leverly, M. (2002), "Making Maintenance Contracts Perform", *Engineering Management Journal*, Vol. 12 No. 2, pp. 76-82.
- Li, L.-. and Hu, J.-. (2011), "Efficiency and productivity of the Chinese railway system: Application of a multi-stage framework", *African Journal of Business Management*, Vol. 5 No. 22, pp. 8789-8803.
- Lim, S.H. and Knox lovell, C.A. (2009), "Profit and productivity of US class I railroads", *Managerial and Decision Economics*, Vol. 30 No. 7, pp. 423-442.
- Ling, D. (2005), *Railway renewal and maintenance cost estimating*. Doctoral thesis, Cranfield University, .
- Liyanage, J.P. and Kumar, U. (2003), "Towards a value-based view on operations and maintenance performance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 9 No. 4, pp. 333-350.
- Liyanage, J.P. and Selmer, C.V. (1999), *Establishment of an engineering methodology and a structure for a measurement system within the operation and maintenance process (Task 2&3), Project on the development and implementation of operation & maintenance (O&M) performance indicators, PI-TEC-T2&3/REV0*, Centre for Asset and Maintenance Management, Stavanger University College, Norway.
- Locke, E.A., Shaw, K.N., Saari, L.M. and Latham, G.P. (1981), "Goal setting and task performance: 1969-1980", *Psychological bulletin*, Vol. 90 No. 1, pp. 125-152.
- Mäkitalo, M. (2011), "Finland-Russia rail transport deregulation: Future scenarios of market development", *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, Vol. 3 No. 2, pp. 168-179.
- Malhotra, R., Malhotra, D.K. and Lermack, H. (2009), "Using Data Envelopment Analysis to Analyze the Performance of North American Class I Freight Railroads", in K.D. Lawrence and G. Kleinman (Eds.), *Financial Modeling Applications and Data Envelopment Applications (Applications of Management Science, Volume 13)*, Emerald Group Publishing Limited, pp. 113-131.
- McIvor, R. (2000), "A Practical framework for understanding the outsourcing process", *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 5 No. 1, pp. 22-36.
- Merkert, R., Smith, A.S.J. and Nash, C.A. (2010), "Benchmarking of train operating firms - A transaction cost efficiency analysis", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 33 No. 1, pp. 35-53.

- Murthy, D.N.P., Atrens, A. and Eccleston, J.A. (2002), "Strategic maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 8 No. 4, pp. 287-305.
- Näringsdepartementet, 2010. *SFS 2010:185: Förordning (2010:185) med instruktion för Trafikverket*. Constitution edn. Stockholm: Näringsdepartementet.
- Näringsdepartementet, 2009. *Overall Objective of the Swedish Transport Policy, N9012*. Policy edn. Stockholm: Regeringskansliet.
- Nash, C. (2008), "Passenger railway reform in the last 20 years - European experience reconsidered", *Research in Transportation Economics*, Vol. 22 No. 1, pp. 61-70.
- Neely, A., Mills, J., Platts, K., Richards, H., Gregory, M., Bourne, M. and Kennerley, M. (2000), "Performance measurement system design: developing and testing a process-based approach", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 No. 10, pp. 1119-1145.
- Neely, A. (1998), *Measuring Business Performance*, The Economist Books, London.
- Nilsson, J. (2003), *Restructuring Sweden's railways: The unintentional deregulation*, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, Sweden.
- Nissen, A. (2009a), "Classification and cost analysis of switches and crossings for the Swedish railway: a case study", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 2, pp. 202-220.
- Nissen, A. (2009b), "LCC for Switches and Crossings at the Swedish Railway - A Case Study", *International Journal of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADEM*, Vol. 12 No. 2, pp. 10-19.
- Nudurupati, S.S., Bititci, U.S., Kumar, V. and Chan, F.T.S. (2011), "State of the art literature review on performance measurement", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 60 No. 2, pp. 279-290.
- Nyström, B. (2009), "The Use of Availability Concepts in the Railway System", *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 5 No. 2, pp. 103-118.
- Nyström, B. and Kumar, U. (2003), "Analysis of Train Delay Information" in *Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR)*, pp. 253-261.
- OECD, EU and JRC - EC (2008), *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD),.
- Olsson, U. and Espling, U. (2004), "Part I. A Framework for Partnering for Infrastructure Maintenance", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 10 No. 4, pp. 234-247.
- Palo, M. and Schunnesson, H. (2012), "Condition monitoring of wheel wear on iron ore wagons", *International Journal of COMADEM*, Vol. 15 No. 2, pp. 26-33.
- Parida, A. and Chattopadhyay, G. (2007), "Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM)", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 3, pp. 241-258.
- Parida, A. and Kumar, U. (2006), "Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 No. 3, pp. 239-251.

- Pintelon, L. and Parodi-Herz, A. (2008), "Maintenance: An Evolutionary Perspective", in K.A.H. Kobbacy and D.N.P. Murthy (Eds.), *Complex System Maintenance Handbook*, Springer, London, pp. 21-48.
- REMAIN (1998), *Modular System for Reliability and Maintainability Management in European Rail Transport: Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems*, SINTEF Industrial Management, Norway.
- Roe, G.J. and Bramfitt, B.L. (1990), "Notch Toughness of Steels", in ASM International (Ed.), *ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM International, OH, USA, pp. 737-754.
- Rogers Commission (1986), *Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident, Chapter 4: The Cause of the Accident*, NASA, Washington, D.C.
- Saisana, M. and Tarantola, S. (2002), *State-of-the-art report on current methodologies and practices for composite indicator development*, European Commission-JRC, Italy.
- Samat, H.A., Kamaruddin, S. and Azid, I.A. (2011), "Maintenance performance measurement: A review", *Pertanika Journal of Science and Technology*, Vol. 19 No. 2, pp. 199-211.
- Santos-Reyes, J., Beard, A.N. and Smith, R.A. (2005), "A systemic analysis of railway accidents", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 219 No. 2, pp. 47-65.
- Schneiderman, A. (1999), "Why balanced scorecards fail", *Journal of strategic performance measurement*, Vol. Special edition, pp. 6-11.
- Siewert, T.A., Manahan, M.P., McCowan, C.N., Holt, J.M., Marsh, F.J. and Ruth, E.A., (2000), "The History and Importance of Impact Testing", in T.A. Siewert and M.P. Manahan (Eds.), *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, ASTM STP 1380*, ASTM International, PA, USA, pp. 3-17.
- 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*, Vol. 17 No. 2, pp. 116-137.
- Sinclair, D. and Zairi, M. (1995), "Effective process management through performance measurement: Part III-an integrated model of total quality-based performance measurement", *Business Process Re-engineering & Management Journal*, Vol. 1 No. 3, pp. 50-65.
- SIS (2000), *SS 441 0505: Tillforlitlighet - Ordlista*, Swedish Standards Institute (SIS), Stockholm.
- SJ (1966), *SJ:s vinterproblem 1965-1966 (Swedish State Railways winter problem 1965-1966)*, SJ (Swedish State Railways), Stockholm.
- Söderholm, P. and Norrbin, P. (2013), "Risk-based dependability approach to maintenance performance measurement", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 19 No. 3, pp. 316-329.
- Söderholm, P. and Norrbin, P. (2011), "A Risk-based Dependability Approach to Link Maintenance Performance Measurement and Management to Overall Objectives – A Case Study within the



- Swedish Railway" in *1st International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM)*, Luleå University of Technology, pp. 241-247.
- Spaven, D. (1993), "Rail Privatisation The Swedish Experiment", *Scottish Affairs*, Vol. 5 , pp. 87-95.
- Stenström, C., Parida, A. and Galar, D. (2013a), "Performance indicators of railway infrastructure", *International Journal of Railway Technology*, Vol. Accepted for publication .
- Stenström, C., Parida, A., Galar, D. and Kumar, U. (2013b), "Link and effect model for performance improvement of railway infrastructure", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 227 No. 4, pp. 392-402.
- Stenström, C. (2012a), *Maintenance performance measurement of railway infrastructure with focus on the Swedish network*, ISBN: 978 91 7439-460-3, Luleå University of Technology, Sweden.
- Stenström, C. (2012b), *Link and effect model for performance improvement of railway infrastructure*. Licentiate thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Stenström, C., Famurewa, S.M., Parida, A. and Galar, D. (2012a), "Impact of cold climate on failures in railway infrastructure" in *MPMM 2012: The 2nd International Congress on Maintenance Performance Measurement & Management Conference Proceedings*, University of Sunderland, .
- Stenström, C., Parida, A. and Galar, D. (2012b), "Maintenance Performance Indicators for Railway Infrastructure Management" in *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, .
- Stenström, C., Parida, A., Kumar, U. and Galar, D. (2011), "Maintenance Value Drivers, Killers and their Indicators" in *1st International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM)*, Luleå University of Technology, pp. 125-130.
- Swanson, L. (2001), "Linking maintenance strategies to performance", *International Journal of Production Economics*, Vol. 70 No. 3, pp. 237-244.
- Taticchi, P., Tonelli, F. and Cagnazzo, L. (2010), "Performance measurement and management: A literature review and a research agenda", *Measuring Business Excellence*, Vol. 14 No. 1, pp. 4-18.
- Trafikverket (2012a), *Järnvägsutredning 150: Kap. 12 - Robusthet och säkerhet*, Trafikverket, Borlänge, Sweden.
- Trafikverket, 2012b. *BVS 811: Anläggningsstruktur järnväg inom Trafikverket*. Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket (2011), *Annual Report 2010*, Trafikverket, Borlänge.
- Trafikverket, 2010a. *Fastställelse av Tågplan 2011*. Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket, 2010b. *Drift- och underhållskontrakt Järnväg - Power point presentation av Pär Kvick*. Borlänge: Trafikverket.
- Tsang, A.H.C. (2002), "Strategic dimensions of maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 8 No. 1, pp. 7-39.

- U.S. Dept of Energy (1993), *Total Quality Management Implementation Guidelines*, United States Department of Energy, Washington, DC,.
- UIC, 2011-05-09, 2011a-last update, Workshop: Winter and railways project [Homepage of International Union of Railways (UIC)], [Online]. Available: <http://www.uic.org/spip.php?article2740> [7/2, 2012].
- UIC (2011b), *Winter and railways: Study*, International Union of Railways (UIC), .
- UIC (2004), *Leaflet 406: Capacity*, UIC International Union of Railways, Paris.
- UIC - LICB (2008), *Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB) - Summary Report*, UIC International Union of Railways, Paris.
- Unckel, P. (2010), *Förbättrad vinterberedskap inom järnvägen*, Elanders Sverige AB, Stockholm.
- UTBI (2004), *The Urban Transport Benchmarking Initiative: Year One Final Report*, Transport Research Knowledge Centre (TRKC), [www.transport-research.info](http://www.transport-research.info).
- VTI (2011), *A strategy for developing a framework for economic analysis of operation, maintenance and renewal of road and rail infrastructures*, VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut, Linköping.
- VTI (2007), *Winter climate model for the rail sector: A preliminary study*, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, Sweden.
- Wireman, T. (2003), *Benchmarking Best Practices in Maintenance Management*, Industrial Press Inc., New York.
- Zarzycki, J. (1991), *Glasses and the vitreous state*, Cambridge University Press, New York, NY.