

CHALMERS



Beslutsstöd för underhåll av järnvägsfordon

En studie om utökat användande av hjulskadedetektorer i det proaktiva underhållsarbetet

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

KARL BÄCKSTEDT
ERIK KARLSSON
PHILIP MOLANDER
MIKAEL PERSSON

Institutionen för Tillämpad mekanik

Avdelningarna för Material och beräkningsmekanik, Dynamik och CHARMEC

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige, 2013

Kandidatarbete 2013:04

Beslutsstöd för underhåll av järnvägsfordon

En studie om utökat användande av hjulskadedetektorer i det proaktiva underhållsarbetet

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

KARL BÄCKSTEDT
ERIK KARLSSON
PHILIP MOLANDER
MIKAEL PERSSON

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningarna för Material och beräkningsmekanik, Dynamik och CHARMEC
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013

Beslutsstöd för underhåll av järnvägsfordon

Ett utökat användande av hjulskadedetektorer i det proaktiva underhållsarbetet

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

KARL BÄCKSTEDT

ERIK KARLSSON

PHILIP MOLANDER

MIKAEL PERSSON

© KARL BÄCKSTEDT, ERIK KARLSSON, PHILIP MOLANDER, MIKAEL
PERSSON, 2013

Kandidatarbete 2013:04

ISSN 1654-4676

Institutionen för Tillämpad mekanik

Avdelningarna för Material och beräkningsmekanik, Dynamik och CHARMEC

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Tryckeri/Institutionen för Tillämpad mekanik

Göteborg, Sverige 2013

Förord

Detta kandidatarbete är skrivet av fyra teknologer som alla studerar tredje året på Maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola, i samarbete med SJ och Trafikverket. Det har varit inspirerande att få arbeta mot industrin med ett verkligt problem inom teknikområden som tidigare var, för oss, helt okända.

Vi vill framförallt tacka Elena Kabo och Anders Ekberg för deras expertis och stora engagemang i vår rapport och ett stort tack till vår externa handledare Pär Söderström för hans tid, goda insikter och feedback. Vi vill även tacka Kalle Karttunen (Chalmers tekniska högskola), Hans Loskog (Trafikverket), Roger Byström (Trafikverket) och Lars Fehrlund (Green Cargo) för att vi har fått ta upp er tid och ert underlättande av vårt arbete. Ett extra tack till Jan Långström för bilderna på skadade tåghjul.

Vi hoppas att vårt arbete kan komma till nytta i vidare utveckling av det proaktiva underhållsarbetet inom tågbranschen.

*Karl Bäckstedt
Erik Karlsson
Philip Molander
Mikael Persson*

2013-05-22
Göteborg

Sammanfattning

Akuta tågstopp, orsakade av (verkliga eller förmodade) hjulskador, ger stora konsekvenser för tågtrafiken i Sverige. Tågstopp medför inte bara konsekvenser för den verkande operatören utan ger även höga förseningskostnader för andra operatörer. Det är viktigt att tidigt upptäcka eventuella hjulskador för att undvika att dessa skadar löpverk, räl eller till och med orsakar urspårning. För att upptäcka och förhindra hjulskador i ett tidigt skede analyseras vertikalkrafter som uppmätts med hjälp av hjulskadedetektorer vilka finns monterade på järnvägen runt om i landet.

Syftet med projektet är att finna en modell för att underlätta och utöka användandet av den data som ges av hjulskadedetektorerna i beslutsprocessen för underhållsplanering. Resultatet uppnåddes genom att analysera mätdata från hjulskadedetektorerna, hämtat från Trafikverkets databas DPC-III. Såväl enskilda tågs passager som stora populationer av passager vid de olika hjulskadedetektorerna studerades.

Resultatet visar på att det finns stor potential i användandet av detektorerna, men att insatser krävs för att validera mätdata. Ett flertal av detektorerna ger stora mätskillnader, upp till 20 %, mellan höger- och vänsterhjul. Resultaten från hjulskadedetektorerna visar däremot att de, i de flesta fall, konsekvent ger likartade mätvärdren för samma tåg, sett över tid. Från resultatet ses också att ett flertal av detektorerna är placerade i, eller i närheten av, kurvor, vilket kan vara en av anledningarna till variationen i mätdata mellan hjul på samma axel.

Som ett resultat presenteras också ett utkast till en utökad beslutsmodell där *underhållslarm* införs för samtliga järnvägar i Sverige. Underhållslarm ska indikera på en initierad hjulskada och belysa behovet av underhåll. Införandet av underhållslarm sker jämte en ny typ av larm, *analyslarm*. Då analyslarmgränsen överskrids analyseras krafthistorik för att avgöra om hjulet uppvisar en skadetrend, för att då avgöra hur brådskande hjulunderhållet är. Dessa larm medför att underhållet kan planeras på längre sikt.

För att underlätta bearbetning och ytterligare öka integrering av data från DPC-III i beslutsunderlaget för underhåll rekommenderas också en utveckling av programvaran och förbättring av sökverktyget.

Abstract

Background

The Swedish railway system is a cornerstone in the Swedish infrastructure, for citizens as well as for corporate interests. In the year of 2010 a total 11 % of transported goods were transported by rail (Trafikanalys 2012). Compared to other means of transportation, rail traffic has several advantages, e.g. high safety and being environmentally sound. Further, the Swedish base industry is heavily relying on efficient rail transports. It is therefore necessary that Sweden, in order to stand well equipped for the future, has a well-functioning and reliable railway system. The reason for delays and disruptions in railway traffic are several. This report strives to investigate problems solely relating to wheels and running gear.

Purpose

The purpose of this project is to investigate, process and analyze SJ's wheel set population, by data derived from the Swedish Transport Administration's (Trafikverket's) stationary wheel impact load detectors. From this investigation suggestions, on how to improve threshold values and implement maintenance models to improve customer values and mitigate costs, are presented.

Method

The approach to achieve this purpose set out from an analysis of the validity and precision of the data, generated from the wheel impact load detectors that the Swedish Transport Administration has had installed. It continued with an analysis of suitable models of implementation in order for these data to be of value for Swedish railway industry and its utilizing organizations, such as SJ and the Swedish Transport Administration.

The wheel impact load detector MULTIRAIL Wheelscan, developed by Schenck, measures vertical loads exerted on the rail by the wheels of the trains, and then converts and condenses this information into two values: *mean load* and *peak load*. Further analysis of these two values results in a *dynamic load* and a *ratio* magnitude. The *peak load*, the *dynamic load* and the *ratio* are then compared to threshold values in order to ensure that limit magnitudes are not exceeded. As of today there are no other indications than a critical level threshold, which requires the train to proceed with reduced speed and stop as soon as possible, resulting in delays and high costs. A better solution would be to introduce maintenance threshold values that may be easily implemented by the Swedish Transport Administration and maintenance and planning departments of Swedish railway operators, such as SJ and Green Cargo.

Research questions

- Can the use of wheel damage detectors be extended to create a more proactive maintenance model?
- Which flaws regarding the function of the wheel damage detectors exists today?
- Can the flow of information, from threshold value exceedence to maintenance, be improved?

Results

The thesis presents a number of different results regarding various aspects of the given dataset and its use in SJ and other organizations.

In order to validate the precision of the wheel impact load detectors, measurements related to a single train were analyzed over time and the repetitiveness was evaluated. The results showed high precision within a single detector, but significant variation between different detectors. Displaying the entire population in a histogram implies a significant skew when comparing wheel loads (both *mean load* and *peak load*) between left and right wheels. The positions of the detectors were analyzed and it was found that some of them were placed in curves.

In order to compensate the skew, various methods of compensation were employed. Known values, such as the specified weight of a known type of train, were compared to measured values of said train, resulting in a skew ratio. The entire population was then compensated by the derived skew ratio. Another method of compensation was the use of a quasistatic mechanical model.

To analyze the dataset, threshold values currently under evaluation by Green Cargo which implied both urgent wheel damage and incipient wheel damage. From the given dataset a total of 352 values were found to exceed the threshold of incipient wheel damage and 20 of these exceeded the threshold of urgent wheel damage. Further analysis indicated that some of the exceeding values had their origin from the same vehicle, which reduced the actual number of trains exceeding the threshold values of incipient wheel damage to about half as many.

The Swedish Transport Administration's database, called DPC-III, was used to analyze specific trains and detectors. While using DPC-III, observations were made that information was incorrect, as the *mean load* exceeded the *peak load*. The dataset was analyzed in this regard and 0.2 % of the values were found incorrect according to this criterion.

Seasonal variations in the dataset were analyzed, and in the year of 2012 January, February, May and June showed significantly more values exceeding threshold of incipient wheel damage. Almost all of the exceeding values in May and June were related to one single train.

Discussion

This section discusses possible reasons for, and sources of, error related to the results of the study.

The variation between the detectors was greater than expected. This was deduced from measurements derived from a single passenger train. For this train the only parameters that could vary were the number of passengers and velocity. An estimation of the effects of these factors implied that at least one of the detectors was inaccurate.

The skew of the entire population regarding *mean values* of right and left wheels, could be explained by detectors placed in bends, oblique loads, varying velocities or inconsistent detector measurements. Some significant assumptions were made to compensate the skew of the population particularly regarding the influence of line curvature. However such compensation will be inefficient if the detectors are inaccurate.

Due to the unknown origin of incorrect values the reliability of DPC-III may be questioned. The user possibilities of DPC-III are at the moment very limited. Further development of the software would be useful to facilitate more refined analyses and the evaluation of appropriate threshold values.

The train which exceeded the threshold of incipient wheel damage in May and June is an example of a train which probably would have been maintained earlier if a threshold of incipient wheel damage had been used. Colder temperatures (e.g. leading to frozen brakes and lessened railway moisture lubrication) may explain why more trains exceeded the threshold in January and February. From the perspective of SJ, who only conducts passenger services, lower threshold values may be relevant since the load of passenger trains are lower and have less scatter than freight trains.

Conclusion

An introduction of a threshold of incipient wheel damage is recommended to subsidize maintenance planning. Further investigation regarding the reliability and calibration of the detectors is needed, and if detectors are placed in curves, ensure appropriate measurements of compensation are taken. Improve DPC-III; ensure the validity of stored data. An improvement of the search function would be helpful for further analysis. DPC-III has great potential as a tool for further analyses, and follow-up after maintenance.

Terminologi

DPC-III – databssystem som används av Trafikverket för att behandla detektordata och larm

Tidsserie – Obearbetad mätdata

Peaklast = $\max F(n)$ – Högsta belastningen av ett tåg hjul

Meanlast = $\sum_n^N \frac{F(n)}{N}$ – Medellasten av ett tåg hjul

Ratio = $\frac{Peaklast}{Meanlast}$ – Kvoten mellan *peak*- och *meanlast*

Dynamic = *Peaklast* – *Meanlast* – Differensen mellan *peak*- och *meanlast*

Stopplarm – Stopplarm utfärdas vid befarad allvarlig hjulskada

Underhållslarm – Underhållslarm utfärdas vid misstänkt hjulskada

Analyslarm – Analyslarm utfärdas vid eventuell tillväxt av hjulskada

Huvuddata – Mätdata från DPC-III innehållandes ca 1,6 miljoner axelpassager under tiden 2012-01-10-2012-10-26. Innehåller främst SJ-tåg

RFID – *Radio Frequency Identification*, en trådlös identifieringsteknik

USP – Det vänstra spåret i den riktning på linjen i vilken tåg med jämna nummer går vid dubbelspår

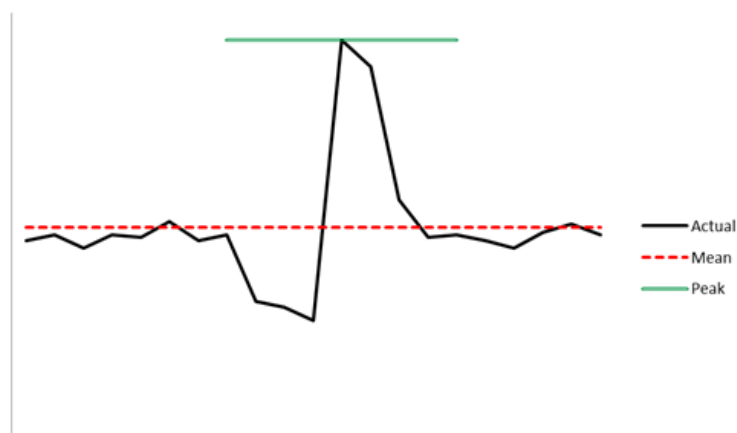
NSP – Det vänstra spåret i den riktning på linjen i vilken tåg med udda nummer går vid dubbelspår

ESP – Sträcka med endast ett huvudspår på linjen mellan två angränsande driftplatser

Högerhjul – definieras i enlighet med data från DPC-III

Vänsterhjul – definieras i enlighet med data från DPC-III

HJ – Trafikverkets förkortning för hjulskadedetektor



Exempel – Framtagning av mean- och peaklast från tidsserie

Innehållsförteckning

Förord	i
Sammanfattning	ii
Abstract.....	iii
Terminologi	v
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställningar.....	2
1.4 Avgränsningar.....	2
1.5 Rapportens disposition	2
1.6 Förstudie	3
1.6.1 Hjulskadedetektorer	3
1.6.2 Informationsflöde idag	3
1.6.2.1 Trafikverkets databaser	3
1.6.2.2 Nuvarande åtgärdskedja vid befarad hjulskada.....	4
2 Metod	7
2.1 Förstudie	7
2.2 Statistisk analys av hjulkraftsdata	7
3 Teoretisk bakgrund	9
3.1 Kvasistatistisk analys av hjulkrafter	9
3.2 Hjulskador.....	9
3.2.1 Hjulplattor	10
3.2.2 Rullkontaktutmattning.....	11
4 Resultat och analys	13
4.1 Precision i hjulkraftsmätningar	13
4.2 Snedfördelning av laster över hela populationen	14
4.3 Kalibrering av hjulskadedetektorer	16
4.3.1 Nuvarande procedur för kalibrering av hjulskadedetektorer	16
4.3.2 Rekalibrering av hjulskadedetektorer utifrån referensvärden.....	17
4.3.3 Hjulskadedetektorernas placering	18
4.3.4 Rekalibrering av hjulskadedetektorer med hjälp av kvasistatistisk analys.....	19
4.4 Repetitiva gränsvärdeslarm	20
4.5 Identifierad bug i DPC-III.....	22
4.6 Säsongsvariationer	23
4.7 Ekonomisk analys	24
4.8 Beslutsmodell.....	24
5 Diskussion	27
5.1 Precision i hjulkraftsmätningar	27
5.2 Snedfördelning av laster över hela populationen	27
5.3 Kalibrering av hjulskadedetektorer	27
5.4 Repetitiva gränsvärdeslarm.....	28
5.5 Identifierad bug i DPC-III.....	28
5.6 Säsongsvariationer	28
5.7 Ekonomisk analys	29

5.8	Beslutsmodell.....	29
6	Rekommendationer.....	31
6.1	Vidare studie	31
	Referenser	33
	Bilaga A – Detektorkarta (Trafikverket 2013d)	1
	Bilaga B- Snedfördelning av uppmätta krafter.....	3
	Bilaga C – Kvasistatiska beräkningar.....	7
	Bilaga D – Mätvärden för en X2-drivenhet.....	9
	Bilaga E - Gränsvärden	11
	Bilaga F – Antal mätningar.....	13

Figurer

Figur 1-1	– Exempel på tidsserieanalys av hjulkraft	3
Figur 1-2	– Befintlig beslutsprocess	4
Figur 3-1	– Hjulplatta (Foto: Jan Långström).....	10
Figur 3-2	– Krossår (Foto: Jan Långström)	11
Figur 4-1	– Mätprecision för detektorn vid Anneberg NSP	13
Figur 4-2	– Mätprecision för detektorn vid Hunstugan USP	14
Figur 4-3	– Meanlast över huvuddata	14
Figur 4-4	– Peaklast över huvuddata	15
Figur 4-5	– Meanlast från detektorn vid Björnkulla USP	15
Figur 4-6	– Meanlast från detektorn vid Sunderbyns Sjukhus.....	16
Figur 4-7	– Meanlast för huvuddata före sommaren	16
Figur 4-8	– Meanlast för huvuddata efter sommaren.....	17
Figur 4-9	– Kompenserade mätvärden från detektorn vid Björnkulla USP	18
Figur 4-10	– Förhållandet mellan teoretiska och uppmätta värden från Björnkulla USP.....	19
Figur 4-11	– Peakvärden och axellast för vänsterhjul från huvuddata.....	21
Figur 4-12	– Peakvärden och axellast för högerhjul från huvuddata.....	21
Figur 4-13	– Peakvärden från huvuddata som överstiger gränsvärden i tabell 4-5.....	22
Figur 4-14	– Säsongsvariation larm.....	23
Figur 4-15	– Säsongsvariationer av larm justerade efter återkommande tåg.....	23
Figur 4-16	– Skadetillväxt för fordonsindivid X40-33329	24
Figur 4-17	– Skadetillväxt för fordonsindivid RC6N1383	25
Figur 4-18	– Skadetillväxt för fordonsindivid RC6B1409	25
Figur 4-19	– Föreslagen beslutsprocess.....	26

Tabeller

Tabell 4-1 – Bangeometri vid hjulskadedetektorer.....	18
Tabell 4-2 – Mått på spårfel vid detektorn Anneberg.....	19
Tabell 4-3 – Känslighetsanalys för tyngdpunkt.....	20
Tabell 4-4 – Nuvarande larmgränser	20
Tabell 4-5 – Larmgränsvärden under utvärdering	20
Tabell 4-6 – Felnoteringar i DPC-III	22

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Järnvägen är en viktig del av den svenska infrastrukturen, både för privatpersoner och för företag. Samhällsekonomiskt är järnvägen viktig för tung industri. År 2010 utgjordes 11 % av inrikes godstransporter av järnvägsburen trafik (Trafikanalys 2012). Jämfört med andra vanliga trafikslag finns det också flera viktiga fördelar som utmärker den järnvägsburna trafiken, såsom vida överlägsna säkerhets- och miljömässiga faktorer (SJ).

Sedan Statens Järnvägars monopol avskaffades har ansvaret för de svenska järnvägarna delats upp mellan olika organisationer. I dagsläget har Trafikverket ansvar för genomförandet av politiska beslut gällande uppförande av nya järnvägsspår, samt underhåll och drift av befintliga spår. Gällande drift av tåg sker detta numera av licensierande företag, där SJ och Green Cargo utgör stora aktörer. Att tågtrafiken numera innefattar fler företag har medfört större krav på koordinering gällande drift, driftsstopp och underhåll.

I dagsläget har störningar i tågtrafiken en mängd olika orsaker. Denna rapport avser att analysera problem relaterade till hjulskador. Dessa skador uppstår, i huvudsak, på grund av olika former av slitage och utmattning. Allvarligare fall av hjulskador kan ge väldigt stora konsekvenser i form av långa förseningar på järnvägen, vilket drabbar dels den verkande operatören men även övriga operatörer som trafikerar sträckan¹.

Idag används hjulskadedetektorer, utplacerade av Trafikverket, för att upptäcka hjulskador och ge larm innan det sker ett haveri, till exempel hjul- eller rälbrott. Detektorerna larmar idag endast för så kallade högnivåalarm. Dessa larm ses som ett tecken på att en större hjulskada har uppkommit. Att endast högnivåalarm registreras medför problem med underhållsplaneringen. De praktiska konsekvenserna då högnivåalarm uppkommer blir för SJ ökade stopp och försämrat kundvärde, vilket i slutändan resulterar i minskade intäkter och ökade kostnader. SJ rapporterade om totalt 19 stopp på grund av hjulskador under perioden 2011-12 till 2012-03. Tre av dessa stopp uppstod på grund av hjulskador på egna vagnar, medan resterande 16 stopp orsakades av följd-förseningar på grund av andra tågbolag. Den genomsnittliga förseningstiden uppgick till 110 minuter och den totala kostnaden var 2 315 000 SEK för ovanstående period.²

Under en tid fanns även så kallade varningslarm implementerade, men dessa uppfattades av flera aktörer ge ohanterliga datamängder utan relevans. De satta larmnivåerna resulterade i ett stort antal felaktiga larm, med driftstopp och ökade kostnader som följd. På grund av detta avaktiverades varningslarmen från detektorerna.³ Erfarenheten av detta är att larmnivåer samt relaterade åtgärder måste vara väl avvägda.

Ur vetenskaplig synvinkel är problematiken intressant då den tydligt kan relateras till hållfasthetslära och dess tillämpningar, men även till material- och tillverkningsteknik och produktionsplanering. En annan väsentlig aspekt är det faktum att hjulen, även under vanliga förhållanden, utsätts för stora laster, höga tryck och många lastcykler vilket medför utmattningsrisker och förslitningsskador. Detta ställer stora krav på material, tillverkning och kontroll av hjul. Ytterligare en intressant aspekt i projektet är att hantera mycket stora mängder data och genom analys och tolkning av dessa erhålla vederhäftiga resultat och slutsatser.

¹ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

² Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

³ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka och bearbeta data, härrörande från ett antal av Trafikverkets mätstationer, samt relatera dessa till skadefenomen på järnvägsfordons hjul. Utifrån de analyser som genomförs presenteras sedan förslag på hur information bör framföras på ett lätthanterligt och tillförlitligt sätt. Slutligen ges förbättringsförslag gällande mätningar, larmgränser och implementering.

1.3 Frågeställningar

Projektet avser att i möjligaste mån undersöka, bekräfta eller besvara följande punkter:

- Hur kan utnyttjandet av hjulskadedetektorer utökas för att skapa ett mer proaktivt underhållsarbete?
- Vilka brister gällande hjulskadedetektorernas funktion finns?

1.4 Avgränsningar

Syftet med projektet, som avser att förbättra underhåll av järnvägsfordon, är väldigt omfattande, med en rad olika möjliga metoder och tillvägagångssätt. Eftersom projektet enbart sträcker sig över en begränsad tid, 20 veckor, fram till sommaren 2013, innebär det att en rimlig avgränsning gällande projektets omfattning måste göras. Projektet avser att endast undersöka möjligheterna till förbättrat underhåll och underhållsplanering av järnvägsfordon med avseende på hjul och hjulskadefenomen. Detta innebär att varken räl, bärande strukturer i tågagnar, chassi etc. kommer att studeras. Underhåll av andra komponenter i tåget kommer ej heller tas hänsyn till.

Den tilltänkta förbättringsfaktorn rör bearbetning och tolkning av mätdata från Trafikverkets hjulskadedetektorer. Utifrån dessa tolkningar ämnas slutsatser dras. Analysen innefattar undersökandet av laster från lok, motorvagnar och tågagnar. Projektet avser endast ta uppmätta belastningsfall i beaktning, utan att noggrannare specificera vilken typ av hjulskada belastningen kan tänkas härröras från. Vidare noteras svårigheter med att verifiera och följa upp erhållna resultat. Detta då projektet används som underlag för underhåll kan uppföljning först ske när underlaget implementerats. Utförligare lösningar gällande delgivning av information inom tågbranschen, exempelvis med hjälp av RFID-taggar eller gemensamma databaser läggs också utanför projektets avgränsningar då de involverar en mängd aktörer och även kräver reviderade föreskrifter och lagar. Av samma anledning läggs även arbetet om hur Trafikverket hanterar informationsflödet till verkande aktörer gällande underhåll utanför projektet.

1.5 Rapportens disposition

Rapporten inleds med en förstudie där det iakttagna problemet introduceras med en kortare bakgrund. Förstudien beskriver även de viktigaste komponenterna för projektet och vilka faktorer som orsakar de problem som finns idag. Den efterföljande metoddelen beskriver tillvägagångssättet som används för att uppnå önskade resultat. Vidare presenteras relevant teori för att motivera, underbygga och belysa val av metod. Analys gjord utifrån angiven metod och teori presenteras därefter med resultat och analys samt en efterföljande diskussion. Rubriksättningen i resultat och analys korresponderar med rubriksättningen i diskussion, vilket exempelvis gör att avsnitt 5.1 behandlar resultatet i avsnitt 4.1. Slutligen ges rekommendationer till berörda parter och idéer på vidare studier. Gruppen har valt att disponera rapporten med utökade kapitel som beskriver nuläget och bakgrundsfaktorer för att tidigt underbygga läsarens kunskap inom relevanta områden.

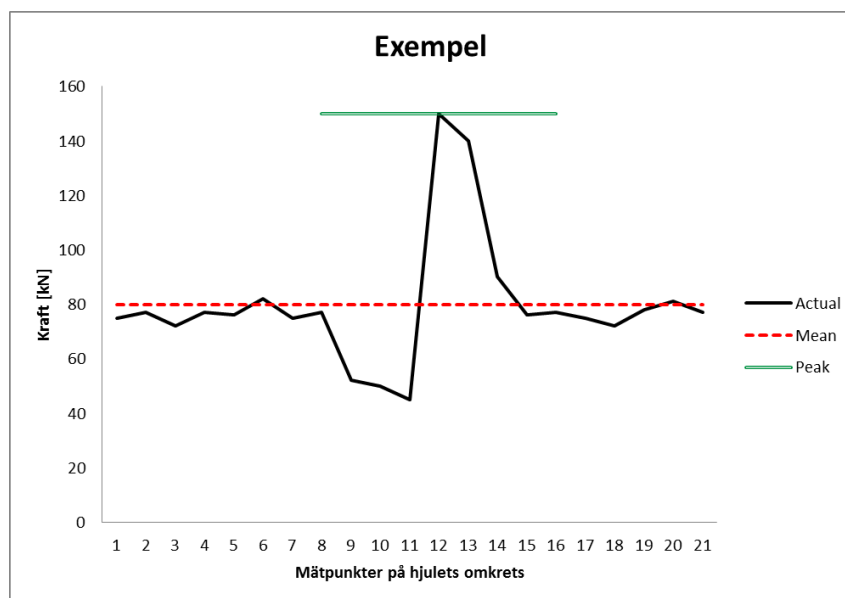
1.6 Förstudie

En förstudie gjordes för att ge förståelse för hur användandet av hjulskadedetektorer ser ut idag.

1.6.1 Hjulskadedetektorer

För att upptäcka hjulskador samlas data in från Trafikverkets mätstationer, så kallade hjulskadedetektorer. Dessa registrerar de krafter som tågets hjul anlägger på rälen. Dessa hjulkrafter mäts upp i en tidsserieanalys och summeras därefter ihop till några enskilda mätvärden, vilka visas i *figur 1-1*. Dessa data används idag till att utvärdera huruvida tåget anses ha defekta hjul, genom att mätvärdena jämförs med etablerade gränsvärden. Totalt finns det 25 stycken hjulskadedetektorer, längs med järnvägen i Sverige (Trafikverket 2013d). Detektorernas huvudsakliga syfte är att förhindra att hjulskador ska ge upphov till rälskador. Rälskador ger i sin tur en förhöjd olycks- och urspårningsrisk, och följskador på efterkommande hjul (Banverket 2009).

De mätvärden som uppmätts av hjulskadedetektorerna är *meanlast* och *peaklast*. *Meanlast* är medelvärdet av lastens tidsserie och *peaklast* är det högsta värdet för en hjulpassage, se *figur 1-1*. Utifrån dessa beräknas ytterligare två värden: *ratio* och *dynamic*, vilka är kvoten respektive skillnaden mellan *peak-* och *meanlast*.



Figur 1-1 – Exempel på tidsserieanalys av hjulkraft

Idag finns det ett flertal leverantörer av hjulskadedetektorer. Trafikverket har valt att implementera en lösning av Schenck Process runt om i Sverige. De givare som installeras och används av Trafikverket idag heter Schenck MULTIRAIL WheelScan. Utöver hjulskadedetektorerna från Schenck utreds också två andra typer av hjulskadedetektorer. I Sävast, på Malmbanan, implementeras en lösning utarbetad av ingenjör- och konsultfirman Damill AB. Denna mätstation har möjlighet att mäta såväl vertikala som laterala krafter. I Sunderbyn finns en hjulprofilmätare, tillverkad av BeenaVision, som tillkom genom ett samarbete mellan Trafikverket och LKAB⁴.

1.6.2 Informationsflöde idag

1.6.2.1 Trafikverkets databaser

Inom Trafikverket används idag flera olika databaser. För rapportens analyser har främst två av dessa använts, DPC-III och Optram. DPC-III samlar alla mätvärden från Trafikverkets olika typer av

⁴ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-05-27

detektorer och redovisar för de larm som detekteras. Mätvärden lagras i två år efter passagera (Trafikverket 2013c). I DPC-III samlas information om varje fordonsindivid genom ett så kallat Opera-fordonsnummer, fordons-ID. Optram är en databas som samlar information om räls och spår. Mätvagnar körs med lämpligt tidsintervall på all järnväg i Sverige och utför mätningar för bland annat kurvatur och rälsförhöjning. Optram innehåller också information om position för spårrelaterade funktioner såsom växlar och detektorer.

1.6.2.2 Nuvarande åtgärdskedja vid befarad hjulskada

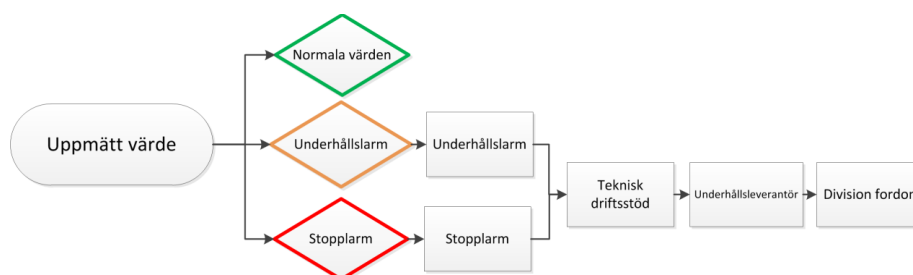
Den bearbetande data som härleds från hjulskadedetektorerna runt om i Sverige sparas i Trafikverkets DPC-system. Detta gör det möjligt att i realtid och i efterhand kontrollera och undersöka uppmätta krafter. Utöver detta ska dessutom samtliga angivna larm kompletteras med manuell information för att kunna utredas senare (Banverket 2009).

Resultatet av kraftmätningarna i hjulskadedetektorerna jämförs med gränsvärden gällande akuta stopp, *stopplarm*, och förebyggande larm, *underhållslarm*. I dagsläget tillämpas endast en larmnivå, stopplarm, på Sveriges järnvägar. Malmbanan är ett undantag där, även underhållslarm tillämpas på grund av stora hjullaster och hårt klimat i kombination med stora krav på leveransprecision. Anledningen att de inte tillämpas i resterande Sverige idag är att de tidigare implementerade larmgränserna gällande underhållslarm genererade onödigt många larm, till den grad att de var tvungna att avaktiveras⁵.

Vid befarad eller konstaterad hjulskada avges larm från hjulskadedetektorn, via DPC-III, till tågklararen, vars uppgift är att kontakta tågföraren för vidare utredning. Det åligger tågklararen att meddela tågföraren vilken typ av larm som har utfärdats samt erforderlig åtgärd. Vid stopplarm begränsas hastigheten för tåget som körs till närmaste driftstation. Vid larm från hjulskadedetektor sänks tågets största tillåtna hastighet vanligtvis till 10 km/h, vilket i praktiken innebär kraftiga förseningar i de flesta fall. Vid allvarigare fall av hjulplattor eller vid låg temperatur måste även en undersökning av rälen genomföras. Sträckan som ska avsynas bestäms av infrastrukturförvaltaren tillsammans med tågklararen och berörd tågoperatör. (Banverket 2009)

När ett tåg har transporterats till en bevakad driftstation undersöks det och beslut om relevanta underhållsåtgärder fattas. Ett vanligt problem gällande SJ:s underhåll är att underhållsåtgärder ofta sker utan dokumentation om vilken typ av skada som uppstått. Då svarvning tar bort sprickbildning och hjulplattor försvårar denna dokumentation, uppföljning och möjlighet till ytterligare datainsamling.⁶

Från och med 2013-06-01 implementeras en uppdaterad beslutsmodell enligt *figur 1-2* med gränsvärden enligt Bilaga E. Denna modell innefattar även ett mer omfattande dokumentationsarbete från underhållsavdelningen (Trafikverket 2013b). För att den nya implementeringen ska fungera effektivt kommer högre kvar att ställas på kontroll och verifikation av mätdatas ursprung. Denna kontroll genomförs med hjälp av RFID-märkning av SJ:s fordonsindivider (Trafikverket 2013a).



Figur 1-2 – Befintlig beslutsprocess

⁵ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

⁶ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

RFID, Radio Frequency Identification, är en trådlös automatisk identifikationsmetod likt en vanlig streckkod. Idag finns det tre standarder gällande RFID-märkning inom järnvägsbranschen⁷. I Sverige har ingen standard antagits, men utredning pågår.⁸ I Finland, där samtliga tågagnar har blivit RFID-märkta, har flera positiva effekter medförts gällande kategorisering och uppföljning av hjulskador noterats då enskilda hjulaxlar lättare kan spåras⁹.

⁷ Personlig kommunikation: Elena Kabo, 2013-01-22

⁸ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

⁹ Personlig kommunikation: Elena Kabo, 2013-02-26

2 Metod

Syftet med rapporten är att bistå i arbetet att förbättra arbetet med befintliga hjulskadedetektorer. Metoden har sin grund i analys av data insamlad av de mätstationer som finns runt om i Sverige. Tillämpade metoder har utvecklats för att stödja detta syfte.

2.1 Förstudie

Insamling av rådata skedde från ett antal av Trafikverkets hjulskadedetektorer. Tillgänglig data från mätstationerna innefattar uppmätta vertikala krafter och tid för passagen. Databasen, vidare kallad huvuddata, är exporterad från Trafikverkets interna system DPC-III, och erhöles av Pär Söderström. Den sträcker sig över tiden från 2012-01-01 till 2012-10-26, och innefattar ungefär 1,6 miljoner mätposter. Huvuddata innehåller inte information om fordons-ID vilket innebär att data om specifika fordonsindivider inte kan extraheras och sällas ut. Data hämtades även direkt ur DPC-III i efterhand av författarna. Detta främst för att studera specifika tåg under en längre tid. Huvuddata innehåller mätvärden från 19 av Trafikverkets 25 utplacerade hjulskadedetektorer. Antalet mätvärden från varje detektor varierar, och visas i Bilaga F. För hjulskadedetektorernas geografiska placering se Bilaga A.

Ett flertal externa intressenter till projektet kontaktades för att utöka möjligheterna till informationsinhämtning. Initialt hölls ett möte med en teknisk specialist hos SJ, Pär Söderström.

2.2 Statistisk analys av hjulkraftsdata

Behandling och analys av data skedde genom kvantitativ databearbetning. Genom att använda en kvantitativ metod erhöles resultat som grundar sig på huvuddata eller delmängder såsom data relaterad till en enskild station eller ett enskilda tåg. Tolkning, analysering, och åskådliggörande genomfördes med hjälp av datorprogram och statistiska metoder. Resultaten från dataanalysen presenteras såväl grafiskt som numeriskt.

Analysen ledde till en insikt om vilka potentiella förbättringsområden som fanns och hur dessa kan utnyttjas. De tre parametrarna *peaklast*, *dynamic* och *ratio*, analyserades. Detta för att klarlägga möjligheterna att förhindra onödiga stopp genom att ta hänsyn till fler aspekter än enbart stopplarm.

För att analysera de ekonomiska incitamenten vad gäller svarvningsintervallen analyserades krafthistoriken för tre tåg som gav stopplarm, från huvuddata. Historiken visade hur lång tid som gick från det att tågen resulterade i underhållslarm tills dess att stopplarm erhöles. Denna analys gjordes för att få en uppfattning om hur ett ökat antal svarvningar påverkar underhållskostnaderna i relation till hur kostnaderna minskar till följd av ett färre antal akuta stopp.

3 Teoretisk bakgrund

3.1 Kvasistatisk analys av hjulkrafter

Vid kraftberäkning av de vertikala reaktionskrafterna för ett tåg i rörelse antas att tåget befinner sig i så kallat kvasistatiskt tillstånd. Detta är ett idealiserat tillstånd, vilket innebär att fordonet i en kurva antas utsättas för konstanta krafter och konstanta relativa rörelser inom fordonet samt mellan spår och fordon. Det förutsätter även att också kurvradien, rälsförhöjningen och friktionen antas vara konstant (Andersson & Berg 2007).

Vid kurvtagning påverkas tågen av vertikal- och horisontalacceleration. Genom att höja ytterdelen av rälsen i kurvor, så kallad rälsförhöjning, kan de laterala krafterna minska i syfte att öka komforten och minska påfrestningar på hjul och räl. Horisontalaccelerationen beror, förutom av rälsförhöjning, kurvradie och hastighet även av tågets egenskaper såsom massa och masscentrum. För en given hastighet och kurvradie finns en optimal rälsförhöjning, *teoretisk rälsförhöjning*, där spårplanskrafterna är noll och således oberoende av tågets egenskaper. Den hastighet som inte ger några spårplanskrafter för en given rälsförhöjning och radie kallas *balanserad hastighet* (Andersson & Berg 2007). För beräkningar se Bilaga C.

Då den reella rälsförhöjningen är lägre än den teoretiska rälsförhöjningen uppstår rälsförhöjningsbrist, vilket innebär att spårplanskrafter uppstår och passagerarna upplever en kraft utåt i kurvan. Samtidigt förskjuts normalkrafterna mellan hjul och räl från de inre till de yttre hjulen. På motsvarande sätt uppstår rälsförhöjningsöverskott då den reella rälsförhöjningen är högre än den teoretiska (Andersson & Berg 2007).

3.2 Hjulskador

Enligt Deuce (2007) kan hjulskadefenomenet delas in i fyra tekniskt relaterade kategorier, beroende på hur de har uppkommit: slitage, utmattningsskador, deformationsskador och termiska skador. Utifrån detta kan ett flertal olika typer av skador härledas. Vanligtvis åtgärdas en hjulskada genom omsvarvning av löpbanan, vilket leder till en minskad hjuldiameter. Det är normalt önskvärt att skillnaderna inom en boggi inte avviker nämnvärt, vilket kan leda till att även hjul på motstående axel i boggin måste svarvas om¹⁰. I följande text beskrivs de mest relevanta hjulskadetyperna och hjulskadefenomen. Utöver dessa kan bland annat nötning och lokal plastisk deformation uppstå, vilka normalt inte ger upphov till förhöjda hjullaster.

¹⁰ Personlig kommunikation: Anders Ekberg, 2013-02-07

3.2.1 Hjulplattor

En hjulplatta är en uppkommen tillplattad sektion av ett hjul, se *figur 3-1*, som ofta är ett resultat av andra typer av skador. Den vanligaste orsaken till en hjulplatta är att ett hjul låser sig och släpas mot rälen. Orsaken till detta härrör oftast ur bromsproblem, såsom kraftiga inbromsningar, fastfrusna bromsar eller löv- och ishalka. Då hjulet släpas mot rälen sker även en värmeutveckling, vilket kan resultera i att kvarvarande stål blir spröda. I denna spröda sektion kan sprickor successivt uppstå, vilka kan växa och orsaka materialbortfall i rullytan (Deuce 2007). Den abrasiva komponenten i bildandet av hjulplattor är liten relativt materialbortfallet orsakat av värmeutveckling (Deuce 2007).



Figur 3-1 – Hjulplatta (Foto: Jan Långström)

Hjulplattor ger upphov till buller vid normal drift. Detta medför ofta en stor negativ påverkan av kupémiljön vilket medför att eventuella hjulplattor ofta uppmärksammas i passagerartåg (men ej generellt i godståg). I befintliga hjulskadedetektorer hos Trafikverket noteras hjulplattor som en belastningstopp, *peaklast*. Hjulplattor korrigeras vanligen med hjälp av svarvning men i fall med avsevärd förslitning måste hjulet kasseras. Ett hjul kan vanligtvis svarvas om upp till fyra gånger, beroende på förslitningsgrad.¹¹ På vissa serviceplatser kan hjulen svarvas monterade på tåget, vilket således minskar underhållstiden, medan det för andra tillfällen krävs att hjulparen demonteras från vagnen och skickas för svarvning¹².

¹¹ Personlig kommunikation: Anders Ekberg, 2013-02-07

¹² Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-02-26

3.2.2 Rullkontaktutmattning

Rullkontaktutmattning, även kallat krossår, är en typ av utmattningssprickor som bildas i rullbanan på tåghjul, se *figur 3-2*. Dessa små sprickor tillväxer vid cyklisk belastning, under högt tryck och friktion, och förgrenas inåt i material, vilket kan leda till lokala brott där material lossnar från hjulet. Utmattningen kan vara ytinitierad eller initieras under ytan. Vid ytinitierad utmattning ackumuleras plastisk deformation vid rullkontakt med hög friktion. Dessa deformationer leder till att sprickor bildas, vilka förgrenas och vid kritisk spricklängd kan leda till materialbortfall. Utmattning som initieras under ytan kan ge allvarligare följder än ytinitierad (Deuce 2007). Men detta är mycket ovanligt¹³. Sprickorna som bildas, orsakas av en kombination av dålig kontaktgeometri, höga normalkrafter och defekter i materialet. De brott som orsakas av sprickbildning under kontaktytan leder till att en stor mängd material lossnar från hjulbanan.¹⁴



Figur 3-2 – Krossår (Foto: Jan Långström)

I samband med förbättrad boggi-prestanda och ABS-teknik har förekomsten av utmattningsskador blivit ett mer betydande problem. ABS-tekniken har medfört färre hjulplattor och därmed färre oplanerade omsvarvningar. Vidare har den förbättrade boggi-prestandan lett till jämnare körförhållanden och mindre slitage, vilket i sin tur medför att den kontinuerliga föryngringsprocessen upphört. Med mer moderna skivbromsar istället för äldre blockbromsar har den förebyggande omslipningen av löpbanan upphört och ger också upphov till fler utmattningssprickor (Deuce 2007).

¹³ Personlig kommunikation: Anders Ekberg, 2013-05-13

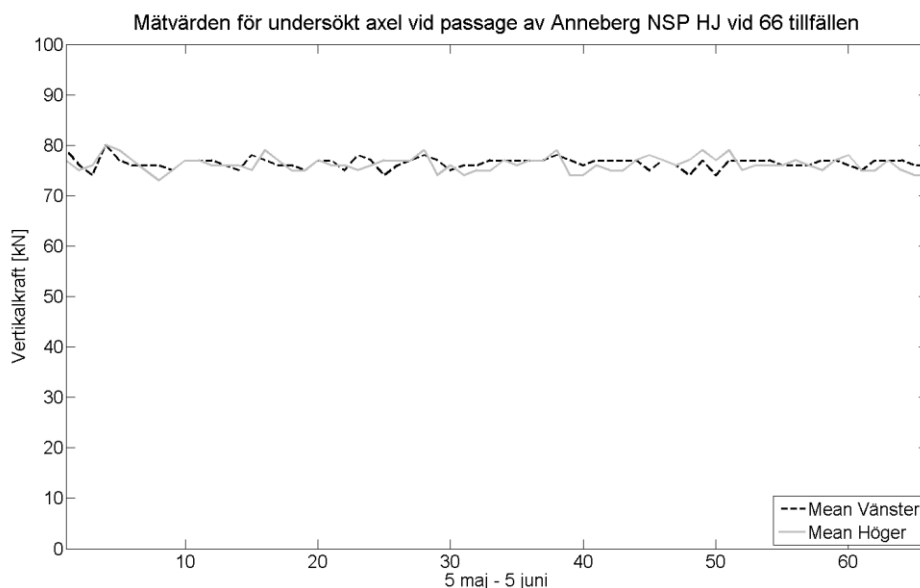
¹⁴ Personlig kommunikation: Anders Ekberg, 2013-02-07

4 Resultat och analys

Detta kapitel åsyftar presentera erhållna resultat från den analys av hjulkraftsdata som genomförts. Resultatet presenteras utifrån vad som ämnades undersökas, givet angivna metoder och teori i föregående avsnitt. Resultatet utgår från att de underhållsgränser (tabell 4-5, sida 20), vilka Green Cargo har under utredning, implementerats.

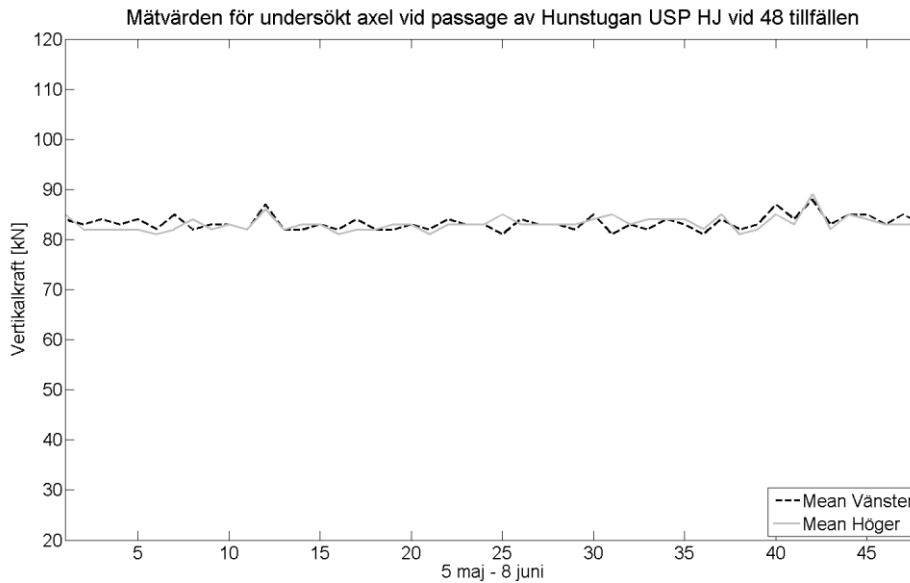
4.1 Precision i hjulkraftsmätningar

För att undersöka detektorernas precision analyserades uppmätta krafter från en till synes normal hjulaxel, där fordonsindividen hade en karaktäristisk kraftfördelning på grund av en hjulskada på en annan hjulaxel. Eftersom fordonsindividerna¹⁵ inom tågseten varierade analyserades endast den fordonsindivid som gav återkommande larm, enligt tabell 4-5, över en längre tidsperiod. I detta fall genererade den fjärde axeln på fordonsindividen larm. Därav användes den andra axeln i undersökningen, då den tredje axeln befinner sig på samma boggi som det skadade hjulet och kan därmed eventuellt ha påverkats av det skadade hjulet. Undersökningen innefattade mätstationerna Anneberg och Hunstugan där samma larmande pendeltåg passerade flera gånger.



Figur 4-1 – Mätprecision för detektorn vid Anneberg NSP

¹⁵ En fordonsindivid kan vara en eller flera vagnar eller lok med unikt fordons-ID i DPC-III

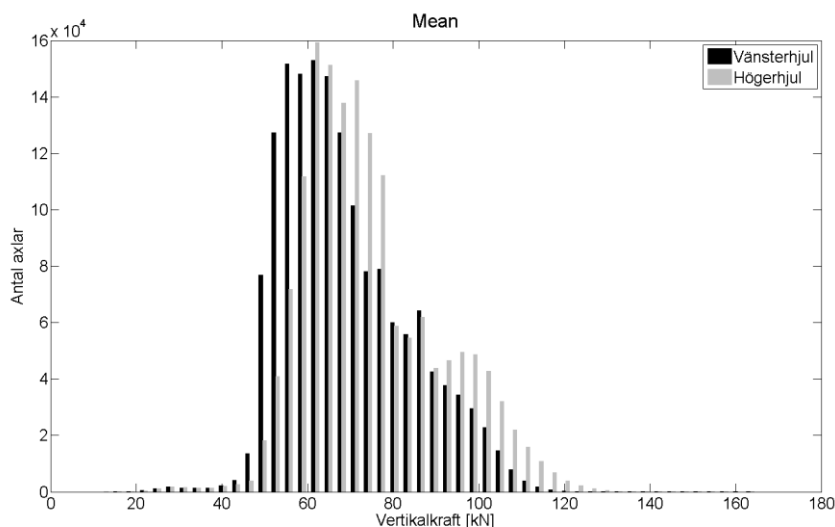


Figur 4-2 – Mätprecision för detektorn vid Hunstugan USP

Både Anneberg och Hunstugan gav konsekventa mätvärden, se figur 4-1 och figur 4-2. Vid Hunstugan noterades övergripande ungefär 9 % högre mätvärden än vid Anneberg. Detektorn i Hunstugan visade sig (vid undersökning i Optram) vara placerad på en raksträcka, medan detektorn i Anneberg visade sig vara placerad i en kurva. En kvasistatistisk modell för detektorn i Anneberg utformades därför med hjälp av kurvaturen och rälsförhöjningen vid detektorns position. Den balanserade hastigheten för tågen i Anneberg, då de vertikala krafterna på höger- respektive vänsterhjul torde vara ekvivalenta, var ungefär 100 km/h. De återkommande tågen som enligt ovan undersöktes för detektorns precision hade alla hastigheter mellan 115-145 km/h. Detta borde givit en kraftskillnad mellan 2 kN och 8 kN mellan höger- och vänsterhjul, enligt en kvasistatistisk modell (Bilaga C).

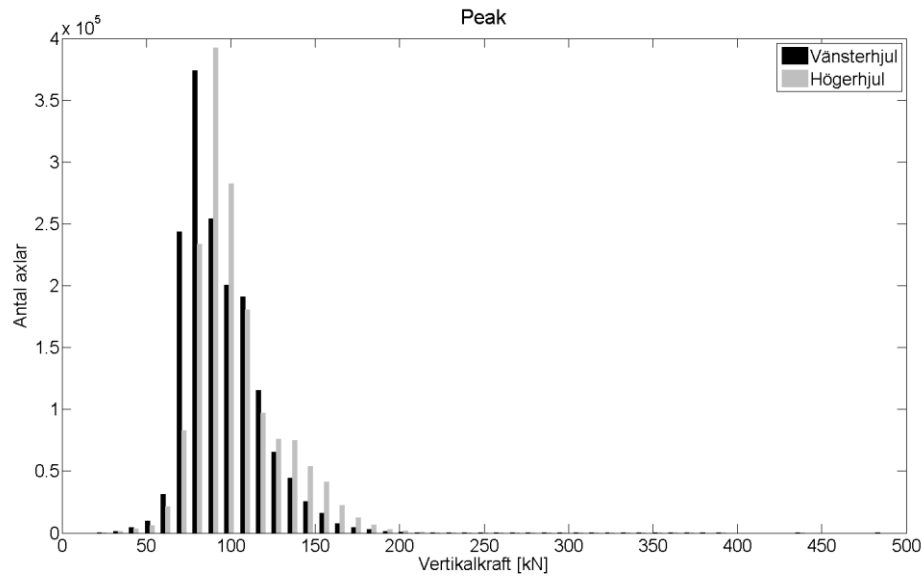
4.2 Snedfördelning av laster över hela populationen

För att åskådliggöra hur lasterna fördelades, sett över hela populationen, sorterades huvuddata i ett histogram, där höger- respektive vänsterhjul illustrerades separat. Den uppmätta vertikala kraften för varje axelpassage över en hjulskadedetektor presenteras således, som ett värde för vänsterhjul och ett för högerhjul.



Figur 4-3 – Meanlast över huvuddata

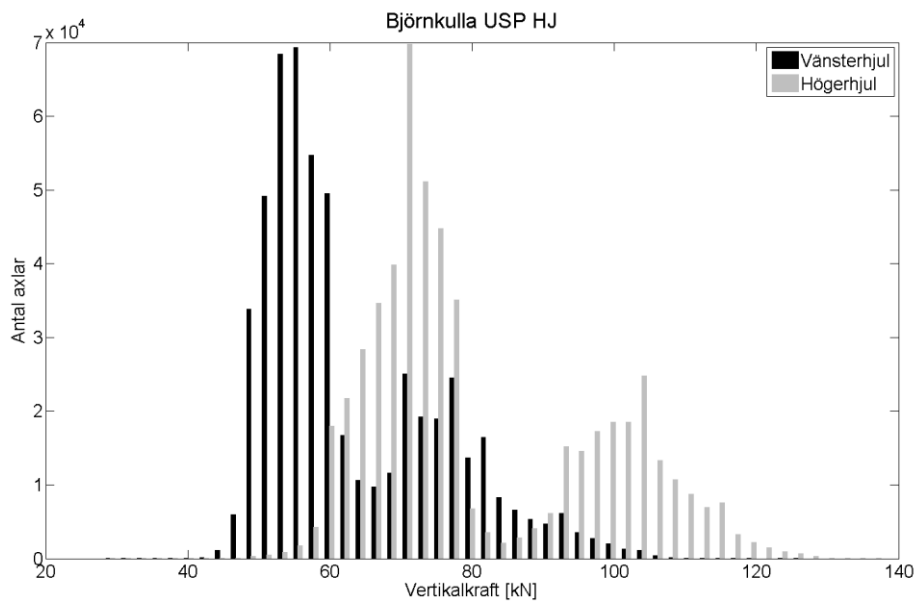
Figur 4-3 visar tydligt på en snedfördelning av *meanvärden* för huvuddata. Vänsterhjul registreras för märkbart lägre krafter jämfört med högerhjul.



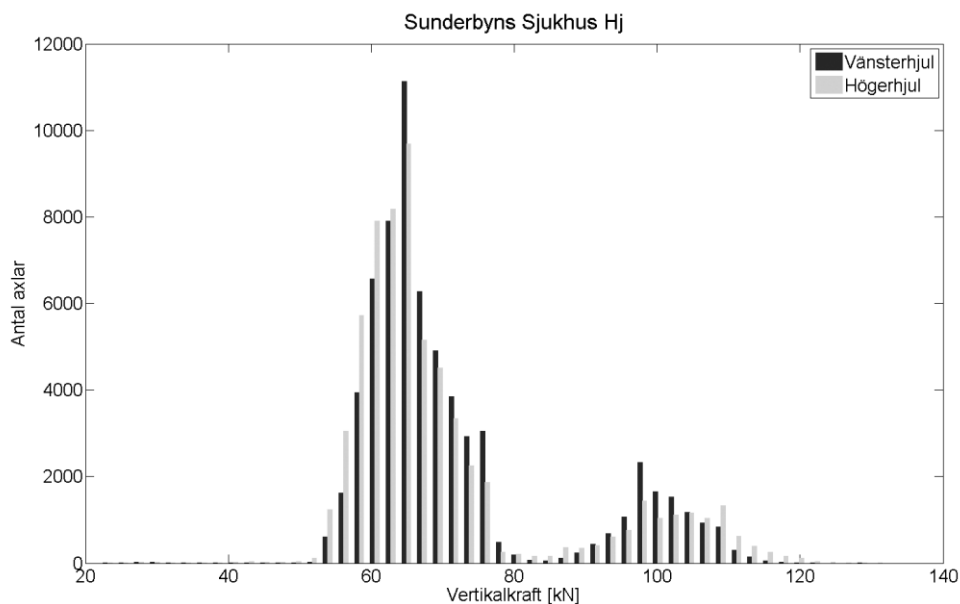
Figur 4-4 – Peaklast över huvuddata

Att en snedfördelning existerar kan även skönjas ur motsvarande graf för *peakvärden*, figur 4-4. Detta kommer således även att synas i värdena för *ratio* och *dynamic*.

Vid en granskning av mätvärden för enskilda hjulskadedetektorer var det tydligt att snedfördelningen av krafter från höger- och vänsterhjul uppträdde vid ett antal detektorer. Hjulskadedetektorerna vid Björnkulla USP i figur 4-5, Dammstorp NSP och Degerbäcken gav alla stora skillnader mellan vänster- och högerhjul, medan exempelvis Sunderbyns Sjukhus i figur 4-6, gav enhetligt resultat. Bilaga B ger en viss översikt av hur de olika mätarna verkar förhålla sig, avseende på fördelning av krafter på de olika hjulen.



Figur 4-5 - Meanlast från detektorn vid Björnkulla USP

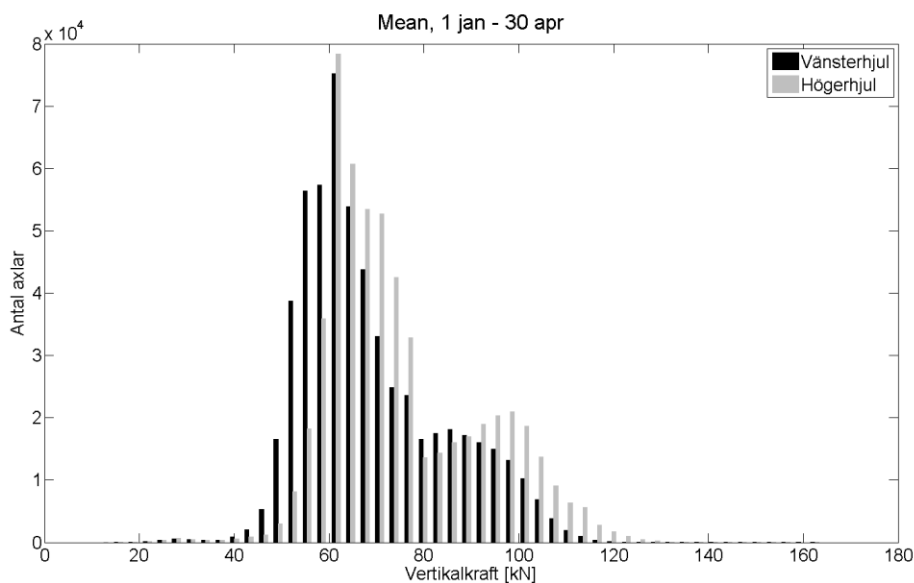


Figur 4-6 – Meanlast från detektorn vid Sunderbyns Sjukhus

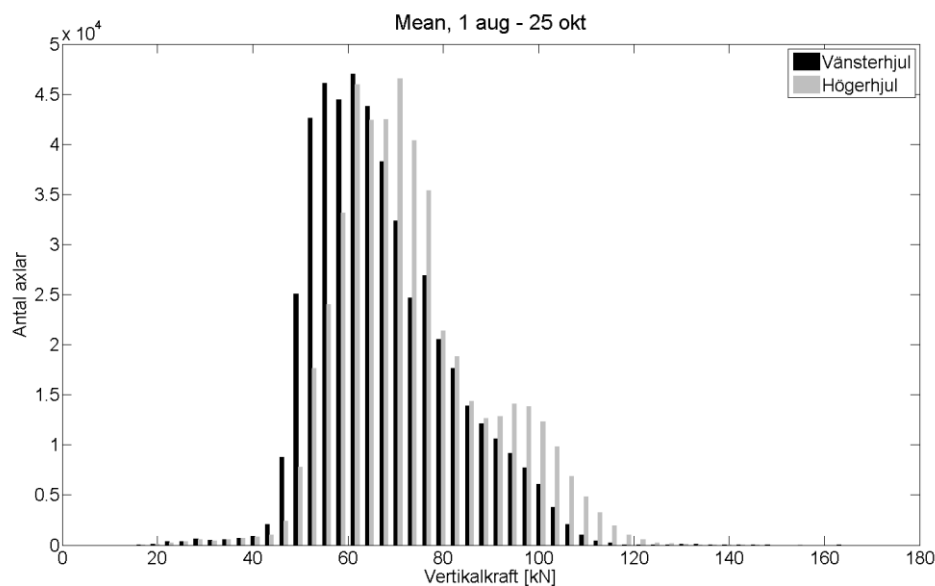
4.3 Kalibrering av hjulskadedetektorer

4.3.1 Nuvarande procedur för kalibrering av hjulskadedetektorer

Enligt Banverket (2008) bör hjulskadedetektorerna från Schenck underhållas per årsbasis under sommarmånaderna. Utifrån huvuddata sågs ingen märkbar skillnad med avseende på snedfördelning av vänster- respektive högerhjul före och efter sommarmånaderna, vilket visas i *figur 4-7* och *figur 4-8*. Enligt samma dokument, Banverket (2008), skulle garantiperioden, efter installation av hjulskadedetektorerna, ha fungerat som en utvärderingsperiod huruvida kontinuerlig kalibrering av mätgivarna är erforderlig eller ej.



Figur 4-7 – Meanlast för huvuddata före sommaren



Figur 4-8 – Meanlast för huvuddata efter sommaren

4.3.2 Rekalibrering av hjulskadedetektorer utifrån referensvärden

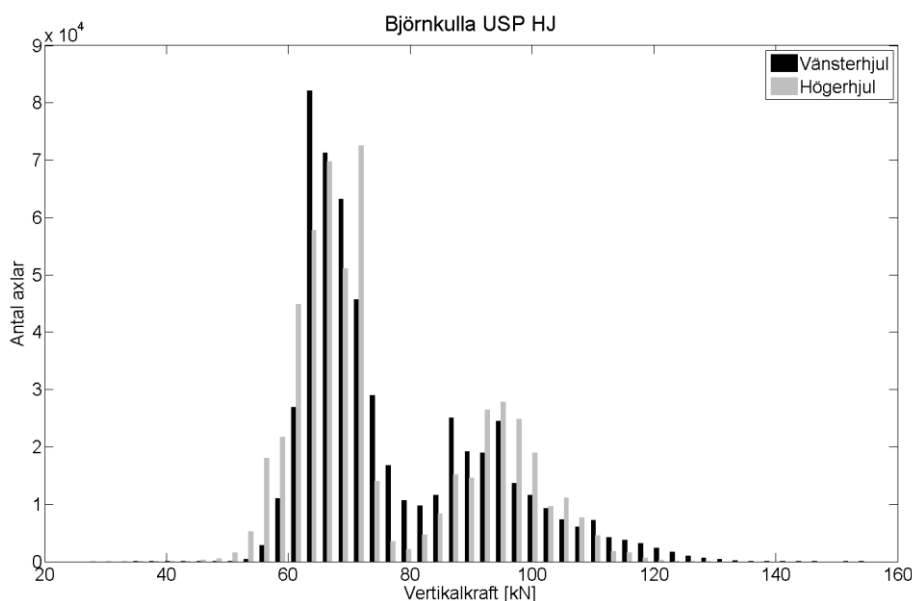
För att undersöka om en mer korrekt analys kunde fås utfördes en enklare korrigerad av befintlig data uppmätta vid Björnkulla USP, genom att mätvärden justerades med förhållandet mellan observerade värden, för höger- och vänsterhjul, och kända referensvärden. Som referensvärde användes här den kända vikten av X2-lok från datablad (SJ 2012c) vilket ställdes i relation till krafter uppmätta av detektorn vid Björnkulla USP vid tre olika passager av X2-lok.

$$referens = \frac{\text{dynamisk vikt} \times g}{\text{antalet hjul}} = \frac{78 \times 9,81}{8} = 95,6 \text{ [kN]}$$

$$koefficient_{höger} = \frac{n \times referens}{\sum_{i=1}^n mean_{höger,i}} = 0,938$$

$$koefficient_{vänster} = \frac{n \times referens}{\sum_{i=1}^n mean_{vänster,i}} = 1,23$$

Det förhållande som erhöles, för vänster- respektive högerhjul, multiplicerades med databasens värden. Detta medförde en mer väljusterad graf, se figur 4-9 i jämförelse med figur 4-5. Uppmätta X2-data kan ses i Bilaga D.



Figur 4-9 – Kompenserade mätvärden från detektorn vid Björnkulla USP

Ett par antaganden gjordes för att möjliggöra denna typ av analys:

- Snedfördelningen antogs ej vara hastighetsberoende. Detta motsvarar att hjulskadedetektorerna antogs vara placerade utan störning i horisontalled, vilket innebär att detektorerna antogs inte vara placerade i kurvor.
- X2-lokets tyngdpunkt antogs vara centrerad över de två boggi-vagnarna. Med andra ord antogs en korrekt mätning ge samma last på höger- och vänsterhjul.

4.3.3 Hjulskadedetektorernas placering

En granskning av bansträckningen invid ett antal detektorer genomfördes med hjälp av Optram. Hjulskadedetektorerna i Björnkulla och Anneberg visade sig vara placerade i kurvor med kurvatur och rälsförhöjning enligt *tabell 4-1*. Detektorerna i Dammstorp är placerade cirka 100 m ifrån en kurva, vilket innebär att mätningen kan påverkas för de tåg som uppmäts direkt efter kurvan. Mätningarna från Optram uppvisar märkbar ökning av spårfel vid samtliga undersökta detektorer, vilket kan bidra till ökad mätosäkerhet. Spårfelets omfattning kan beskrivas med Q-tal, som är ett mått på spårkvalitet och bör ligga över 80 för att krav om önskad spårkvalitet ska vara uppfyllda (Banverket 1997). Uppmätta värden gällande spårkvalitet vid detektorn i Anneberg kan ses i *tabell 4-2*.

Detektor	Radie [km]	Rälsförhöjning [mm]	Balanserad hastighet [km/h]
Björnkulla	3,6	40	110,5
Hunstugan	-	0	-
Anneberg	2,5	50	103,0
Dammstorp	3,0	65	128,1
Degerbäcken	-	0	-

Tabell 4-1 – Bangeometri vid hjulskadedetektorer

Q-tal	Avvikelse Höjdläge V (1-25m) [mm]	Avvikelse Höjdläge H (1-25m) [mm]
≥50	10	9

Tabell 4-2 – Mått på spårfel vid detektorn Anneberg

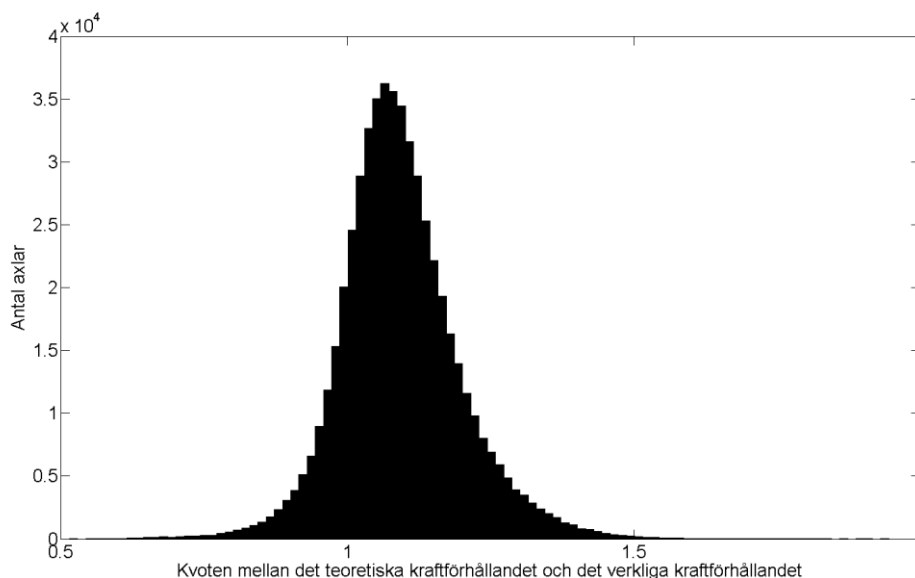
4.3.4 Rekalibrering av hjulskadedetektorer med hjälp av kvasistatisk analys

En mer robust modell utarbetades som komplement till den enklare modellen, beskriven i avsnitt 4.3.3, för att även inkludera hur hjulskadedetektorernas placering i kurvor påverkar mätvärden. Denna modell konstruerades för den teoretiska kvasistatiska omfördelningen av krafter i kurvor baserad på hastighet och kurvatur. Modellen skapades enligt de kvasistatiska teorier som beskrivs i avsnitt 3.1.

En kvot mellan uppmätta krafter på vänster- och högerhjul beräknades för samtliga passager vid detektorn i Björnkulla USP. Detta förhållande jämfördes sedan med den teoretiska kvasistatiska kvoten som uppstår då hastigheten är skild från den balanserade hastigheten. Avvikelsen mellan det teoretiska och uppmätta värdet illustreras i *figur 4-10*. I idealfallet bör kvoten mellan det teoretiska och uppmätta kraftförhållandet vara 1 för samtliga passager. För detaljer för beräkningar, se Bilaga C.

Vid beräkning gjordes ett kategoriskt antagande om att tågens tyngdpunkt låg mitt emellan höger- och vänsterhjul och 1,3 m ovan rälen i vertikalled. En känslighetsanalys, för att hantera antagandet om tyngdpunkt, gjordes, se *tabell 4-3*. Det teoretiska och uppmätta kraftförhållandet, mellan höger- och vänsterhjul, bör vara lika för att placering av detektor i kurva ska vara enda anledningen till snedfördelning. Detta kraftförhållande visas i *figur 4-10* och visar att en kvasistatisk kompensation skulle förbättra problemet med snedfördelning, men ej lösa det fullständigt.

$$\frac{F_{\text{Är,H}}}{F_{\text{Är,V}}} = \frac{F_{\text{Bör,H}}}{F_{\text{Bör,V}}}$$



Figur 4-10 – Förhållandet mellan teoretiska och uppmätta värden från Björnkulla USP

Tyngdpunkt [m]	Medelvärde	Standardavvikelse
0,80	1,16	0,117
0,90	1,15	0,114
1,00	1,13	0,111
1,10	1,12	0,109
1,20	1,11	0,107
1,30	1,09	0,105
1,40	1,08	0,103
1,50	1,07	0,102
1,60	1,05	0,101

Tabell 4-3 – Känslighetsanalys för tyngdpunkt

4.4 Repetitiva gränsvärdeslarm

Antalet tåg som gav fler än ett larm, enligt gränser presenterade i *tabell 4-5*, analyserades. För att kunna urskilja vilka tåg som larmar flera gånger gjordes flera antaganden. Larmen delades upp i larm för höger- respektive vänsterhjul. Alla tåg med samma antal axlar inom en tidsperiod av fem dagar jämfördes. *Meanvärden* och *peakvärden* för höger- respektive vänsterhjul jämfördes för alla axlar på dessa tåg. I det fall samtliga värden för motsvarande hjul vid två passager befann sig inom 22 kN drogs slutsatsen att dessa härrörde från samma tåg.

De gränsvärden som Green Cargos expert Lars Fehrlund har under utvärdering visas i *tabell 4-5*. I *tabell 4-4* ses nuvarande gränsvärden.

Nuvarande larmgränser			Högnivåalarm
Peak (personvagn)			400 kN
Peak (godsvagn)			400 kN
Peak (lok)			425 kN

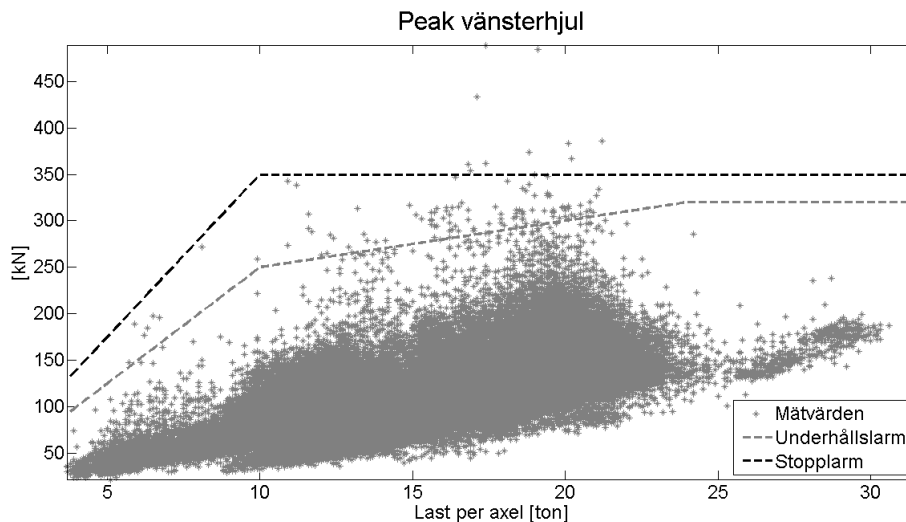
Tabell 4-4 – Nuvarande larmgränser¹⁶

Förslag under utredning av Green Cargo		Underhållsgränser	Stoppgräns
Peak		320 kN	350 kN
Ratio		5	7
Dynamiskt tillskott		200 kN	

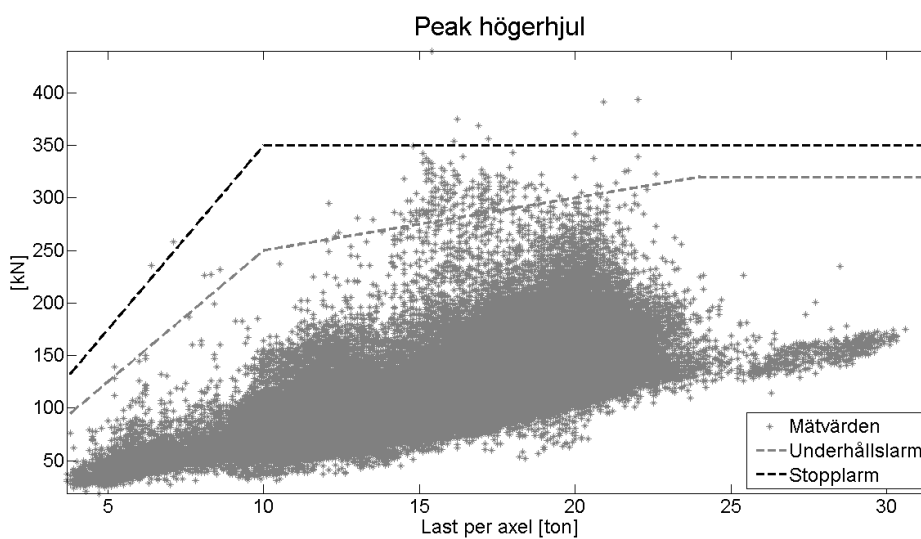
Tabell 4-5 – Larmgränsvärden under utvärdering

¹⁶ Personlig kommunikation: Hans Loskog, 2013-04-17

Analyserade mätvärden från huvuddata uppdelade för vänster- respektive högerhjul visas, i relation till gränsvärden i *tabell 4-5*, i *figur 4-11* och *figur 4-12*. Axellasten är framtagen som $\frac{mean_{vänster} + mean_{höger}}{g}$ för varje mätning.

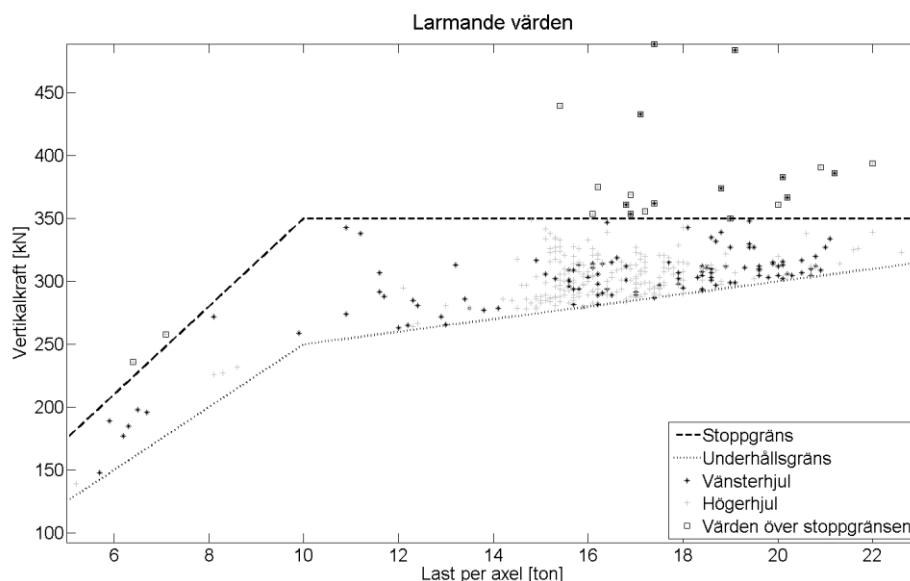


Figur 4-11 – Peakvärden och axellast för vänsterhjul från huvuddata



Figur 4-12 – Peakvärden och axellast för högerhjul från huvuddata

Figureerna ovan åskådliggör samtliga passager från huvuddata. De räta linjerna utgör gränsvärden enligt *tabell 4-5*. För att tydligare illustrera de mätvärden som överstiger dessa gränsvärden visas de separat i *figur 4-13*.



Figur 4-13 – Peakvärden från huvuddata som överstiger gränsvärden i tabell 4-5

Totalt översteg 352 mätvärden underhållsgränserna i tabell 4-5. Endast två tåg gav fler än ett larm vid samma tillfälle. Sammantaget var det, för huvuddata, 350 tåg som gav underhållslarm, varav 20 stycken gav stopplarm med stopplarmsgränser enligt tabell 4-5. Av dessa 350 tåg gav flera larm vid fler än ett tillfälle.

För samtliga uppmätta vänsterhjul larmade fem olika tåg mer än en gång. Det tåg som gav flest larm gav fem larm inom fyra dagar. Högerhjulen skiljde sig kraftigt från vänsterhjulen i detta avseende, då 25 olika tåg gav mer än ett larm. Ett tåg larmade 30 gånger inom tio dagar.

Vidare noterades att 25 tåg tillsammans gav 137 larm samt att de flesta av dessa larm kom från mätstationerna i Anneberg och Hunstugan, vilka båda ligger strax utanför Göteborg. Från dessa två mätstationer hade de tåg som larmade gemensamt att det var fjärde axeln på vagnen som larmade. Efter analys i DPC-III konstaterades att merparten av dessa larm kunde härledas från en vagn, av modell X11, som gått pendeltågssträckorna Alingsås-Göteborg och Kungsbacka-Göteborg. Samtliga 137 larm konstaterades under en månads tidsperiod. Det första larmet noterades i början av maj, vilket kan härröra ur att SJ tog över Västtrafiks pendeltågtrafik 1 maj 2012. (SJ 2012b)

4.5 Identifierad bug i DPC-III

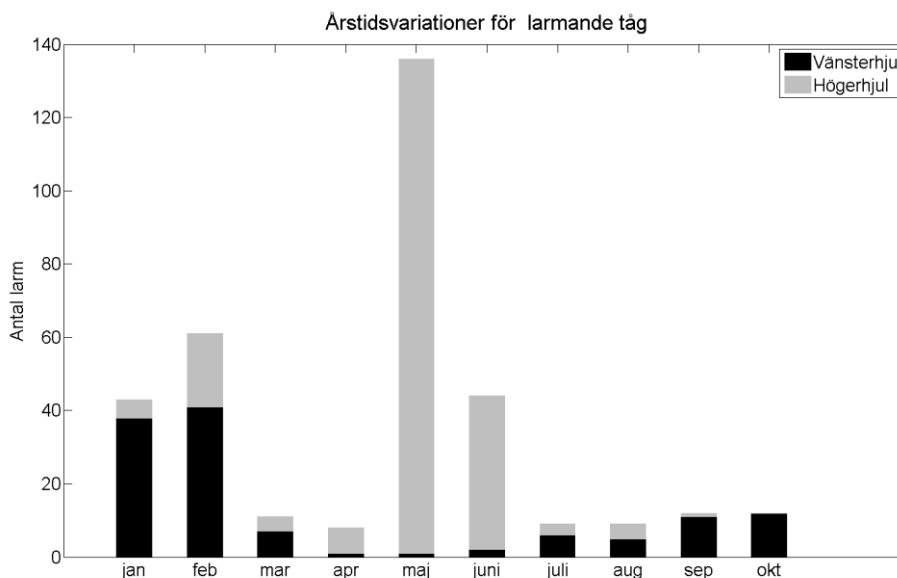
Analys gällande registrerade *peak*- och *mean*värden i DPC-III gjordes. I enstaka fall, ungefär 0,2 %, fanns meanvärden som översteg *peak*värden för samma tåghjul, se tabell 4-6. Detta är en matematisk orimlighet.

Antal felmätningar	6538 st
Antal mätningar	3189588 st
Andel felmätningar	0,205%

Tabell 4-6 – Felnoteringar i DPC-III

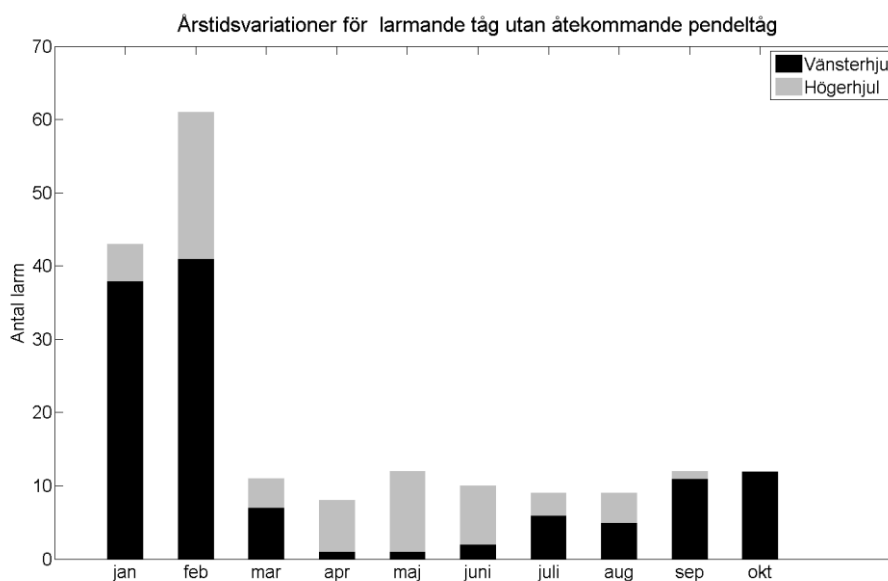
4.6 Säsongsvariationer

För att göra en analys av säsongsvariationerna användes underhållslarm enligt *tabell 4-5*. Antalet noterade underhållslarm är sammanställda månadsvis i *figur 4-14*. Vad som kan ses ur denna figur är två kraftiga ökningar av gränsvärdeslarm: en under vintern och en under försommaren. Under månaderna januari och februari registrerades 105 larm, 79 stycken av dessa larmade för vänsterhjul. I maj och juni registrerades 180 larm, av dessa var det tre som larmade för vänsterhjul.



Figur 4-14 – Säsongsvariation larm

Borträknat det pendeltåg, som nämns under i avsnitt 4.4, analyserades de resterande larmande högerhjulen och det framkom då att antalet larm var ungefär jämnt fördelade över de tio månaderna. Vänsterhjulen gav betydligt fler larm i januari och februari även när hänsyn togs till återkommande larmande tåg, se *figur 4-15*. Av totalt 126 larm registrerades 80 stycken för vänster hjul under januari och februari.



Figur 4-15 – Säsongsvariationer av larm justerade efter återkommande tåg

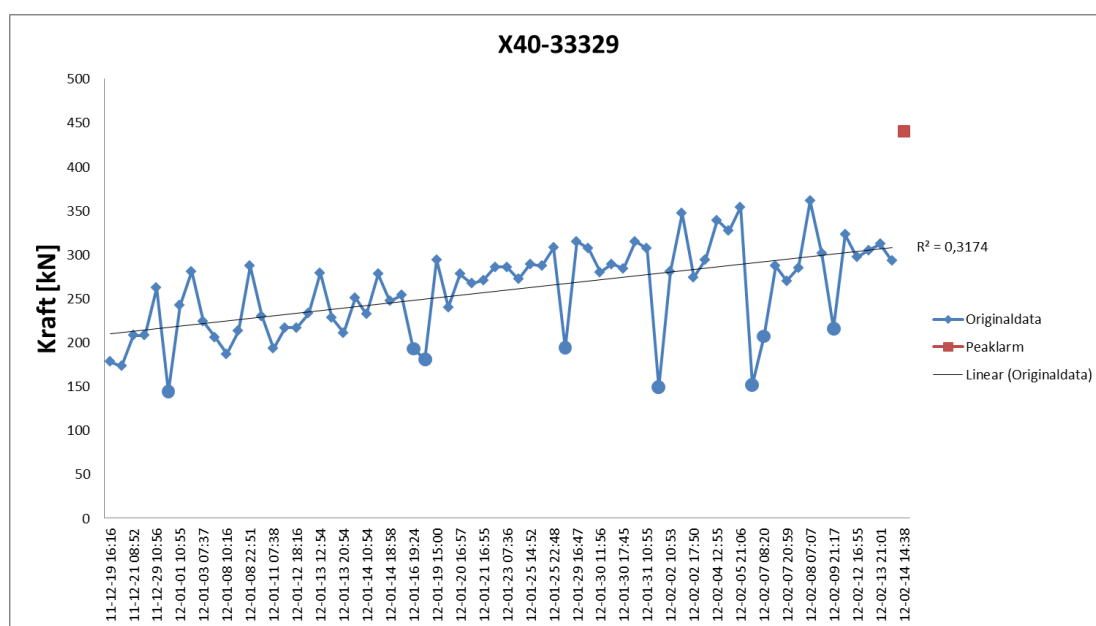
4.7 Ekonomisk analys

Av de fyra tåg som gav upphov till stopplarm under tidsperioden januari 2012-oktober 2012 kunde tre stycken spåras i DPC-III. Det fjärde tåget saknade fordons-ID, och således kunde krafthistoriken inte hittas. De tre tåg, vars krafthistorik hittades, skulle, enligt larmgränserna i *tabell 4-5*, ha genererat underhållsalarmer 4, 11 respektive 37 dagar innan de genererade stopplarm.

Ett stopplarm innebär merkostnader om ca 120 000 SEK i form av ersättningstrafik, biljetthinlösen och förhandsbokade kostnader. Vidare innebär en omsvarvning kostnader om ca 2 000 SEK per hjulpar.¹⁷ Således är upp till 60 omsvarvningar motiverade för att undvika ett stopplarm.

4.8 Beslutsmodell

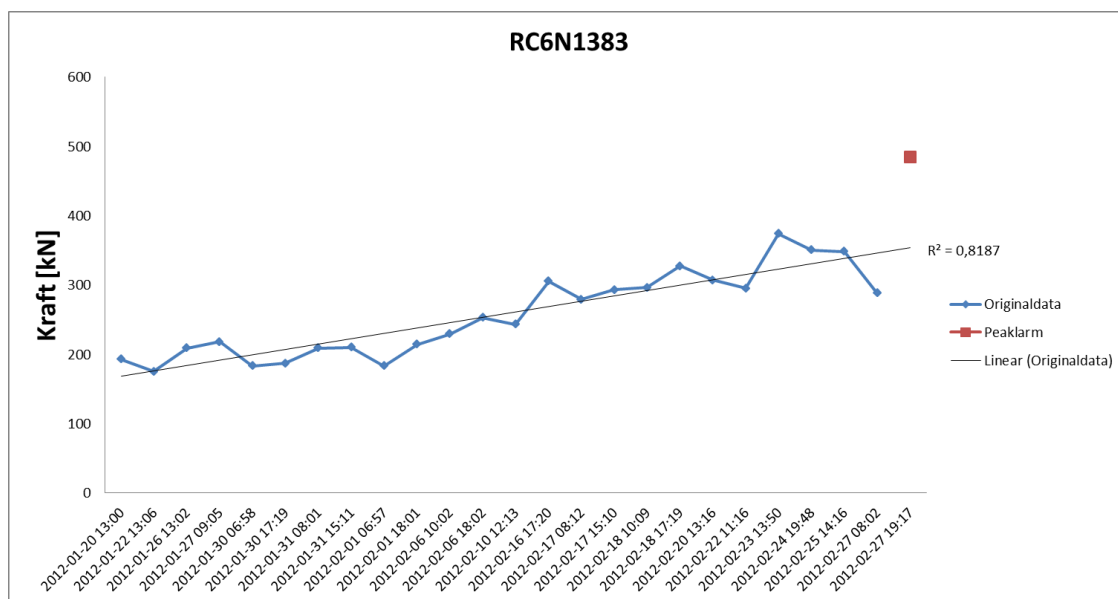
I de fall där SJ:s fordonsindivider har orsakat stopplarm gjordes analyser gällande skadornas tillväxt. Det larmande mätvärdet har justerats bort för att den statistiska korrelationen ska beskriva möjligheten att förutspå stopplarm innan det sker.



Figur 4-16 – Skadetillväxt för fordonsindivid X40-33329

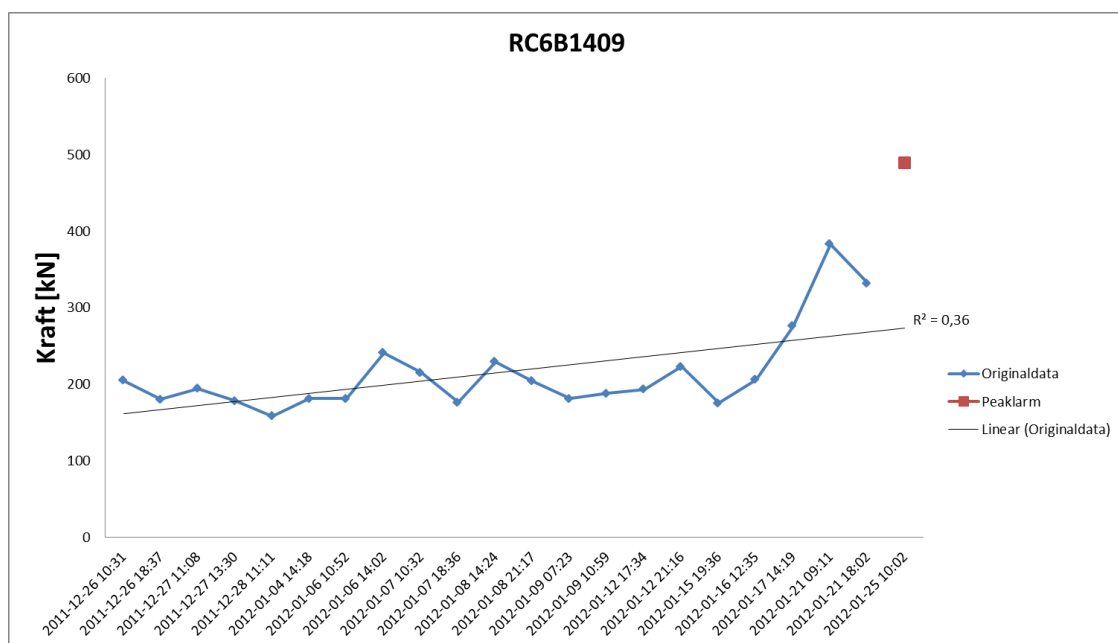
Den statistiska korrelationen mellan mätpunkterna och trendlinjen beskrivs av R^2 -värdet som räknas ut enligt Microsoft (2013). Resultatet som illustreras i *figur 4-16* uppvisar en trend i skadetillväxt med svag statistisk korrelation med $R^2 = 0,3174$. Om istället orimliga värden justerats bort erhålls en bättre korrelation med $R^2 = 0,6326$. De värden som är markerade med cirklar i *figur 4-16* anses orimliga, då de avviker från trend samt skiljer väsentligt från närliggande mätningar.

¹⁷ Personlig kommunikation: Pär Söderström, 2013-04-19



Figur 4-17 – Skadetillväxt för fordonsindivid RC6N1383

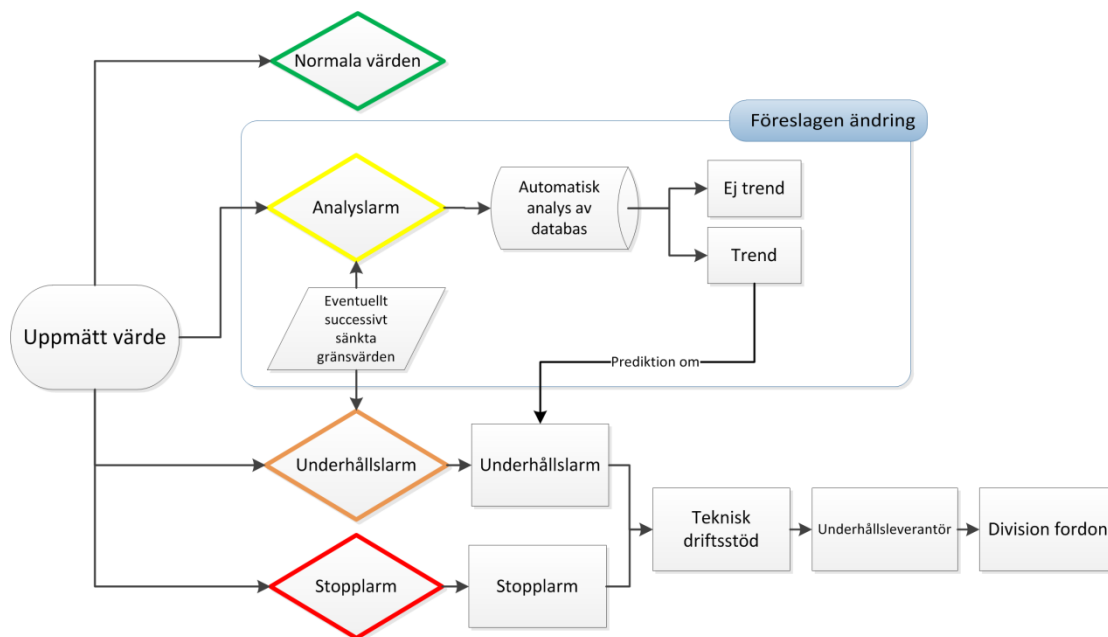
Resultatet som illustreras i *figur 4-17* uppvisar en trend i skadetillväxt med relativt god statistisk korrelation.



Figur 4-18 – Skadetillväxt för fordonsindivid RC6B1409

I fallet som illustreras i *figur 4-18* uppvisas höga mätnivåer över längre tid, följt av en kraftig ökning i nivåer, med underhållslarm endast fyra dagar innan stopplarm.

Den befintliga beslutsprocessen i *figur 1-2, sida 4*, modifierades utifrån detta för att åstadkomma en mer adaptiv modell som tar hänsyn till hjulskador tidigare med hjälp av trendanalys. Den tänkta fördelen är att minska risken för stopplarm.



Figur 4-19 – Föreslagen beslutsprocess

5 Diskussion

I detta kapitel analyseras och diskuteras de framtagna resultaten. Gruppens egna slutsatser och eventuella felkällor inkluderas i denna diskussion.

En övergripande felkälla är att de flesta resultat baseras på en dynamisk population, där hjulskador tillkommer och försvinner vid normal operativ drift. Detta medför att ett flertal skador inte nödvändigtvis har redovisats utan kan ha upptäckts vid manuell avsyning och åtgärdats innan de registreras som larm i hjulskadedetektorerna. Ytterligare en felkälla är att SJ tog över driften av pendeltågen i Västra Götaland. Dessa tåg, där SJ ej hade kontroll över initial status, utgör en väsentlig del av den totala analyserade databasen.

Möjlig felkälla kan också relatera till detektorernas funktion. Mätningen redovisad i *figur 4-16* uppvisar oförklarliga dippar av en annars ökande krafttrend. Det skulle kunna bero på att den förmodade hjulskadan exempelvis hamnar utanför mätområdet för dessa enskilda mätningar. En möjlig orsak är att hjulradien varierar för olika vagns- och loktyper.

5.1 Precision i hjulkraftsmätningar

Spridningen från detektorerna bedömdes initialt vara större än lämpligt och hjulskadedetektorernas interna mätprecision ifrågasattes således. Att detektorn i Hunstugan mäter 9 % högre än detektorn i Anneberg är anmärkningsvärt. Det kan bero på att ytterligare kalibrering krävs eftersom de enda parametrar som skiljer är antalet passagerare, hastighet och kurvatur, vilka inte borde ge avvikelser i storleksordningen 9 % för *meanvärde* på både höger- och vänsterhjul. Att en avvikelse mellan detektorerna finns behöver inte vara något större problem men det är viktigt att diskutera hur stor avvikelse som är acceptabel och hur denna hanteras.

De utvalda mätningarna från Anneberg, där detektorn är placerad i en kurva, gav konsistenta mätvärden. Att detektorn uppvisar ungefär samma mätvärde för samtliga passager är däremot något förvånande då det registrerade tågets hastighet varierar mellan 115-145 km/h. Enligt de kvasistatistiska beräkningarna, som tar hastighet och kurvradie i beaktande bör de uppmätta vertikala krafterna variera mellan 2-8 kN mellan höger- och vänsterhjul. Att tidigare mätningar från Anneberg uppvisar hastighetsoberoende mätvärden kan bero på att denna detektor kompenserar för hastigheten vid respektive passage.

5.2 Snedfördelning av laster över hela populationen

Utän närmare analys utan enbart sett över hela populationen ansågs det svårt att dra några slutsatser gällande orsaker och bakgrund till snedfördelningen. Analysen kan således endast användas till att styrka hypotesen om att ett flertal av detektorerna genererar anmärkningsvärda resultat, då SJ:s tågpopulation inte anses innehålla mätbart antal snedfördelade tåg.

Sett till enskilda mätstationer uppvisar många av detektorerna en egen karaktäristik, se Bilaga B. Denna anses i viss utsträckning bero på de typer av tåg som frekventerar just denna bansträckning. Att olika tågtyper passerar olika detektorstationer anses däremot inte utgöra en fullgod förklaring till snedfördelningen då flera stationer uppvisar väsentligt skild karaktäristik och snedfördelning. Den bakomliggande orsaken till dessa inkonsistenta mätresultat har inte fullständigt kunnat utredas men kan tänkas bero på inkonsistent mätning, detektorer placerade i kurvor, snedlastade tåg, varierande hastighet eller liknande faktorer. För den fortsatta användningen och utvecklingen av hjulskadedetektorerna är det viktigt att orsakerna till snedfördelningen utreds ytterligare.

Värt att notera gällande snedfördelade laster generellt, och tabellen i Bilaga B i synnerhet, är att en detektor inte nödvändigtvis mäter rätt då den har jämnt fördelade värden mellan höger- och vänsterhjul.

5.3 Kalibrering av hjulskadedetektorer

Då *figurerna 4-7* och *4-8* anses uppvisa samma typ av karaktäristik verkar inget omfattande arbete har gjorts under sommarmånaderna för att korrigera snedfördelningen i mätresultat mellan höger- och vänsterhjul.

Den kalibreringsmodell som beskrivs i rapporten grundas i antaganden om ett par relativt känsliga parametrar, i synnerhet gällande bansträckningens kurvatur. Att göra en relativ justering av hjulskadedetektorerna baserat på kända referensvärden grundas i antagandet att dessa mätningar av hjulen skedde under kontrollerade former med kända parametrar (lorens massa).

Värt att notera är att kalibreringsmodellen, i avsnitt 4.3.2, antas vara funktionell i de fall där de båda analysvillkoren uppfylls: att hjulskadedetektorerna är hastighetsoberoende och att X2-loket har en känd homogen viktfordelning.

Vid första anblick anses placeringen av enskilda hjulskadedetektorer anmärkningsvärd, då analysmiljön för en detektor placerad i kurva blir avsevärt mer komplex. Huruvida eventuella mätfel kan härledas ur kalibreringsproblematik eller denna placering har dock ej kunnat härledas i denna studie. Dock anses montering av detektorer i kurvor vara en bidragande orsak till snedfördelning av krafter i åtminstone två (Björnkulla USP och Anneberg NSP) av de undersökta fallen, se *tabell 4-1*. Detta påverkar i sin tur den totala kraftfördelningen, sett över samtliga detektorer. Detta bör hjälpligt kunna kompenseras med hjälp av kvasistatiska uppskattningar av kraftfördelningen mellan hjulen, se avsnitt 4.3.4. *Figur 4-10* visar däremot som exempel att snedfördelningen från Björnkulladetektorn troligen inte enbart beror på kurvatur och rälsförhöjning, då kraftfördelningen baserat på kvasistatiska beräkningar skiljer sig från det uppmätta kraftförhållandet. Således ger den kvasistatiska kalibreringsmetoden inte en fullgod kompensering.

Då den uppsättning data som krävs för en implementering av de korrigeringsmetoder som presenteras i studien är unika för varje enskild fordonsindivid skulle ett mer avancerat informationssystem krävas (såsom RFID-märkning på fordonsindividnivå).

Var spårfele vid detektorerna härstammar ifrån har ej härletts men kan bero på att slipers och ballast bytts ut vid detektorerna. Vidare skulle uppriktning av spår kunna försvåras vid detektorerna.

5.4 Repetitiva gränsvärdeslarm

Från tidigare resultat kan diskuteras huruvida de larmgränser som listas i *tabell 4-5* är lämpliga för SJ. Med alla dubletter utsorterade erhålls relativt få larm från huvuddata. För SJ:s räkning kan snävare underhållsgränser som är bättre anpassade till passagerartåg vara lämpliga. De snävare underhållsgränserna avser främst *ratio*gränser.

5.5 Identifierad bug i DPC-III

Observerationer gjorda under arbetets gång har lett till ett ifrågasättande av tillförlitligheten hos de värden som lagras i DPC-III. Vad den felaktiga information som identifierats grundas i är ej härlett, men bör ägnas vidare analys då det, i värsta fall, kan vara symtom på ett systemfel.

Funktioner och sökverktyg i DPC-III har varit begränsande för arbetet. Vanliga problem består i att sökningar av krafthistorik för flera dagar för enskilda tåg eller detektorer misslyckas. Dessutom saknas ett smidigt sätt att exportera data för flera passager samtidigt. Vidare bör möjligheten till fler sökkriterier finnas, såsom möjligheten att sortera på storhet, till exempel alla kraftmätningar över 200 kN.

5.6 Säsongsvariationer

Slutsatser om säsongsvariationer är svåra att dra, då SJ tog över driften av pendeltåg i Västra Götaland under analysperioden för huvuddata (SJ 2012b) och därigenom förändrades den undersökta populationen. Detta medförde en signifikant ökning av larm. Således krävs vidare undersökning för att dra entydiga slutsatser. I *figur 4-15* är det en tydlig ökning av inkommande larm under perioden januari-februari. Huruvida detta beror på att mätresultaten påverkas av vinterförhållanden eller om hjulskador de facto ökar går inte heller att dra några säkra slutsatser kring utan underhållsdata.

5.7 Ekonomisk analys

Från resultatet ges att tre av de fyra undersökta tågen, vilka alla gav stopplarm, hade givit en ledtid om respektive 4, 11 och 37 dagar från att mätvärdena nådde gränsen för underhållslarm, enligt *tabell 4-5*, till stopplarm erhöles. Om hjulen, med hjälp av informationen från dessa underhållslarm, hade svarvats om i ett tidigare skede hade, med stor sannolikhet, stopplarmen kunnat undvikas. Detta ger då i sin tur en minskad kostnad om cirka 360 000 SEK för akutstoppen. Den studerade tidsperioden innefattade cirka 190 underhållslarm. Under förutsättning att alla hjulaxlar med förmodade skador hade omsvarvats vid uppnådd underhållsgräns, i syfte att förhindra stopplarm, hade kostnaden blivit ungefär densamma som för de tre stopplarmen. Med exempelvis kundvärde i beaktning kan det ändå anses vara lönsamt att svarva hjul som ger underhållslarm. Dels på grund av möjligheterna att undvika stopplarm men även på grund av att de orsakar mer slitage och troligen bör svarvas om relativt omgående oavsett larmet. En ännu större effekt kan uppnås genom att ytterligare sänka gränsen för underhållslarm. Underhållsfrekvensen för omsvarvning skulle då öka, vilket ger något ökade kostnader för svarvning men tillförlitligheten skulle bli bättre. I ett inledande skede skulle även en engångskostnad uppstå för att åtgärda de tåg som idag har konstant höga mätvärden.

Den ekonomiska analysen för svarvintervallen grundas i grova antaganden och bör nyttjas därefter. De ekonomiska konsekvenserna för ett akutstopp såväl som kostnaderna för omsvarvning är uppskattade riktvärden, som egentligen beror av ett flertal ytterligare faktorer. De uppskattade kostnaderna är framförallt förstahandskostnader och tar inte hänsyn till samhällsekonomiska aspekter eller kostnader som uppstår för andra berörda operatörer. På grund av de få antalet tåg som gav stopplarm samt de begränsade möjligheterna för historiksökning i DPC-III kunde resultatet endast ge en fingervisning om ekonomiska konsekvenserna för ändrade omsvarvningsrutiner. Uppföljning av fler tåg och bättre sökverktyg i DPC-III skulle kunna ge ett tydligare resultat. För en mer omfattande och säkrare analys hade också en betydligt mer djupgående analys av dagens underhållsrutiner krävts.

5.8 Beslutsmodell

Den typ av information som en underhållsplanerare ska få tillgång måste i första hand vara tillförlitlig. Därutöver ska den vara konkret och lättolkad. Således finns stora incitament att implementera förenklade koder, baserade på kraft och andra mätdata, för prioritering av underhållsärenden. I enlighet med Ekberg och Kabo (2011) anses en enkel kategorisering av hjulskador lämplig.

För att tidigare identifiera hjul som löper större risk att noteras för stopplarm föreslås en modell som tar hänsyn till skadans tillväxt och indikerar om, och hur, skadan ökar. Analysen avses initieras då uppmätta detektorvärden överskrider en lägre gräns, här kallat *analyslarm*. Analysens resultat, förutsatt att tillväxt uppvisas, avses behandlas på samma sätt som underhållslarm enligt 2013-06-01-implementeringen, se *figur 1-2, sida 4*. Krafthistoriken extrapoleras i syfte att förutspå dagen då underhållsgränsen uppnås. Bakgrunden till förslaget med införande av analyslarm är att de tre tåg som gav stopplarm (*figur 4-16, 4-17, 4-18*) orsakade detta larm 37, 11 respektive 4 dagar efter överskridande av underhållslarmsgränsen, enligt *tabell 4-5*. Detta påvisar att tillväxtförloppet skiljer märkbart åt för de tre tågen. För att lättare planera underhåll är det önskvärt att förutspå en begynnande hjulskada tidigare än fyra dagar, vilket motiverar införandet av analyslarm. Analyslarm kan anpassas efter rådande trafikslag då belastningsfallen skiljer väsentligt åt mellan gods- och persontrafik. Lämpliga analysgränsvärden antas preliminärt ligga runt 200 kN, med tydlig trend att *peakvärden* ökar, för persontåg. En implementering av RFID-märkning skulle avsevärt förenkla en sådan analys.

6 Rekommendationer

Utifrån de slutsatser som kan dras ur denna studie sammanfattas rekommendationer till fortsatta studier och implementering.

- Härled orsaken till eventuella mätfel bland hjulskadedetektorer, se *figur 4-3* samt *figur 4-16*
- Implementera automatiserade *analyslarm* (larm för tillväxande hjulskador) samt kontinuerlig uppföljning av de hjul som överstiger detta gränsvärde
- Se över varför *meanvärden* i vissa fall är högre än *peakvärden* samt förbättra sökverktyget i DPC-III (se avsnitt 5.5)
- Implementera kvasistatiska beräkningsmodeller för att ytterligare kompensera mätvärden i kurvor
- Inför RFID-märkning för att underlätta styrning och uppföljning av underhåll samt fördjupande operativa analyser
- Utveckla en modell för kontinuerlig kalibrering med hjälp av referensvärden

6.1 Vidare studie

Ett framtida projekt, förutsatt att DPC-III förbättras, skulle lämpligtvis grundas i trendanalyser av larmande tåg. Detta för att erhålla en empirisk modell för tillväxten av hjulskador och, om möjligt, härleda typen av skada ur kraftnivåer.

Att kontrollera och kalibrera hjulskadedetektorer är en nödvändighet för att säkerställa tillförlitligheten i datamängden från detektorerna. Utifrån detta projekt går det inte att säga huruvida detektorerna mäter rätt eller inte, däremot bör de kontrolleras och kalibreras efter hastighet, fordonsvikt, kurvatur och rälsförhöjning vid detektorstationerna. Detta då flera detektorer står i kurvor och dessa parametrar då är avgörande för kraftmätningen.

Referenser

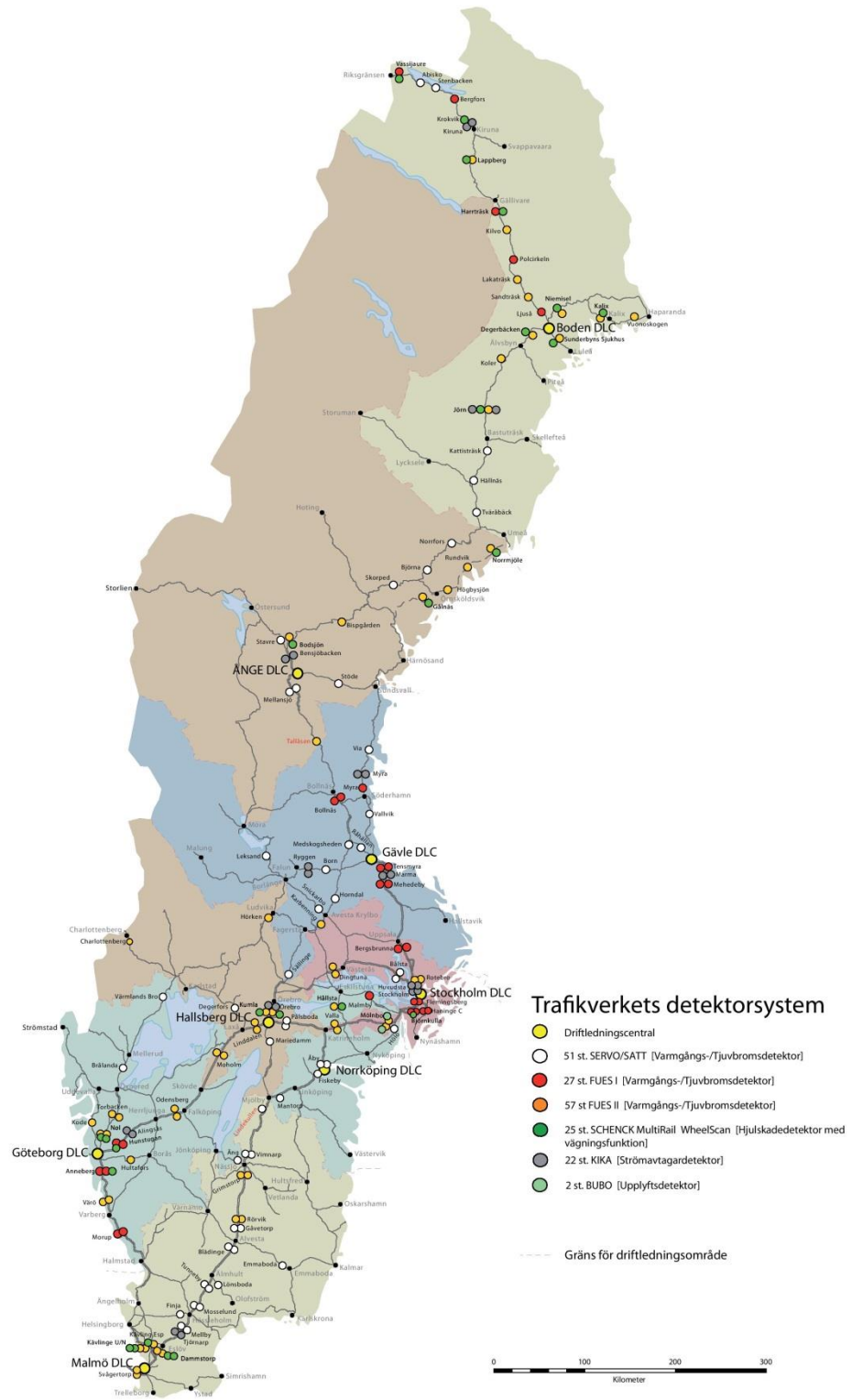
- Andersson, E. & Berg, M. (2007). *Spårtrafiksystem och spårfordon - del 1: Spårtrafiksystem*. Stockholm: Universitetservice.
- Andersson, E. & Berg, M. (1999). *Spårtrafiksystem och spårfordon - del 2: Spårfordon*. Stockholm: KTH Högskoletryckeriet.
- Banverket (2008). *Detektorer. Förutbestämt underhåll*. BVH 592.0502. 17s + 91s bilagor
- Banverket (2009). *Detektorer – Hantering av larm från stationära detektorer för övervakning av järnvägsfordon*. BVF 592.11 ver. 2.0. 22 s + 5s bilagor
- Banverket (1997). *Spårlägeskontroll och kvalitetsnormer- central mätvagn STRIX*. BVF 587.02. 12s + 3s bilagor
- Deuce, R (2007). *Wheel Tread Damage - An Elementary Guide*, Technical Report, Bombardier Transportation GmbH, Netphen, Germany. 38s
- Ekberg, A. & Kabo, E. (2011). *Klassificering av hjulskador*, Chalmers tekniska högskola. Göteborg: Rapport 2011:12. 7s
- Microsoft (2013). *RSQ function*. Tillgänglig: <http://office.microsoft.com/en-us/excel-help/rsq-function-HP010342863.aspx> [2013-05-21]
- SJ. *Energieffektiva tåg*. Tillgänglig: <http://www.sj.se/sj/jsp/polopoly.jsp?d=4577&a=55741&l=sv> [2013-05-07]
- SJ (2012a). *Hastighets- och viktuppgifter för drivfordon*. Dokumentnummer SJF 010.2.1, utgåva 2. 16s
- SJ (2012-03-30b). *SJ tar över tågtrafiken i Västsverige*. Tillgänglig: <http://www.sj.se/sj/road/Classic/departement/197/jsp/Render.jsp?d=12397&l=sv&selectedYear=2012&selectedArticle=746996> [2013-05-07]
- Svensk Standard (2010). *Railway applications – In-service wheelset operation requirements – In-service and off-vehicle wheelset maintenance*. SS-EN 15313:2010, utgåva 1. 67s
- Trafikanalys (2012). *Godstransporter i Sverige – redovisning av ett regeringsuppdrag*. Stockholm: Rapport 2012:7. 105s + 10s bilagor
- Trafikverket (2013-04-23a). *Detektorer*. Tillgänglig: <http://www.trafikverket.se/Foretag/Trafikera-och-transportera/Trafikera-jarnvag/Teknik-i-jarnvagstrafiken/Detektorer/> [2013-05-08]
- Trafikverket (2013b). *Detektorer – Hantering av larm från stationära detektorer samt åtgärder efter upptäckta skador vid manuell avsyning*. BVF 592.11 ver. 3.0. 21s + 5s bilagor
- Trafikverket (2013-04-26c). *Teknisk kontroll av fordon, DPC*. Tillgänglig: <http://www.trafikverket.se/Foretag/Trafikera-och-transportera/Trafikera-jarnvag/System-och-verktyg-for-jarnvag/Teknisk-kontroll-av-fordon-DPC/> [2013-05-07]
- Trafikverket (2013-02-05d). *Trafikverkets detektorsystem*. Tillgänglig: http://www.trafikverket.se/PageFiles/9433/Trafikverkets%20detektorsystem%20130205_Tlo.pdf [2013-05-07]

Muntliga källor:

- Ekberg Anders, Biträdande professor, Chalmers tekniska högskola
- Kabo Elena, Docent, Chalmers tekniska högskola
- Loskog Hans, Systemansvarig varmgångs-/tjuvbroms-/hjulskadedetektorer, Trafikverket
- Söderström Pär, Teknisk specialist, Mekaniska system, SJ AB

Bilaga A – Detektorkarta (Trafikverket 2013d)

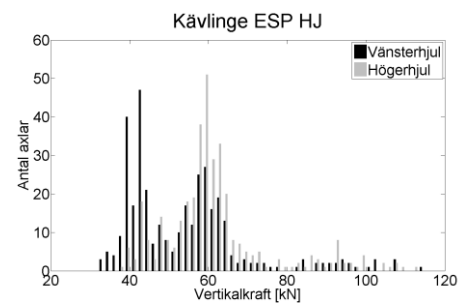
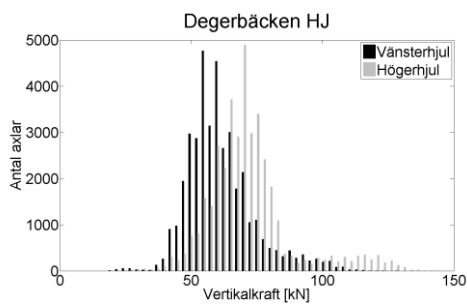
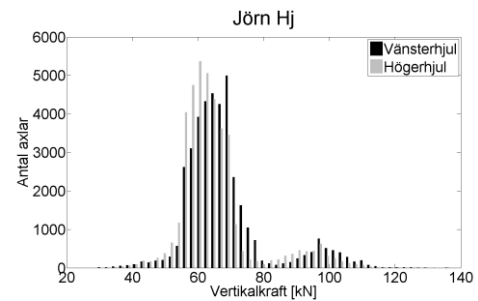
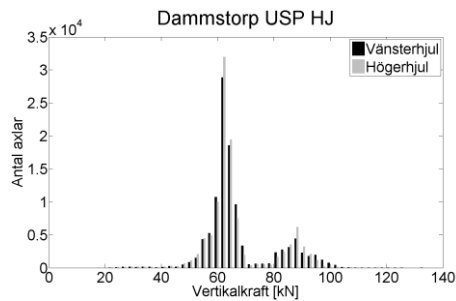
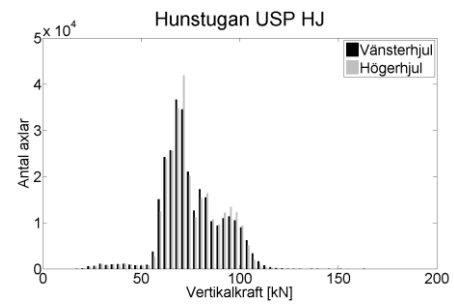
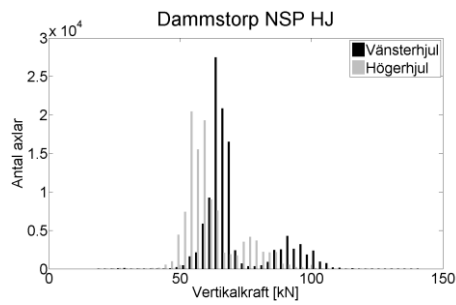
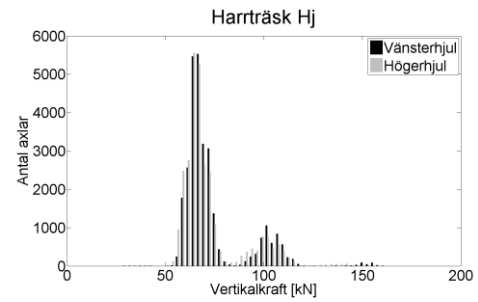
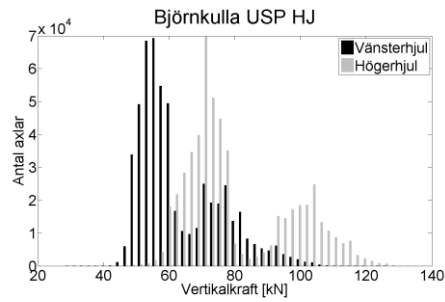
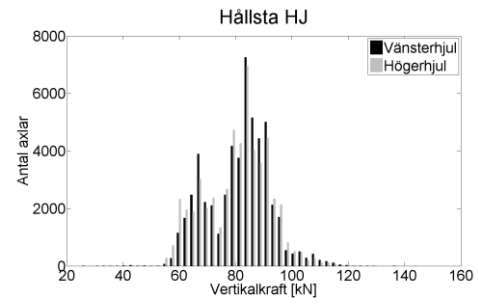
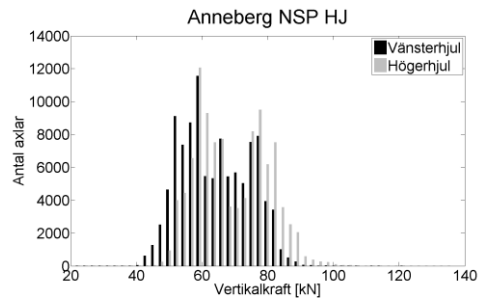
TRAFIKVERKET
2013-02-05 H10

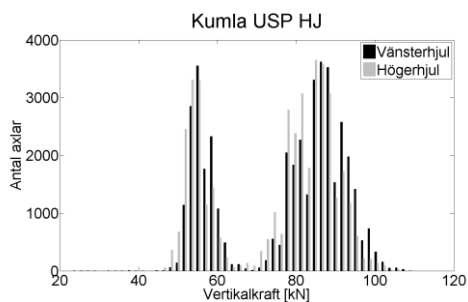
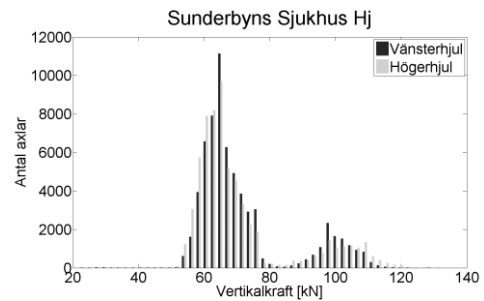
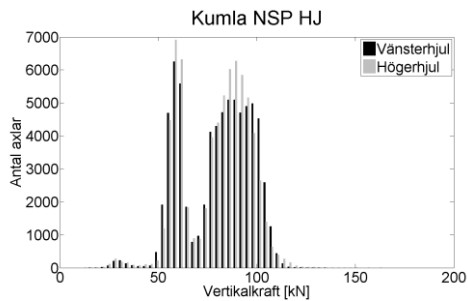
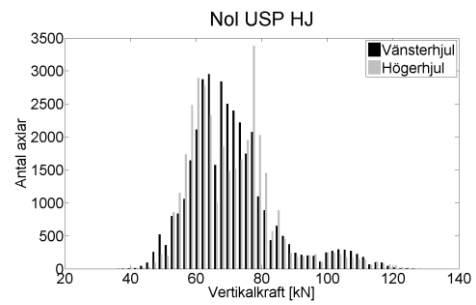
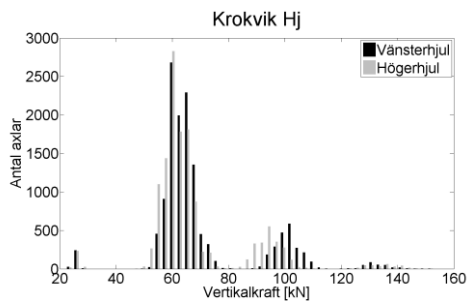
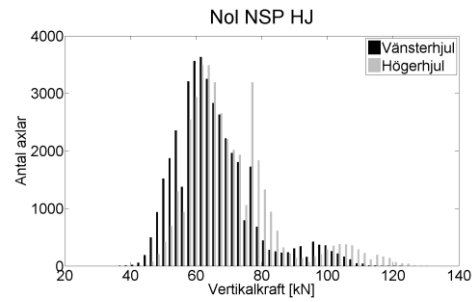
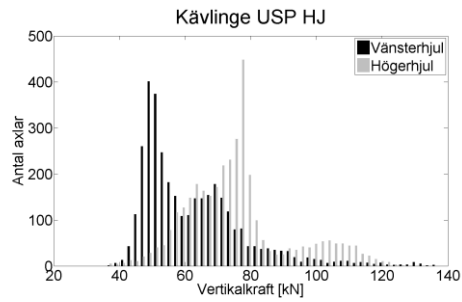
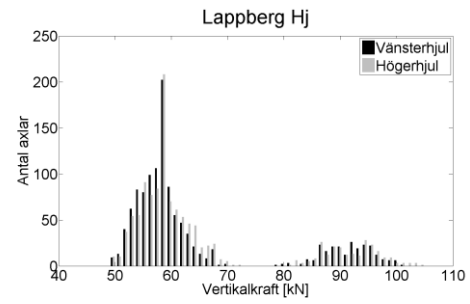
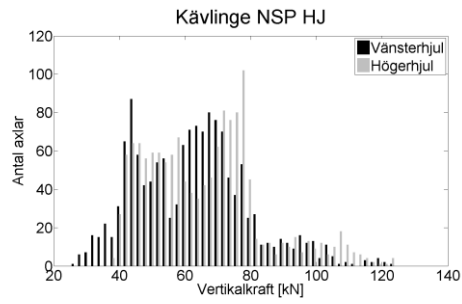


Bilaga B- Snedfördelning av uppmätta krafter

Projektets utvärdering av de enskilda hjulskadedetektorernas fördelning och karaktäristik.

Detektorplats	Karaktäristik	$\frac{mean_{höger}}{mean_{vänster}}$
Anneberg HJ	Lätt förskjuten höger	1,077
Björnkulla USP HJ	Kraftigt förskjuten höger	1,281
Dammstorp NSP HJ	Kraftigt förskjuten vänster	0,869
Dammstorp USP HJ	Jämt fördelad	0,990
Degerbäcken HJ	Kraftigt förskjuten höger	1,173
Harrträsk HJ	Jämt fördelad	0,979
Hunstugan HJ	Jämt fördelad	1,002
Hållsta HJ	Jämt fördelad	0,991
Jörn HJ	Lätt förskjuten vänster	0,958
Krokvik HJ	Lätt förskjuten vänster	0,964
Kumla NSP HJ	Jämt fördelad	0,991
Kumla USP HJ	Jämt fördelad	0,971
Kävlinge ESP HJ	Otillräcklig information	1,140
Kävlinge NSP HJ	Otillräcklig information	1,059
Kävlinge USP HJ	Kraftigt förskjuten höger	1,211
Lappberg HJ	Jämt fördelad	1,012
Nol NSP HJ	Lätt förskjuten höger	1,077
Nol USP HJ	Otillräcklig information	1,002
Sunderbyns Sjukhus HJ	Jämt fördelad	0,989





Bilaga C – Kvasistatiska beräkningar

φ_s = rälsförhöjningsvinkel

h_a = rälsförhöjning

b_0 = halva spårvidden

h_{tp} = tyngdpunktens läge i vertikalled

$R_{1,y}$ = reaktionskraft i y – led

$R_{2,y}$ = reaktionskraft i y – led

k = kurvatur

v = hastighet

$$b_0 = 0,750 \text{ m}$$

Enligt Andersson och Berg (2007)

$$\varphi_s = \arcsin\left(\frac{h_a}{2 \times b_0}\right)$$

ekvation (2-5) i Andersson och Berg (2007)

För jämvikt i vertikalled:

$$m g \times \cos(\varphi_s) = R_{1,y} + R_{2,y}$$

$$\Rightarrow R_{2,y} = m g \times \cos(\varphi_s) - R_{1,y}$$

Momentjämvikt kring punkt 1:

$$2 \times b_0 \times R_{1,y} - m g \times \cos(\varphi_s) \times b_0 + m g \times h_{tp} \times \sin(\varphi_s) - \frac{m \times v^2 \times b_0}{r} \times \sin(\varphi_s) - \frac{m \times v^2 \times h_{tp}}{r} \times \cos(\varphi_s) = 0$$

$$\Rightarrow R_{1,y} = \frac{m g \times \cos(\varphi_s) \times b_0 - m g \times h_{tp} \times \sin(\varphi_s) + \frac{m \times v^2 \times b_0}{r} \times \sin(\varphi_s) + \frac{m \times v^2 \times h_{tp}}{r} \times \cos(\varphi_s)}{2 \times b_0}$$

För detektorpositionen vid Björnkulla gavs data från Trafikverkets program Optram:

$$h_a = 65 \text{ mm}$$

$$k = 2,78 \times 10^{-4}$$

$$r = \frac{1}{k} = \frac{1}{2,78 \times 10^{-4}} = 3600 \text{ m}$$

(Massan har antagits till $m = 16 \times 10^3$ (axellast))

$$h_{tp} = 1,5 \text{ m}$$

Konsekvent antagande om tyngdpunkten höjdläge

Kvoten ges då av:

$$kvot = \frac{R_{1,y}}{R_{2,y}}$$

Balanserad hastighet

$$V_{bal} = \sqrt{\frac{g \times \sin(\varphi_s) \times r}{\cos(\varphi_s)}}$$

Bilaga D – Mätvärden för en X2-drivenhet

Passage 1

Detektorplats: Björnkulla USP HJ

Tågid: 546

Detektortyp: Hjulskadetektor SCHENCK

Riktning: Jämn

Tidpunkt: 2012-05-05 21:46:40

Hastighet(km/h): 202

Opera Fordons Nr	Axel i fordon	Mean Vänster	Mean Höger
X2K2038	1	73	103
X2K2038	2	83	97
X2K2038	3	75	103
X2K2038	4	80	105

Passage 2

Detektorplats: Björnkulla USP HJ

Tågid: 546

Detektortyp: Hjulskadetektor SCHENCK

Riktning: Jämn

Tidpunkt: 2012-05-04 21:29:14

Hastighet(km/h): 205

Opera Fordons Nr	Axel i fordon	Mean Vänster	Mean Höger
X2K2038	1	74	104
X2K2038	2	82	97
X2K2038	3	75	102
X2K2038	4	78	106

Passage 3

Detektorplats: Björnkulla USP HJ

Tågid: 546

Detektortyp: Hjulskadetektor SCHENCK

Riktning: Jämn

Tidpunkt: 2012-05-03 22:08:10

Hastighet(km/h): 203

Opera Fordons Nr	Axel i fordon	Mean Vänster	Mean Höger
X2K2038	1	77	104
X2K2038	2	80	100
X2K2038	3	76	102
X2K2038	4	83	100

Bilaga E - Gränsvärden

Förslag under utredning av Green Cargo		Underhållsgränser	Stoppgräns
Peak		320 kN	350 kN
Ratio		5	7
Dynamiskt tillskott		200 kN	

Larmgränser från 1 juni 2013	Lågnivåalarm	Högnivåalarm	Varning
Peak (vagn)		350 kN	320 kN
Peak (drivfordon)	350 kN	425 kN	320 kN
Peak ("okänt")		350 kN	320 kN
Ratio (vagn)			5
Ratio (drivfordon)			3,7
Ratio ("okänt")			3,7
Dynamiskt tillskott (vagn)			200 kN
Dynamiskt tillskott (drivfordon)			220 kN
Dynamiskt tillskott ("okänt")			200 kN

Malmbanan	Lågnivåalarm	Högnivåalarm	Varning
Peak (personvagnar)	320 kN	350 kN	
Peak (godsvagnar)	320 kN	350 kN	
Peak (lok)	360 kN	425 kN	
Ratio (personvagnar)			4,2
Ratio (godsvagnar)			4,2
Ratio (lok)			3,7
Dynamiskt tillskott (personvagnar)			155 kN
Dynamiskt tillskott (godsvagnar)			160 kN
Dynamiskt tillskott (lok)			240 kN

Nuvarande larmgränser			Högnivåalarm
Peak (personvagn)			400 kN
Peak (godsvagn)			400 kN
Peak (lok)			425 kN

Bilaga F – Antal mätningar

Detektorplats:	Antal mätningar:
Anneberg NSP	105374
Björnkulla USP	541330
Dammstorp NSP	111174
Dammstorp USP	108858
Degerbäcken	38638
Hållsta	53872
Harrträsk	29046
Hunstugan	289724
Jörn	39892
Kävlinge ESP	360
Kävlinge NSP	1412
Kävlinge USP	3492
Krokvik	13316
Kumla NSP	72288
Kumla USP	42302
Lappberg	1216
NoI NSP	41342
NoI USP	35958
Sunderbyns sjukhus	65200

