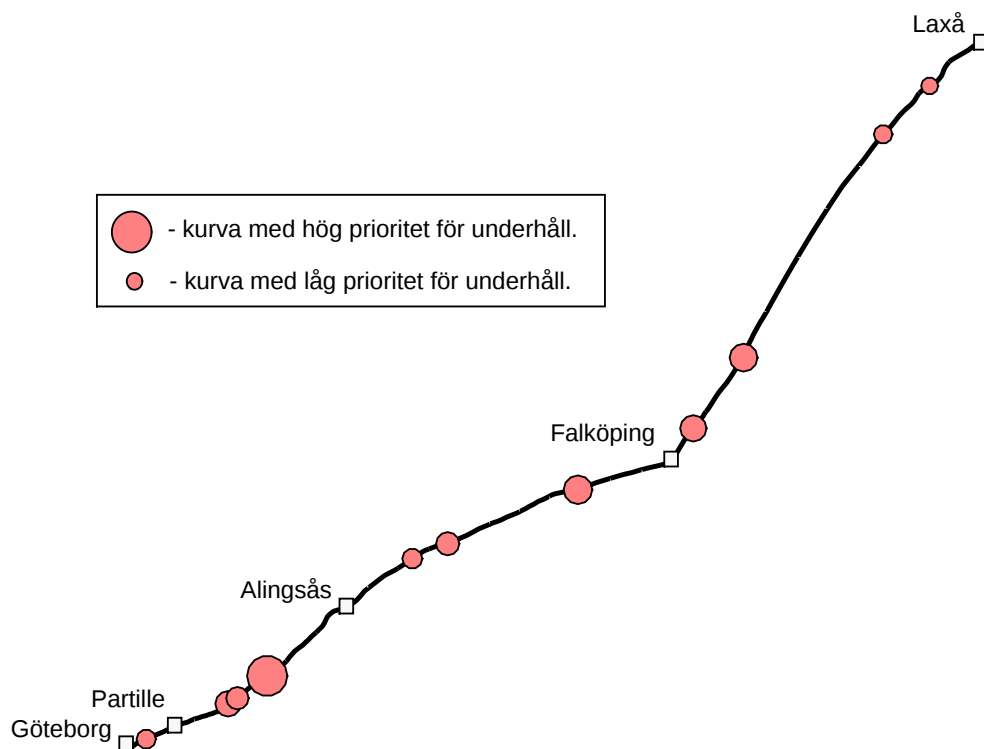




CHALMERS



Nedbrytningsmått för järnvägshjul och räl

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

KARL-JOHAN BENGTTSSON
ERIK KVARNSTRÖM
CARL MÖLLER
OSCAR SUNDLO

KANDIDATARBETE I TILLÄMPAD MEKANIK

Nedbrytningsmått för järnvägshjul och räl

KARL-JOHAN BENGTTSSON
ERIK KVARNSTRÖM
CARL MÖLLER
OSCAR SUNDLO

Institutionen för tillämpad mekanik
Avdelning för Dynamik/CHARMEC
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2015

Nedbrytningsmått för järnvägshjul och räl
KARL-JOHAN BENGTTSSON
ERIK KVARNSTRÖM
CARL MÖLLER
OSCAR SUNDLO

© KARL-JOHAN BENGTTSSON , ERIK KVARNSTRÖM , CARL MÖLLER , OSCAR SUNDLO, 2015

Kandidatarbete 2015:03
ISSN 1654-4676
Institutionen för tillämpad mekanik
Avdelning för Dynamik/CHARMEC
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31-772 1000

Omslag:
Ett urval av kurvor mellan Göteborg och Laxå som rangordnats med avseende på nedbrytning.

Chalmers Reproservice
Göteborg, Sverige 2015

Nedbrytningsmått för järnväghjul och räl
Kandidatarbete i Tillämpad mekanik
KARL-JOHAN BENGTSSON
ERIK KVARNSTRÖM
CARL MÖLLER
OSCAR SUNDLO
Institutionen för tillämpad mekanik
Avdelning för Dynamik/CHARMEC
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Förseningar i järnvägstrafik medför stora samhällskostnader. Därför är ett väl fungerande underhåll av järnvägsnätet av stor betydelse. Planering av underhållsarbete är en invecklad process då många underhållsåtgärder är mycket kostnads- och tidskrävande och det är svårt att prediktera slitage av hjul och räl. Mätningar görs kontinuerligt för att analysera rälens och hjulens skick, men tolkning av mätdata för att prediktera hur profilerna inverkar på risken för framtida nötning och sprickbildning görs idag normalt inte.

Denna studie syftar till att ta använda en nyligen framtagna modell för att kunna prognostisera nedbrytning av järnvägs-hjul och räl utgående från uppmätta geometriska data. Analysen bygger på att hjul- och räl-profiler parametreras och därefter kvalitetsklassificeras med hjälp av två skadeindex från litteraturen. Utöver dessa index har även ett nytt skade-index utvecklats i projektet. Detta index viktar samman påverkan med avseende på nötning och sprickbildning för att därigenom kunna ge en övergripande kvantifiering av statusen hos en räl eller ett hjul.

Den utförda studien innefattar uppmätta rälprofiler från Västra Stambanan, samt uppmätta hjulprofiler. Studien är indelad i två avsnitt, en för analys av hjul och en för analys av spåravsnitt.

Studien visar att skillnader i geometri mellan de olika hjulprofilerna tydligt reflekteras i skadeindexen. En negativ förändringen av profilgeometrin för hjulen leder till en minskad kontaktarea mellan hjul och räl, vilket i sin tur resulterar i ett ökat kontaktryck. Detta bidrar tillsammans med ökad krypning i kontaktarean mellan räl och hjul till accelererad skada. Dessa effekter kvantifieras av de använda skademåten.

Utöver inverkan av hjulprofilen visas även hur den predikterade nedbrytningen av hjulen även ökar med en minskad kurvradie.

Vid analysen av status hos olika bansektioner sorterades bansträckningens samtliga kurvor i radieintervallet 400–1250 meter efter utvärderade skadeindex. Kurvornas inbördes rangordning ger en tydlig indikation på vilka kurvor som framkallar den största nedbrytningen och därigenom bör prioriteras i underhållsplaneringen.

Liksom för hjulen finns en tydlig inverkan av en minskad kurvradie. Utöver detta har dock även den slitna profilen visat sig ha en stor inverkan.

ABSTRACT

Background

Unplanned disturbances in railway traffic cause large societal costs. Efficient maintenance of the railway network is of great significance in reducing these. To aid in the planning of required maintenance, regular measurements of wheel and rail profiles can be employed. Such an approach is however complicated by the lack of accurate and readily available tools to classify the status of wheels and rails in relation to their impact on further deterioration based on measured profile geometries. In short: There is a lack of knowledge and methods to state whether a measured profile is “good” or “bad” with respect to future deterioration.

Purpose

One of the main aims of this study is to employ a model that forecasts the degradation of railway wheels and rails to quantify the status of measured wheel and rail profiles. This model is intended as a tool to support an effective decision-making in maintenance planning with the aim of providing a more time- and cost effective railway maintenance.

Method

Measured rail and wheel profile geometries have been parameterised, after which wear- and rolling contact fatigue (RCF) indices have been estimated from the geometry by the use of so-called meta-models. The results have been used to classify wheels and rail profiles based on how severe deterioration they are predicted to cause. A new damage index, denoted SKBM, has been developed. This index combines the influence on deterioration due to both wear and rolling contact fatigue.

Evaluated wear, fatigue and SKMB indices are employed to measured operational wheel and rail profile geometries to rank these based on their proneness to induce further damage.

Research questions

- How do wheel and rail profile geometries impact on predicted degradation of wheel and rail?
- How should rail maintenance be prioritized based on measured rail profiles?
- Do a few wheel profiles and railway sections stand for the major part of the total degradation?

Results

The study shows clear tendencies to geometry differences for the wheel profiles which are reflected in high deviations in evaluated damage indices. The change of the geometry of wheel profiles causes a reduced contact area between wheel and rail, which in turn results in an increased contact pressure. Predicted wheel wear showed trends of increasing with a decreased radius of curvature.

A study of curves in the radius range 400–1250 meters also showed a clear correlation between a decreased radius of curvature and a higher magnitude of evaluated damage indices. Ranking of curves based on evaluated damage indices has been employed to identify the most severe rail sections. Such a ranking can then be employed to prioritize maintenance. This constitutes a suggested approach for future planning of rail grinding work.

Conclusions

Wear of rails and wheels is dependent on curve radius where a small radius generates an increase in wear.

By employing the method of parameterising wheel and rail profiles and analysing wear and fatigue indices from these profiles a quality ranking can be made.

In such a manner “good” and “bad” wheel profiles with respect to wear can be identified. Regarding RCF the case is more complicated since the ranking of the wheel will depend on which curve that is operated.

To better quantify the combined impact on wear and RCF, a combined index – denoted SKBM – was developed.

The employed method provides a good ranking of curves and wheels based on the severeness of their worn profiles. It also indicates whether a wheel or a curve is likely to contain damage in the form of severe wear and/or cracks.

With further research and by taking additional operational data of rail and wheels into consideration, SKBM could be a possible tool in predicting of rail and wheel damage in terms of combinations of wear and RCF.

FÖRORD

Följande rapport är ett kandidatarbete skrivet av fyra studenter i årskurs tre på maskinteknikprogrammet vid Chalmers tekniska högskola. Det har varit oerhört intressant att under våren 2015 få fördjupa sig i nedbrytning av räl och hjul, ett område som ingen av oss hade förkunskaper i.

Vi vill rikta ett stort tack till Kalle Karttunen, vår handledare som under våren ständigt varit tillgänglig för frågor och synpunkter. Ett stort tack till Anders Ekberg och Elena Kabo som hjälpt oss med expertis, feedback och alltid varit uppmuntrande.

Dessutom tack till Carl-Åke Karlsson på Trafikverket som tog sig tid för ett personligt möte och för att ha uppdaterat oss på hur verkligheten ser ut.

TERMINOLOGI

BIS – Trafikverkets datasystem för att lagra och hämta information om banrelaterade anläggningar och händelser (se <http://www.trafikverket.se/Foretag/Bygga-och-underhalla/Jarnvag/System-verktyg-och-tjanster-for-jarnvagsjobb/BIS---Baninformation/>).

FI – Fatigue Index. Ett utmattningsmått som ger en indikation på risken för sprickbildning.

Farbana – Se figur nedan.

Farkant – Se figur nedan.

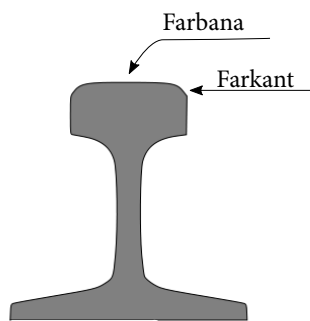
Optram – Trafikverkets system för att studera och analysera periodiska mätningar på spår och kontaktledning (se <http://www.trafikverket.se/optram>).

RCF – *Rolling contact fatigue*, rullkontaktutmattning.

Räl – Skena som ett spårfordon åker på.

Spårvidd – avstånd mellan de två rälerna, mätt mellan rälshuvudenas innerkanter 14 mm under överkanten.

$T\gamma$ – Nötningsindex som relaterar till den kontaktenergi som uppstår i kontaktytan mellan hjul och räl.



INNEHÅLL

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Förord	v
Terminologi	vii
Innehåll	ix
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Problemformulering	1
1.4 Avgränsningar	2
2 Teoretisk bakgrund	3
2.1 Skadetyper för räl	3
2.2 Skadetyper för hjul	4
2.3 Underhåll av räl	5
2.3.1 Underhållsplanering	5
2.3.2 Bedömning av livslängd	6
2.3.3 Spårslipning	6
2.4 Underhåll av hjul	7
2.5 Nötning	7
2.6 Rullkontaktutmattning	7
2.7 Metamodeller	8
2.8 Skadefunktioner	9
3 Metod	12
3.1 Litteraturstudie	12
3.2 Tolkning av data och tillämpning av nedbrytningsmodeller	12

3.3	Nedbrytningsanalys av hjul	12
3.4	Nedbrytningsanalys av räl	12
4	Resultat	13
4.1	Nedbrytningsanalys av hjul	13
4.1.1	Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden	13
4.1.2	Inverkan av hjulprofilens geometri	14
4.1.3	Skademåttet SKBM	16
4.2	Nedbrytningsanalys av räl	18
4.2.1	Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden	18
4.2.2	Rangordning av kurvor	19
4.2.3	Korrelation mellan utvalda variabler och rangordning av kurvor	20
5	Diskussion	23
5.1	Nedbrytningsanalys av hjul	23
5.1.1	Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden	23
5.1.2	Inverkan av hjulprofilens geometri	23
5.1.3	Skademåttet SKBM	24
5.2	Nedbrytningsanalys av räl	25
5.2.1	Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden	25
5.2.2	Rangordning av kurvor	25
5.2.3	Korrelation mellan utvalda variabler och rangordning av kurvor	25
6	Slutsatser och rekommendationer	27
	Litteraturförteckning	28
	Bilagor	30
	Bilaga A Korrelation mellan $T\gamma$ och FI mot kurvradie för utvalda hjul	31
	Bilaga B $T\gamma$ och FI för bansträckningen	34
	Bilaga C Rangordning av kurvor baserad på SKBM, FI och $T\gamma$ magnituder	35

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Järnvägen är ett av de viktigaste transportmedlen för både gods- och persontrafik. Investeringar i den svenska järnvägen har det senaste decenniet utgjort 3 % av landets BNP vilket tyder på dess fundamentala betydelse för det svenska samhället [3]. Till sitt förhållandevis lilla utrymmesbehov är kapaciteten och säkerheten hög, att transporteras med tåg är ungefär 50–100 gånger säkrare än att åka bil [6]. Då järnvägens miljöpåverkan är låg i förhållande till dess transportkapacitet [1] ses järnvägen som en naturlig del i den framtida infrastrukturen och en del av ett mer hållbart samhälle. Hållbarhetsfrågan växer sig allt starkare i dagens samhälle och från olika länders beslutsfattare ställs allt fler krav om regleringar för att minska globala klimatförändringar. Samtidigt blir behovet av att snabbt och effektivt kunna transportera personer och gods allt viktigare.

För att järnvägen även i framtiden skall behålla sin starka position inom infrastrukturen är det viktigt att tillsyn och underhåll fungerar på ett kostnadseffektivt sätt. År 2013 utförde Trafikverket underhållsåtgärder för sammanlagt 3,8 miljarder kronor och av detta utgjorde 36 % underhåll av spår och spårväxlar [19]. Akuta underhållsarbeten medför stopp och förseningar i järnvägstrafiken vilket i sin tur leder till stora samhällskostnader, år 2010 beräknades samhällskostnaderna för förseningar i tågtrafiken till 5,1 miljarder kronor [2]. De stora kostnaderna anses generellt vara orsakade av underhållsskuld i det svenska järnvägsnätet, det vill säga att underhållet inte har hållit jämn takt med nedbrytningen.

En av anledningarna till höga underhållskostnaderna är att underhållsoperationer ofta är stora och tidskrävande. De kräver dessutom planering och lång framförhållning, oftast minst ett år i förväg på sträckor med hög trafikbelastning. Planeringen av underhållsarbetet försvåras av de komplexa bakomliggande nedbrytningsmekanismerna för räl och hjul. I dagsläget baseras underhållsarbetet främst på prognoser utgående från transportarbete, resultat av oförstörande provning, samt mätningar av spårslitage. Därutöver utförs manuella observationer för att klassificera typen av skada, rälsitage och/eller sprickbildning¹. Underhållsåtgärder planeras då tågtidtabeller ger utrymme för underhåll. Rälsfelen kategoriseras utefter feltyp, felens storlek och trafikbelastning. Kategorierna ger tumregler för hur kritisk rälen är och inom vilken tidsram underhållsåtgärder krävs [8]. Det saknas därmed en robust och objektiv modell för hur slitaget kan prognostiseras och hur kritiska bansträckningar kan identifieras på förhand.

Det ligger i Trafikverkets intresse att kunna prediktera nedbrytning av hjul och räl för att därigenom kunna planera och utföra underhållsarbete på ett kostnads- och tidseffektivare sätt². Samtidigt finns ett stort allmänintresse från samhället att kunna nyttja en järnväg med mindre förseningar och oplanerade stopp. Att optimera underhållsarbetet och därigenom minimera dess kostnader är således av intresse för både Trafikverket och andra aktörer som använder järnvägen.

1.2 Syfte

Studien syftar på att applicera en modell för att kunna prognostisera hur uppmätta hjul och rälsprofiler påverkar nedbrytning av järnvägshjul och räl. Denna modell ska kunna användas som ett verktyg för att utveckla ett effektivare beslutsunderlag vid underhållsplanering. Detta skulle i sin tur vara en god grund för ett mer tids- och kostnadseffektivt underhållsarbete.

1.3 Problemformulering

Studiens huvudsakliga fokus är att utforska en metod att prioritera underhållsåtgärder för bansträckningen utifrån olika samband mellan nedbrytningsmått, spårgeometri och profilgeometri. Utöver detta undersöks hur skador på räl för en

¹ Personlig kommunikation med Carl-Åke Karlsson

² Personlig kommunikation med Carl-Åke Karlsson

given bansträckning korrelerar mot olika geometriparametrar för bansträckningen. Den genomförda prioriteringen av underhållsåtgärder är tänkt att ligga till grund för att finna optimala åtgärder för den givna bansträckningen.

Följande frågeställningar är aktuella:

- Hur inverkar hjulens och bansträckningens geometri på predikterad nedbrytning av hjul och räl?
- Hur bör underhåll av räl och hjul prioriteras med hänsyn tagen till uppmätt profilgeometri och beräknade nedbrytningsmått?
- Står vissa enskilda hjul- och rälprofiler för den största delen av nedbrytningen?

1.4 Avgränsningar

Förutsättningarna för kandidatarbetet är att fyra studenter under 20 veckors tid av halvtidsstudier ska utvärdera samband mellan geometristatistik över hjul- och rälprofiler samt nedbrytningsmått. Fokus inom studien kommer dels att ligga på att undersöka viktiga samband mellan faktorer som påverkar nedbrytningen och dels undersöka hur underhållsåtgärder kan optimeras. De faktorer och parametrar som kommer analyseras och användas är de som ingår i data från Infranords uppmätningar av rälsitage och spårläge. Underhållsåtgärder som skall optimeras fokuseras på åtgärder som är tillgängliga i dagsläget, spårriktning, rälslipning och hjulsvarvning.

Att hitta och säkerställa samband kräver stora mängder data. Analysen bör sedan ge liktydiga resultat oavsett bansträckning. Data för räl är hämtade från Infranords fältmätningar och gäller för sträckan Laxå–Göteborg. Studien avgränsas således till denna sträcka samt hjulprofilgeometrier för 120 uppmätta hjul [15]. Trots att hjulpopulationen var ospecificerad kan datan antas vara representativ enligt Pålsson [15]. Metamodellerna som används för att räkna fram skademåtten i studien är approximativa och gäller enbart för farkanten på rälen. I studien kommer metamodellerna antas inneha hög reliabilitet, varför endast dessa används för att analysera slitage [10].

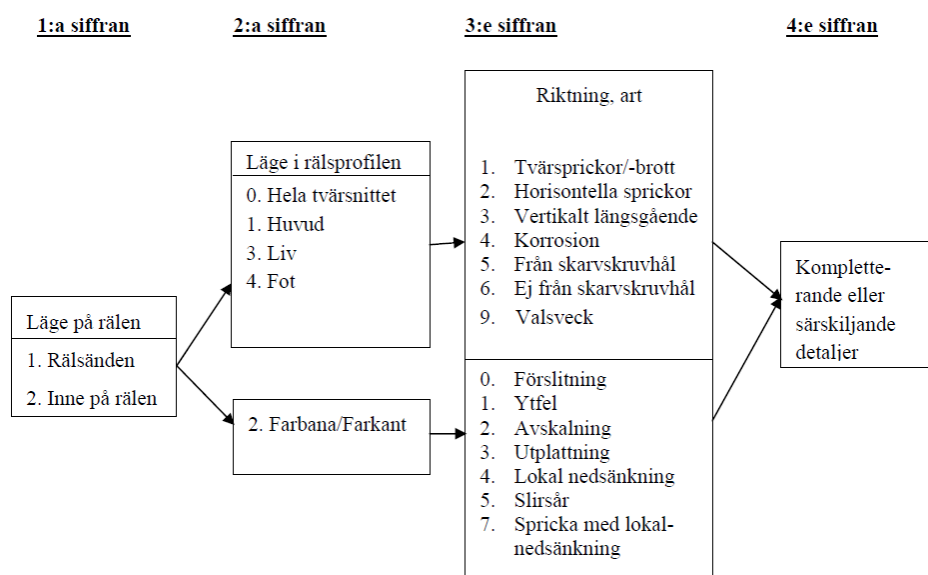
2 Teoretisk bakgrund

I detta avsnitt undersöks de vanligaste skadetyperna för räl och hjul samt Trafikverkets nuvarande arbetsmetod för att detektera, klassificera, underhålla samt förebygga skador. Genom denna undersökning och nulägesanalys ges en stabil grund för fortsatt analys och utveckling.

Detta följs sedan av bakomliggande teori för nedbrytning av räl och hjul, samt hur man med hjälp av metamodeller kan relatera uppmätta hjul- och rälfprofilgeometrier till risken för att dessa skador uppkommer.

2.1 Skadetyper för räl

Ett stort antal olika rälsfel kan uppstå på grund av olika anledningar [8]. Rälsfelen grupperas enligt: *brustna räler*, *räler med sprickor* och *skadade räler*, där ett flertal olika rälsfel finns inom samtliga grupper. Åtgärder för att rätta till upptäckta fel delas in i fyra kategorier beroende på hur akut åtgärdsbehovet är. Om rälsfelet bedöms leda till uppenbar fara för trafiken skall åtgärder genomföras omedelbart och lämpliga trafikbegränsningar införas. Detta klassas som ett *Akut fel*. Om skadan är lindrig kan rälen endast vara i behov av extra observation, dessa skador klassas som *Grupp 2*. Däremellan finns klasserna *Grupp 1a* och *Grupp 1b* där felen ska avlägsnas, men inte nödvändigtvis brådslande. Rälsfelen klassificeras hos Trafikverket enligt figur 2.1 med index som innehåller information om läge på rälen, läge i rälsprofilen, art och övriga detaljer. Klassificering enligt detta schema underlättar en precis felbestämning och val av åtgärder.



Figur 2.1: Schema för klassificering av rälsfel i Sverige [8].

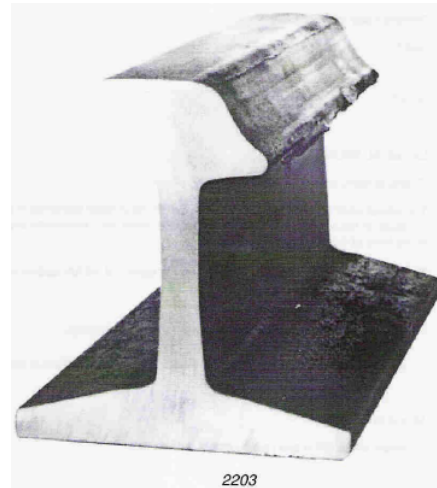
Farkantssprickor förekommer normalt endast på ytterrälen, främst i kurvor med måttliga till stora kurvradier, och kan uppkomma när ackumulerad deformation i kontaktytan överstiger rälmaterialets brottöjning. I figure 2.2 visas hur farkantssprickor uppstår på rälen, sprickorna är i bilden mycket små men är markerade med fetstilta streck i figuren. Skadan uppkommer normalt i grupper om flera små parallella sprickor, med inbördes avstånd mellan en millimeter till flera centimeter. De kan i värsta fall leda till en brusten räl. Sprickorna upptäcks genom ultraljudskontroller eller okulära undersökningar. När sprickorna uppkommer behöver de ofta slipas bort. Farkantssprickor kan även försvinna naturligt, om trafiken nöter ner rälen i snabbare utsträckning än sprickorna bildas. Detta sker främst i skarpa kurvor [16].

Sidoslitage uppstår på ytterrälen i kurvor, se figur 2.3. Om sidoslitaget kräver extra spårunderhåll och/eller kan befaras orsaka ett rälsbrott anses det vara ett rälsfel. Felbestämning sker okulärt eller genom mätning av sidoslitage och tvärprofil med hjälp av mätvagnar. Följande åtgärder utförs:

- Då sidoslitage ökar sker mer regelbundna kontroller och mätningar av slitage.
- Försliten räl byts ut i samband med banunderhåll.
- Vid brott byts rälerna omedelbart.



Figur 2.2: Farkantssprickor (Foto: Anders Ekberg).



Figur 2.3: Rälsfel 2203, stort sidoslitage [8].

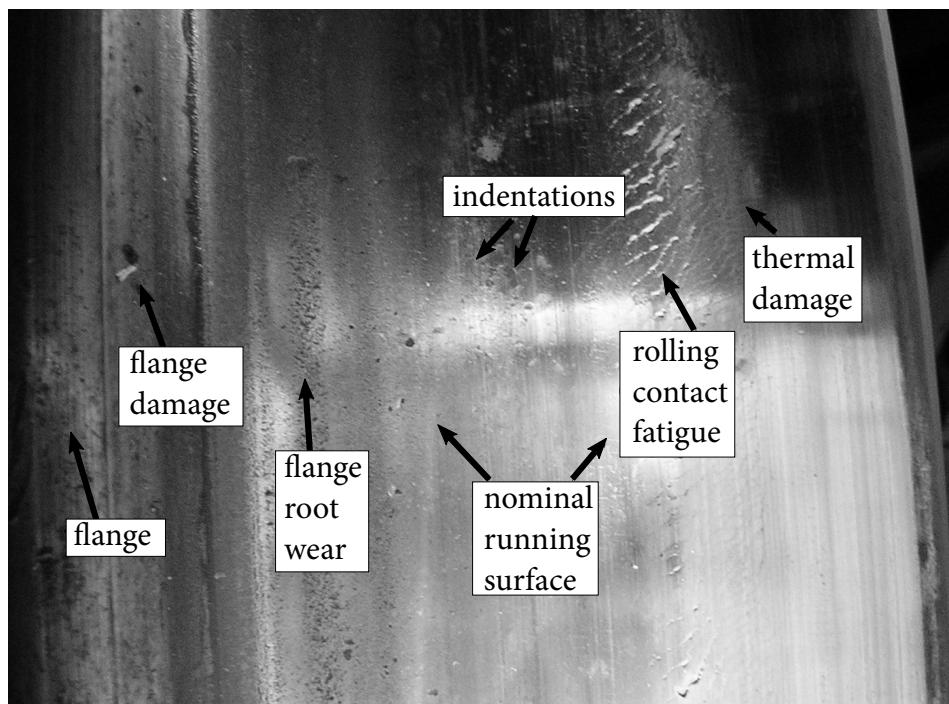
2.2 Skadetyper för hjul

Nötning hos hjul kan delas in i löpbanenötning och flänsnötning [5]. Orsaken till nötning är friktionskrafter och glidning mellan löpbanan på hjulet och farbanan på rälerna. Bromsning och kurvtagning ökar nötningen. Specifikt ger små kurvradier och dåligt styrande fordon hög nötning.

Krossår är ytterligare en vanlig skadetyper hos hjul vilken yttrar sig som gropar och materialbortfall i hjulens löpbana. Orsaker till denna typ av skada är sprickbildning av den cykliska belastning som hjulen utsätts för.

När hjulskador uppstår försämras normalt hjulprofilernas geometri. Detta gör att spänningsfördelningen blir ogynnsam eller att fordonsdynamiken påverkas. Hjulskador som upptäcks vid inspektion och anses kunna orsaka förvärrade skador och/eller inverka på säkerheten åtgärdas genom omsvarvning eller kassering.

I figur 2.4 ges exempel på olika hjulskador. Hjulet är i figuren sett ovanifrån och längst till vänster är flänsen, "nominal running surface" avser farbanan. De två viktigaste skadorna i studien är nötning och rullkontaktutmattning vilka motsvarar "flange root wear" respektive "rolling contact fatigue".



Figur 2.4: Exempel på olika hjulskador (Foto: Anders Ekberg)

2.3 Underhåll av räl

2.3.1 Underhållsplanering

Trafikverket strävar efter ett förbättrat underhåll som leder till en sund hushållning av resurser och att transportförsörjningen i stort kan säkerställas [18]. Akuta fel kan kräva omledning av trafiken och leda till stora störningar som i sin tur skapar stora samhällskostnader. Dessvärre är underhållet av järnvägen i Sverige historiskt sett undermåligt. Vilket till exempel lett till att 16 % av den svenska järnvägens tekniska tillstånd enligt Trafikverket klassificeras som oacceptabelt [18]. Detta beror delvis på svårigheten av en effektiv underhållsplanering och dels på höga underhållskostnader [18]. Vidare ser framtidsutsikterna för järnvägen mörk ut. Mellan 2014 och 2024 beräknas de spår i Sverige som passerat sin tekniska livslängd och behöver bytas ut öka från 3 % (400 km spår) till knappt 16 % (1900 km spår) [18].

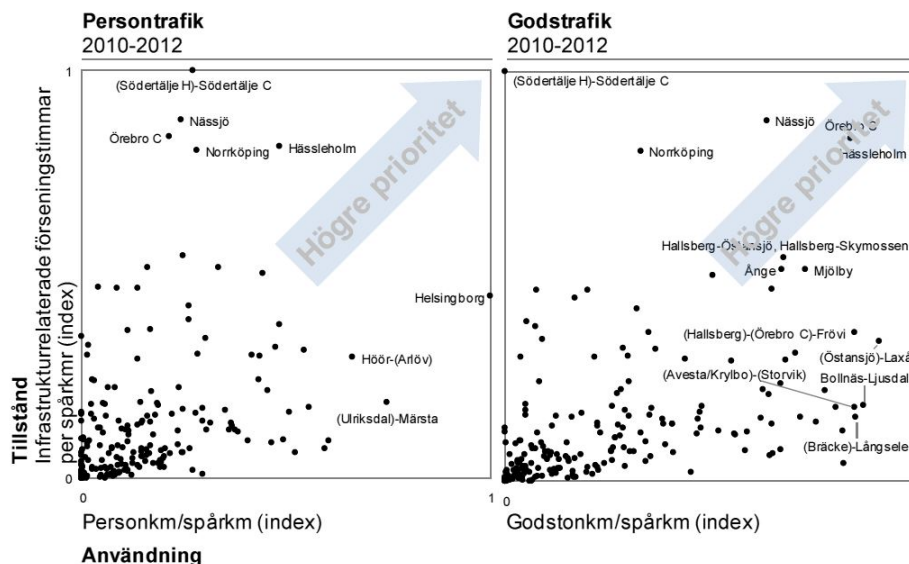
Svårigheterna kring underhållsplaneringen grundar sig i att många faktorer som spelar in. Dessutom saknas önskvärda objektiva mått som korrelerar till dessa faktorer. Ett exempel är måttet på sambandet mellan rälets tekniska tillstånd och tågförseningar [18]. Underhållsplaneringen i dagsläget består därför av en sammanvägning av ålder och trafikintensitet tillsammans med subjektiva expertutlåtanden. Detta blir osäkert över tid och därför genomförs en teknisk-ekonomisk revision av planeringen där experter besiktar bandelar för att identifiera brister och bedöma åtgärdsbehov. Sedan utvärderas kostnader och effekter utifrån insamlad data och prioriteringar fastställs. Vid prioriteringarna tas hänsyn till anläggningsrelaterade förseningar tre år tillbaka i tiden.

Prioriteringsfasen är en viktig del av underhållsplaneringen [18] och sker enligt den grundläggande principen att nyttan kontra kostnaden ska vara så stor som möjligt. Prioriteringsfasen föregås av att underlag tas fram. Där delas järnvägsnätet upp och beskrivs utifrån en rad antal faktorer så som konstruktion och geometrisk utformning, trafikintensitet, ålder, säkerhet och komfort vid användande. De får sedan en tillståndsbeskrivning enligt klasserna: "Bra", "Acceptabelt" och "Dåligt". En sådan komplett tillståndsbeskrivning för det svenska järnvägsnätet saknas i dagsläget fortfarande [18].

Med det ovanstående som bakgrund har Trafikverket tagit fram en metod för prioriteringar av bandelar för teknisk-ekonomisk revision [18]. Det första steget i prioriteringen är att välja ut bandelar där behovet av underhåll är som mest

akut. Detta sker genom att jämföra infrastrukturrelaterade förseningstimmar per spårkilometer (järnvägens aktuella tillstånd) med transportarbete per spårkilometer för gods- och persontransporter (användning). Se figur 2.5.

Metod för prioritering av bandelar för teknisk-ekonomisk revision



Figur 2.5: Ett exempel på hur man prioriterar bandelar för teknisk-ekonomisk revision hos Trafikverket [18].

De prioriterade åtgärder som skall genomföras avgörs i den teknisk—ekonomiska revisionen och baseras på vilka leverans-kvaliteter åtgärden medför [18]. Innan revisionen är gjord gör man vissa prioriteringar i den ursprungliga åtgärdsplanen baserade på expertutlåtanden. Den ursprungliga planen kan revideras under tidens gång om det skulle uppkomma säkerhetsrisker på grund av slitage. Övriga faktorer som påverkar valet av prioriteringar är spridningseffekter, lågtrafikerade kritiska områden, bulleråtgärder och övergripande analyser med avseende på trafikslag. Slutligen samordnas alla prioriterade åtgärder, inklusive åtgärder för väg, för att undersöka om några positiva synergieffekter kan uppnås. Är detta fallet kan åtgärdsplanen ändras ytterligare. Sammanfattningsvis finns stor potential för effektivisering då många beslut bygger på bedömningar och inte på objektiv analys av data.

2.3.2 Bedömning av livslängd

Återstående livslängd för räl bedöms dels utifrån rälfelsstatistik och dels utifrån ultraljudskontroller som genomförs. Ultraljudskontrollerna utförs genom att ett mätfordon färdas på rälen och sänder ut ultraljud, för att sedan notera reflektionerna. Utifrån reflektionerna kan man sedan upptäcka sprickbildningar i rälen och grovt uppskatta sprickans storlek.

2.3.3 Spårslipning

Spårslipning används främst för att underhålla rälen vid uppkomst av sprickor, vågor och räfflor. När sprickor bildas kan man genom spårslipning slipa bort dessa. Sprickor kan, främst i kurvor med små radier, notas bort på grund av trafikerings. Spårslipningen ger fördelen att man blir av med sprickor, men samtidigt kan den ses som en artificiell nötning av rälen. Ju större sprickbildning, desto mer måste man slipa rälen och desto oftare måste man lägga helt ny räl [20].

2.4 Underhåll av hjul

Underhåll av hjul sker vanligtvis genom omsvarvning. Skador i form av sprickbildning, krossår och avvikande geometri på grund av nötning svarvas ner tills skadorna inte längre kan urskiljas. På detta sätt kan hjulens totala livslängd förlängas genom att svarva till en profil med så optimal profil som möjligt. Omsvarvning sker även när ett hjulpar påvisar stora skillnader i hjuldiameter inom en axel eller inom en boggi för att se till att tågets styrförmåga behålls [1].

2.5 Nötning

I kontaktytan mellan hjul och räl verkar normalkrafter samt friktionskrafter vilka i kombination med den glidning som sker längs och tvärs rälens ger upphov till materialnötning. Allmänt gäller att ju större friktionskraft mellan hjul och räl desto snabbare kommer nedbrytningen att ske. Kontaktytan mellan hjul och räl brukar antas till ungefär en 1 cm^2 men kan variera beroende på var kontakten sker på rälhuvudet [13]. Kontaktytans storlek och position varierar även beroende på hjulens och rälens geometri, men är idealt placerad på farbanan.

För att kunna kvantifiera nedbrytningen har ett mått kallat $T\gamma$ tagits fram. Detta mått beräknas genom att multiplicera friktionskrafterna med kryptet, vilket i princip motsvarar en relativ materialförskjutning mellan hjul och räl. Storleken på $T\gamma$ sett i förhållande till kontaktarean A kan användas för att kategorisera nedbrytningshastigheten [14]:

- Mild nötning, $0 < \frac{T\gamma}{A} \leq 15 \quad [\text{N/mm}^2]$.
- Svår nötning, $15 < \frac{T\gamma}{A} \leq 75 \quad [\text{N/mm}^2]$.
- Katastrofal nötning, $75 < \frac{T\gamma}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$.

Genom metamodeller kan $T\gamma$ approximeras enbart utifrån hjul eller rälgeometri [10], dessa modeller redogörs för i avsnitt 2.7.

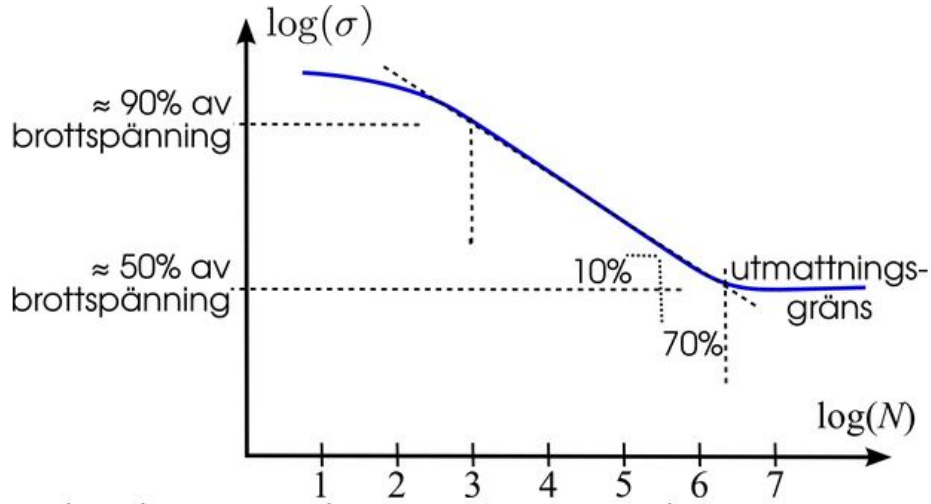
2.6 Rullkontaktutmattning

Rullkontaktutmattning (eng. rolling contact fatigue) kan beroende på avståndet från ytan kategoriseras som [7]:

- Ytinitierad rullkontaktutmattning (Surface-initiated rolling contact fatigue).
- Rullkontaktutmattning initierad under ytan (Subsurface-initiated rolling contact fatigue).

Ytinitierad utmattning beror bland annat på ackumulerad plastisk deformation av materialet som när dess duktilitet överskrids bildar en spricka. Materialets livslängd minskar generellt kraftigt med belastningsnivån, se figur 2.6. Fenomenet med sprickbildning kan delas in i följande fyra faser:

- Sprickinitiering
- Sprickpropagering
- Spricktillväxt
- Brott



Figur 2.6: Samband mellan pålagd spänning och livslängd illustrerad i form av en Wöhlerkurva [6].

I denna studie behandlas enbart ytinitierad rullkontaktutmattning vilken analyseras med hjälp av så kallat fatigue index, FI [7] som kvantifierar belastning med avseende på risken för sprickbildning. En förenklad beräkning av denna baserad på så kallade metamodeller används [10].

2.7 Metamodeller

Eftersom parametrarna som styr nivån på $T\gamma$ och FI är många och komplexa krävs modeller för att approximera dessa. Ofta baseras dessa på dynamiska simuleringar som ofta är tids- och resurskrävande [11]. De modeller som tagits fram av Karttunen [10] baseras istället på parametrering av farkantens och flänsrotens geometrier [10]. Geometrierna är approximerade som en parabol enligt [9]. Parametreringen ges av ekvation 2.1 där $a-f$ är parametreringskoefficienter och x samt y är koordinater för hjul och räl. Koefficienter enligt ekvation 2.1 har beräknats för rälprofiler på sträckan Göteborg–Laxå samt uppmätta hjulprofiler [10].

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (2.1)$$

Parametreringen beskriver räl- och hjulgeometri. För att sammankoppla denna parametrering med nedbrytningsmått ($T\gamma$ och FI), hos flänsroten och farkanten, krävs därutöver samband mellan dessa. Samband är framtagna genom regressionsanalys utifrån insamlad statistik, samt dynamiska simuleringar i Gensys [10]. Nedbrytning av farkanten och/eller flänsroten sker endast om kontakt sker i dessa områdena. För att kunna utvärdera ifall detta är fallet har en beslutsgräns (eng. decision boundary) tagits fram i [10]. Denna beslutsgräns är ekvation 2.2, där index r och w innebär koefficienter från ekvation 2.1 för räl respektive hjul. För kontakt krävs att $DB < 0.5$.

$$DB = -0.7459 - 11.28a_r - 0.1322d_r + 6.559 \times 10^{-2}e_r + 18.93a_w + 0.1360d_w - 3.911 \times 10^{-2}e_w \quad (2.2)$$

Då villkoret uppfylls kan $T\gamma$ uppskattas enligt 2.3 och FI enligt 2.4. I ekvationerna avser R kurvradien (m), $a-e$ är koefficienter från 2.1 för hjul (w) respektive räl (r). Rälsförhöjningsbristen h_d beräknas enligt ekvation 2.5 i vilken h_a anger verklig rälsförhöjning (mm), h_t teoretisk rälsförhöjning (mm), b_0 halva spårvidden (mm), g tyngdaccelerationen

(m/s²) och v tågets hastighet (m/s).

$$\widehat{T\gamma} = 327.3 + 405.2a_r + 10.18d_r - 3.629e_r - 14.01d_w - 0.3561R - 0.3396h_d + 1.141 \times 10^{-4}R^2 \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \widehat{FI} = & -0.1487 + 16.36a_r + 4.340 \times 10^{-2}d_r - 1.748 \times 10^{-2}e_r - 15.90a_w - 5.140 \times 10^{-2}d_w \\ & + 1.333 \times 10^{-2}e_w - 1.700 \times 10^{-4}R - 86.79a_r^2 + 100.7a_ra_w \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$h_d = \text{rälsförhöjningsbrist} = h_t - h_a \approx \frac{2b_0}{g} \times \frac{v^2}{R} - h_a = \frac{118000}{R} - h_a \quad (2.5)$$

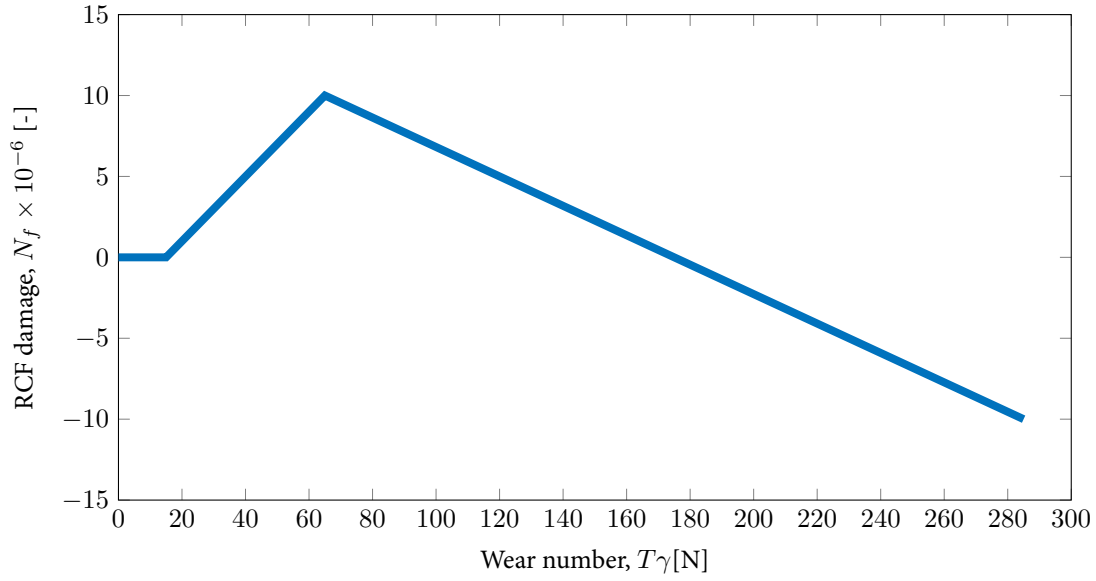
2.8 Skadefunktioner

Det finns två metoder, med utgångspunkt från $T\gamma$ respektive FI , för att ytterligare analysera skadan av rullkontaktutmattnings. För att kunna prediktera skadan utifrån FI (D_{FI}) för ett enskilt rälavsnitt eller hjul kan ekvation 2.6 användas [11]:

$$D_{FI} \equiv \frac{1}{N} = \frac{FI^4}{10} \quad \forall FI \geq 0 \quad (2.6)$$

Där FI i detta arbete utvärderas enligt ekvation 2.4 och N är antalet lastcykler till sprickinitiering. FI -värden mindre än noll antas inte ge upphov till någon betydande skada. Funktionen kan med ett ansatt gränsvärde, för då sprickinitiering antas ske, ge en uppskattning av hjulens och rälsens livslängd uttryckt i antal belastningscykler (N).

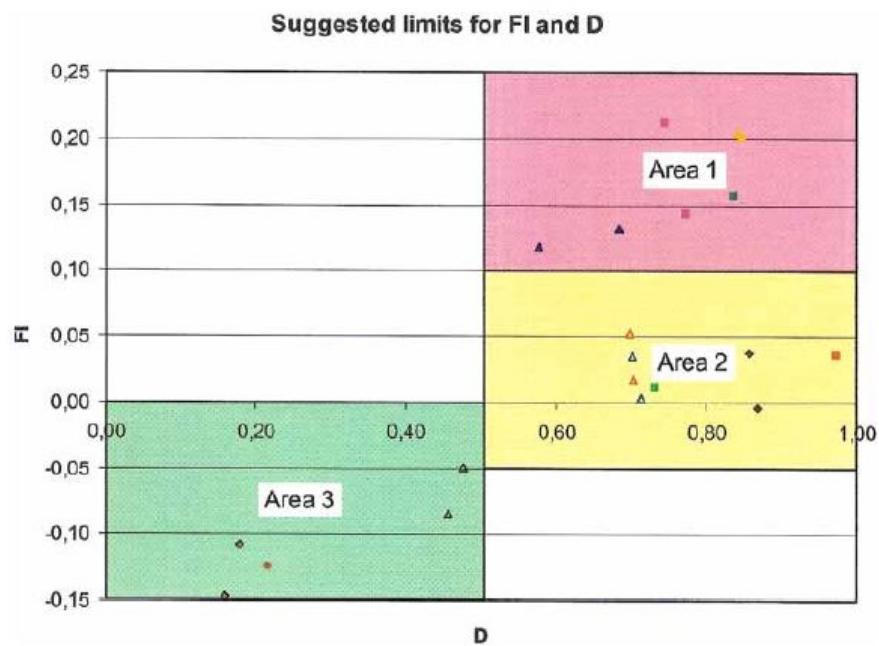
Skadefunktionen $D_{T\gamma}$ som beräknas enligt figur 2.7, utgår istället från nötningstalet $T\gamma$ för att uppskatta skadan [4]. Modellen anger således hur stor skada som uppkommer vid en viss mängd energi som matas in i kontaktytan per sträcka. En fördel med att använda sig av denna teori är att den tar hänsyn till nötning. Nötning av räl och hjul kommer att bidra till en minskad risk för utmattnings då initierade sprickor till viss del kommer att nätas bort innan de propagerar och växer.



Figur 2.7: Skadefunktionen D_{T_γ} (RCF damage) [4].

Modellen baseras på en analys av mätningar på sex olika kurvor i Storbritannien som varit utsatta för rullkontaktutmattnings. Rälsmaterialet har en sträckgräns på 425 MPa och en brottspänning på 825 MPa. Denna modell är således kalibrerad för dessa kurvor och de fordon som trafikerar kurvorna. Användandet av denna modell förväntas dock ge en fingervisning om hur rullkontaktutmattnings ter sig även på andra platser. Den analyserade rullkontaktutmattnings-skadan är en fraktion av den totala livslängden fram till brott. När den ackumulerade rullkontaktutmattnings-skadan är 1 innebär detta att en spricka på 2 mm (teoretiskt) har bildats. Vid låga T_γ -värden sker ingen rullkontaktutmattnings (upp till $T_\gamma = 15$ N), vid högre värden sker ökad rullkontaktutmattnings (mellan 15 och 65 N), vid ännu högre värden börjar nötningen reducera rullkontaktutmattnings-skadan vilket leder till minskad rullkontaktutmattnings (mellan 65 och 175 N). Vid väldigt höga T_γ -värden bildas inga sprickor utan nötning dominerar.

Ett försök till kombinera D_{FI} och D_{T_γ} har gjorts av Stichel [17]. Försöket syftar till att ta hänsyn till de båda skademått och inkludera effekten av att sprickor nöts ner. Stichel fastslår att trots begränsningarna av studiens omfattning så är sambandet mellan uppmätta skador och förutsagda skador relativt bra [17]. Simuleringarna har gjorts för tre olika typer av tåg, där endast det främre hjulparet beaktats.



Figur 2.8: Indelning av $D_{T\gamma}$ (i figuren D) och FI i riskzoner [17].

Om skadeindexen hamnar i område tre är det låg risk för rullkontaktutmattning. I område två indikerar skadeindexen att mer noggranna analyser bör genomföras för att bestämma risken för rullkontaktutmattning, medan det i område tre är hög risk för rullkontaktutmattning. Klassificering ger ett indirekt samband mellan $T\gamma$ och FI, det vill säga mellan nötning och utmattning.

3 Metod

Studien baseras på analys av insamlad data med hjälp av befintliga nedbrytningsmått samt framtagande av ett förslag på kombinationsmått för nötning och rullkontaktutmattning. Under samtliga delprocesser i arbetsgången användes ett flertal av de teorier och modeller som tidigare introducerats i föregående kapitel. Arbetsgången kan delas in i litteraturstudie, tolkning av data samt nedbrytningsanalys för hjul respektive räl från vilka slutsatser dras.

3.1 Litteraturstudie

Den litteraturstudie som genomfördes gällde bland annat skademekanismer relaterade till nedbrytning av järnväghjul och räl. Studien omfattade järnvägen och dess funktioner i allmänhet men främst bakomliggande faktorer för slitage och utmattning i kontaktytan mellan hjul och räl. Till detta används skademått kända från litteraturen. Likaså gjordes en förstudie avseende nuvarande underhållsstrategier och förekommande skadetyper hos hjul och räl.

3.2 Tolkning av data och tillämpning av nedbrytningsmodeller

En stor mängd rådata, insamlade år 2008, fanns tillgänglig från Trafikverket. Denna data avsåg mätningar och geometristatistik för rälprofiler mellan Laxå och Göteborg med en upplösning på ungefär en mätning var femte meter över hela sträckan. Utöver detta tillkom geometrimätningar av 120 hjulprofiler [15]. För att bearbeta och analysera rådata användes metamodeller från Karttunen [10]. Med hjälp av dessa modeller formaterades rådatafiler och nötning samt risk för sprickbildning beräknades i varje mätpunkt för hjul och räl. Modellerna innefattade även parametriseringar av räl- och hjul-profil för att möjliggöra jämförelse med ursprunglig geometri. Med rådata och beskrivna modeller utfördes till en början en övergripande kartläggning över bansträckningen med analys av nedbrytning för olika partier av sträckningen.

3.3 Nedbrytningsanalys av hjul

Utifrån de givna metamodellerna [10] analyserades nedbrytningen på respektive hjul, både i form av nötning och i form av risk för sprickbildning. Då hjulens totala skadepåverkan utifrån separerade nötnings- och utmattningsmått var svår att prediktera krävdes ett gemensamt skademått. Detta skademått baserades på olika teorier och användes för att analysera hur hjulpopulationen kan karaktäriseras och vilka skador som torde vara dominanta [16, 14]. Detta skademått förklaras i avsnitt 4.

För att förtydliga och konkretisera nedbrytningsskillnader som visat sig vara centrala för hjulskador plottades delar av rådata varefter geometriförändringar i kontaktytan mellan hjul och räl analyserades. Analysen utfördes för att ta fram hur normalt slitage yttrar sig samt vilka hjul i populationen som avviker med högre nedbrytning än medelhjulet.

3.4 Nedbrytningsanalys av räl

Nedbrytningsanalysen av räl gjordes utifrån samma metamodeller som för hjul och avser ytterrälen i kurvor med kurvradie mindre än 1250 m. För varje kurva på bansträckningen analyserades skadeindexen och deras korrelation mot bansträckningens parametrar. Det skademått som tagits fram vid hjulanalysen utnyttjades även till att uppskatta och karaktärisera totala skadan för respektive del av bansträckningen. En analys utifrån beräknade skademått utfördes för att identifiera de mest kritiska bandelarna. Denna analys användes till att rangordna kurvorna baserat på predikterad skada och för att utvärdera korrelation mellan de mest kritiska bandelarna och de senaste årens underhållsarbeten. Data av historiskt utfört underhållsarbete hämtades ur Trafikverkets databas BIS.

4 Resultat

I denna del av rapporten presenteras studiens resultat utifrån de metoder för nedbrytningsanalys, underhållsåtgärder och den skadeteori som presenterats ovan.

I kapitlet presenteras ett flertal grafer och data för bansträckning, hjul och räl. Vad gäller de 120 mätningarna på hjul som studien hade att tillgå, var det 111 st samt ett originalhjul som var möjliga att parametrisera [10]. För att göra analysen nedan enhetlig har tre hjulprofiler valts ut. Dessa kommer presenteras mer utförligt. Dessa utgörs av ett väldigt slitet hjul (nr 17), ett medelslitet hjul (nr 69) och ett lindrigt slitet hjul (nr 39). Hjulen har valts genom att analysera skademåtten med avsikt på $T\gamma$ respektive FI , se avsnitt 4.2.1.

De delar av bansträckningen som ingått i analysen redovisas i avsnitt 4.2.

4.1 Nedbrytningsanalys av hjul

Analysen av hjulen syftar till att ge en djupare förståelse för hur storleken på skadeindexen fördelas mellan hjulen. Därefter ges resultat kring hjulens geometri och hur denna korrelerar mot skador. Slutligen sammanvägs skadorna i en modell som valts att kallas för SKBM.

4.1.1 Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden

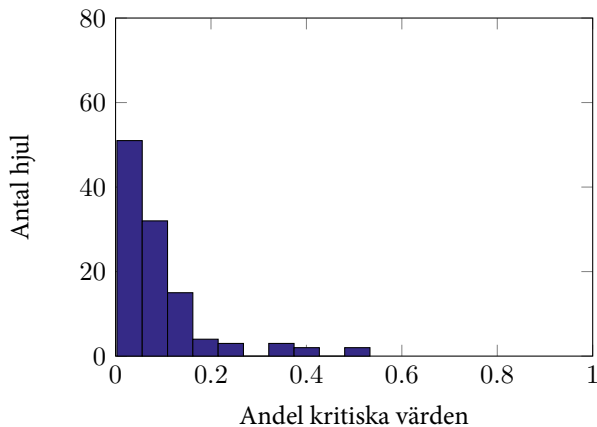
För att göra en djupare analys av hjulpopulationen, så undersöks hjulen vart och ett för sig. Tre hjul väljs för djupare analys. Dessa tre hjul skall representera hela hjulpopulationen genom att utgöra ett bra, ett dåligt, och ett normalt hjul.

Vid granskning av skadepåverkan för enskilda hjul appliceras meta-modeller för nötning ($T\gamma$) och utmattning (FI) på hela hjulpopulationen. Vid beräkning antogs hjulen vara oberoende av varandra, tillhörande olika tåg/vagnar, samtidigt som dessa antogs hålla en konstant hastighet på 100 km/h. Hastigheten kommer här in genom sin inverkan på rälsförhøjningsbristen (h_d) och därmed på $T\gamma$, se ekvation 2.3.

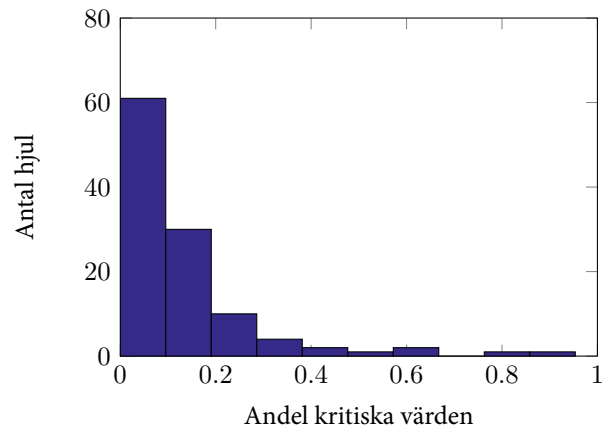
Först undersöks alla beräknade $T\gamma$ -värden och sedan FI -värden. För att identifiera vilka de mest kritiska hjulen i hjulpopulationen är sätts en kritisk gräns för alla uppmätta värden vid den nittionde percentilen av samtliga hjuls värden över hela bansystemet. Denna kritiska gräns beräknas till 103 N för $T\gamma$ och 0.04 för FI . Värdena har beräknats för hela bansträckan och samtliga hjul.

Genom att summera varje enskilt hjuls mätvärden som ligger över de kritiska gränserna för $T\gamma$ och FI fås en överblick av hur pass dominerande nötning respektive utmattning är för det enskilda hjulet.

Dessa sorteras och presenteras i ett histogram för FI och $T\gamma$, se figur 4.1 respektive 4.2. Där presenteras hur många hjul som har en viss andel kritiska värden. Ett av de allra sämsta hjulen, ett av de allra bästa hjulen och ett hjul med ett "normalt värde" väljs ut för vidare analys.



Figur 4.1: Fördelning av kritiska FI -värden.



Figur 4.2: Fördelning av kritiska $T\gamma$ -värden.

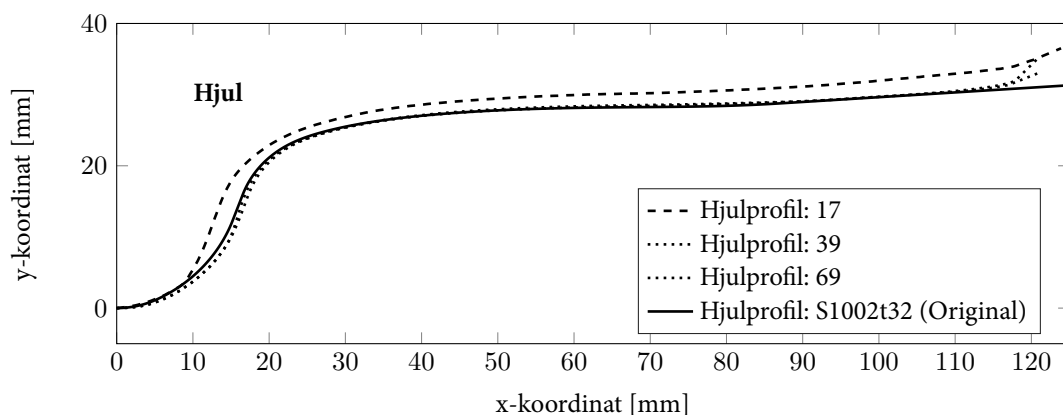
Hjul 17 väljs som ett av de sämsta hjulen då andelen analyserade värden överstiger de kritiska värdena för 40 % och 60 % av de analyserade fallen FI - respektive $T\gamma$ -värden. Hjul 39 som är ett av de bästa hjulen och hjul 69 som är ett representativt normalt hjul har en låg andel på omkring 10 %.

För att verifiera resultatet av denna urvalsmetod används dessutom en alternativ metod. Varje hjuls som överstiger kritiska nivåer, för både $T\gamma$ och FI , sparas. Medelvärde av dessa multipliceras sedan med andelen värden över den kritiska gränsen för hjulet i fråga. Sedan rangordnas hjulen efter detta värde. Genom detta förfarande elimineras risken att underskatta skaderankingen för ett hjul om hjulet har få men höga skadeindex värden som överstiger kritiskt värde. Resultatet av denna beräkning blev snarlikt det ursprungliga resultatet där endast andelen kritiska värden togs hänsyn till.

Något som påverkar nedbrytning i stor utsträckning är radien på kurvorna längs banan. Därför görs en grafisk korrelationsstudie mellan $T\gamma$ och kurvradie samt mellan FI och kurvradie. För de tre utvalda hjulen plottas alla uppmätta värden i bilaga A. I samma figurer (A.1, A.2 och A.3) plottas även det glidande medelvärdet av $T\gamma$ för det aktuella hjulet och det glidande medelvärdet av FI för hela hjulpopulationen. För FI konstaterades den individuella spridningen av hjulens mätvärden vara större.

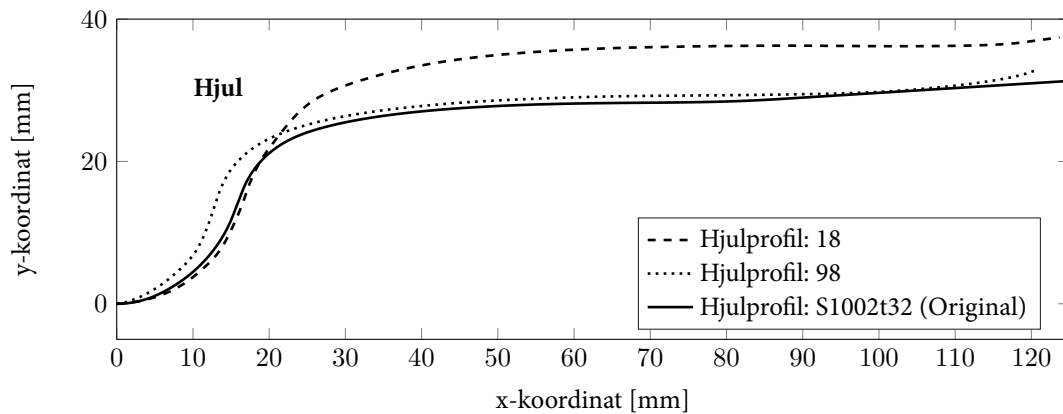
4.1.2 Inverkan av hjulprofilens geometri

I figur 4.3 visas löpbana och flänsgeometri för de tre hjulen som tidigare diskuterats samt för ett originalhjul, ENS1002t32.



Figur 4.3: Hjulprofil för utvalda hjul samt originalhjul.

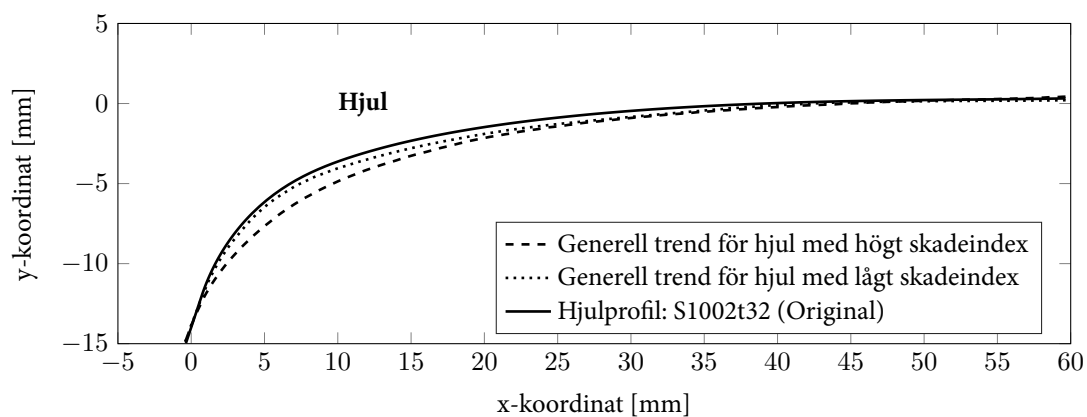
Då tre av linjerna i stort sätt sammanfaller (för hjulprofil 39, 69 och originalhjulet), kan det antas att dessa hjul endast är lätt slitna. För hjulprofil 17 är skillnaden tydligare. Nötningen har i detta fall haft stor utbredning och varit jämt fördelad över både fläns och löpbana. Från lägsta punkten på flänsen till löpbanans mitt har avståndet ökat med ca 3 mm. Granskning av ett större antal hjul visade dock skillnader i hur nötningen var koncentrerad. Detta ses i figur 4.4 där hjul 18 med omfattande nedbrytning av löpbana och hjul 98 med huvudsakligen stor nötning på flänsen visas.



Figur 4.4: Hjulprofil för hjul med nedbrytning på fläns och löpbana

Generella geometritrender mellan fläns och löpbana

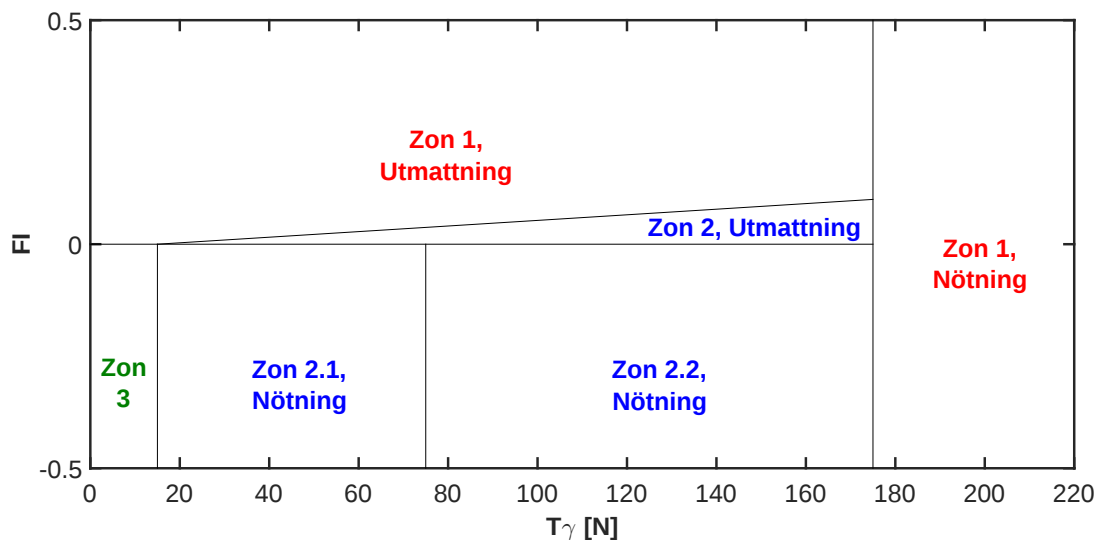
Då metamodellerna beror på hjulgeometrin i övergången mellan fläns och löpbana utifrån nötningsindexet $T\gamma$ genomfördes en grundligare analys av denna övergång för respektive hjul [10]. I figur 4.5 visas det generella utfallet. Både för hjul med lågt och för hjul med ett högt skadeindex visade det sig att geometrin skiljer sig något från originalprofilen. Då hjul som följde den röda kurvan hade väldigt låga $T\gamma$ -värden kan denna profil anses optimal för att minimera fortsatt nötning. För hjul med utformning enligt den blåa kurvan uppmättes högre värden för $T\gamma$. Observera att geometrilinejerna i figuren har flyttats jämfört med figur 4.5 för att förtydliga utformningen vid övergång från fläns till löpbana.



Figur 4.5: Generella trender för hjulprofiler

4.1.3 Skademåttet SKBM

Nedanstående avsnitt behandlar det framtagna skademåttet SKBM vilket är en viktning av nötning ($T\gamma$) och utmattning (FI). Måttet syftar till att kunna kvantifiera den totala skadepåverkan i kontaktytan mellan hjul och räl. I figur 4.6 ses en zonindelning som införts för att vikta ihop skadeindexvärden och summera dessa till en totalkvot för ett hjul eller ett rälavsnitt. SKBM utgörs av två delar, se ekvationer 4.1–4.3. Ekvationerna bygger på att värden ($T\gamma$ och FI) för en viss kurva summeras i respektive zon, se förklaring av respektive zon nedan. I ekvationerna anges Zon_{index} , nötning/utmattning vilka innebär antalet mätvärden i respektive zon.



Figur 4.6: Zonindelning för framställning av SKBM

$$SKBM_{nötning} = \frac{Zon_{2.1,nötning} + 2 \times Zon_{2.2,nötning} + 4 \times Zon_{1,nötning}}{\sum \text{Alla zoner}} \quad (4.1)$$

$$SKBM_{utmattning} = \frac{2 \times Zon_{2,utmattning} + 4 \times Zon_{1,utmattning}}{\sum \text{Alla zoner}} \quad (4.2)$$

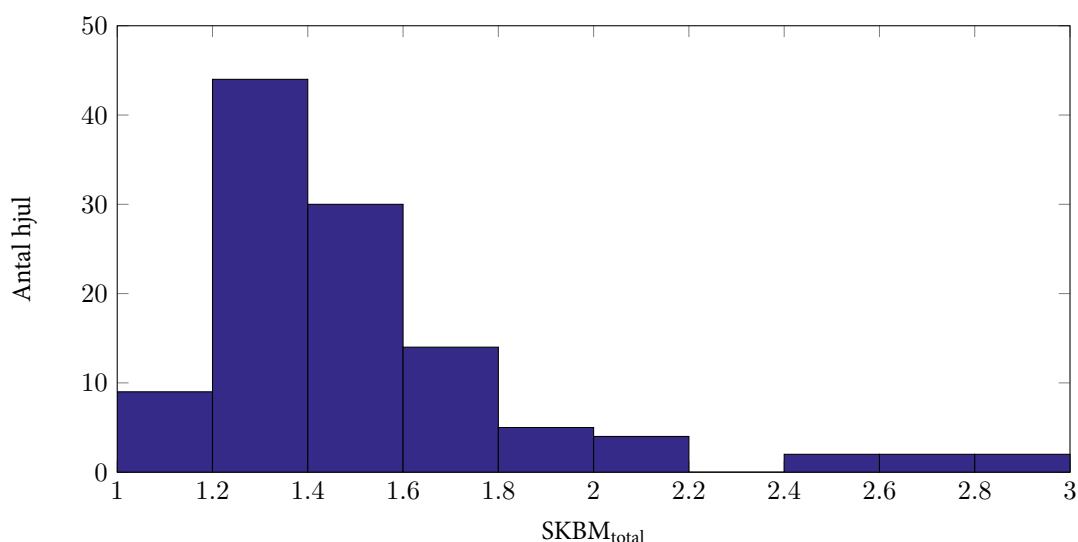
$$SKBM_{total} = SKBM_{nötning} + SKBM_{utmattning} \quad (4.3)$$

Zonerna i figur 4.6 är indelade i fallande ordning efter hur kritiska de är för nötning respektive RCF. Gränserna för den minst kritiska zonen, Zon 3, var negativa $FI < 0$ och $T\gamma < 15$ N vilka enligt Burstow [4] innebär mycket låg sannolikhet för slitage. Kritikaliteten för varje zon återspeglas i ekvationerna, se koefficient för respektive zon i ekvation 4.1 och 4.2. Det bör nämnas att denna viktning ej har någon större precision, viktningen representerar istället en metod för hur måtten $T\gamma$ och FI kan vägas samman genom att använda modellen SKBM. Först när klarare samband identifierats mellan $T\gamma$ och FI kan noggrannare koefficienter tas fram.

Nötningssonen 2 är uppdelad i två zoner, 2.1 och 2.2. Anledningen till denna uppdelning är att en stor andel av alla värden hamnar i dessa två zoner, att endast använda en zon anses därmed vara för generell. Gränsen mellan zonerna drogs efter att ha undersökt alla $T\gamma$ -värden, vid $\frac{2}{3}$ av alla värden (75 N). Mätvärden i Zon 2.1 betraktas som svår nötning och mätvärdena i Zon 2.2 betraktas som allvarigare nötning. Enligt figur 4.6 så kommer nötningen att dominera över RCF för $T\gamma$ -värden över 175 N vilket representeras av Zon 1, nötning. Utmattningszonerna (där $FI > 0$ och $T\gamma < 175$ N) är utformade enligt Burstows och Stichels teorier [4, 17]. Zon 2 kompenseras och viktas här ner på grund av ett växande $T\gamma$. Utfallet för denna formel är tänkt att ge representativt värde för hur stor skada hjulet antas kunna ge vid fortsatt drift. Tanken är att måttet kan ligga till grund för en framtida underhållsmodell.

Resultat avseende SKBM för hjul

Utifrån framtagna skademåttet SKBM, där hänsyn tas till både FI och $T\gamma$, gjordes en analys av hela hjulpopulationen. I figur 4.7 visas fördelningen av skademåttets totalvärde, se exakta värden i tabell 4.1. Figuren visar viss spridning i skada men är tydligt skevad åt vänster vilket också belyses utav att värdena för det bra hjulet (39) samt normalhjulet (69) ligger betydligt närmare varandra samtidigt som hjul 17 avviker mer. Utfallet av SKBM korrelerar även mot utfallet för $T\gamma$ och FI , vilket presenteras i figur 4.7.

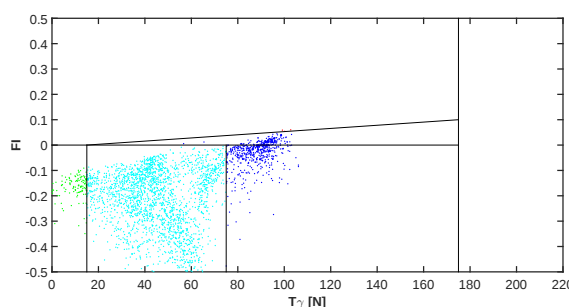


Figur 4.7: Fördelning av $SKBM_{Total}$ för hjul.

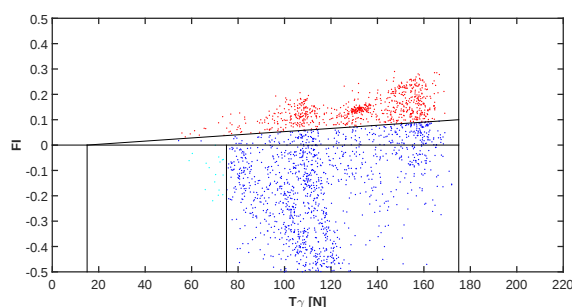
Tabell 4.1: Beräknade värden av SKBM för hjul 17, 39 och 69.

Hjul	17	39	69
SKBM (total)	2,64	1,17	1,32
SKBM (nötning)	1,12	1,05	1,01
SKBM(utmattning)	1,52	0,12	0,31

För att öka förståelsen för vilken typ av skada, (nötning ($T\gamma$) eller utmattning (FI)) som dominerar för respektive hjul gjordes även en grafisk analys av SKBM-utfallet vilket visas i figur 4.6. Utfallet för hjul 69 vilket även liknar det för hjul 39 och kan antas representera låg till normal skadinverkan hos ett hjul, visar på relativt samlade data i den nedersta vänstra delen av figuren. Värt att poängtera är att bara en liten mängd av mätdata påvisar utmattning ($FI > 0$) och än färre ligger i Zon 3. Trots relativt låga värden för $T\gamma$ kan det antas att nötning är den dominerande skademekanismen. Detta resultat bekräftas även i tabell 4.1, då nötningstalet visat sig vara större för dessa hjul än för utmattningstalet (förutom för hjulprofil 17), samt i figur 4.10 där fördelningen mellan nötning och sprickbildning för respektive hjul har plottats.

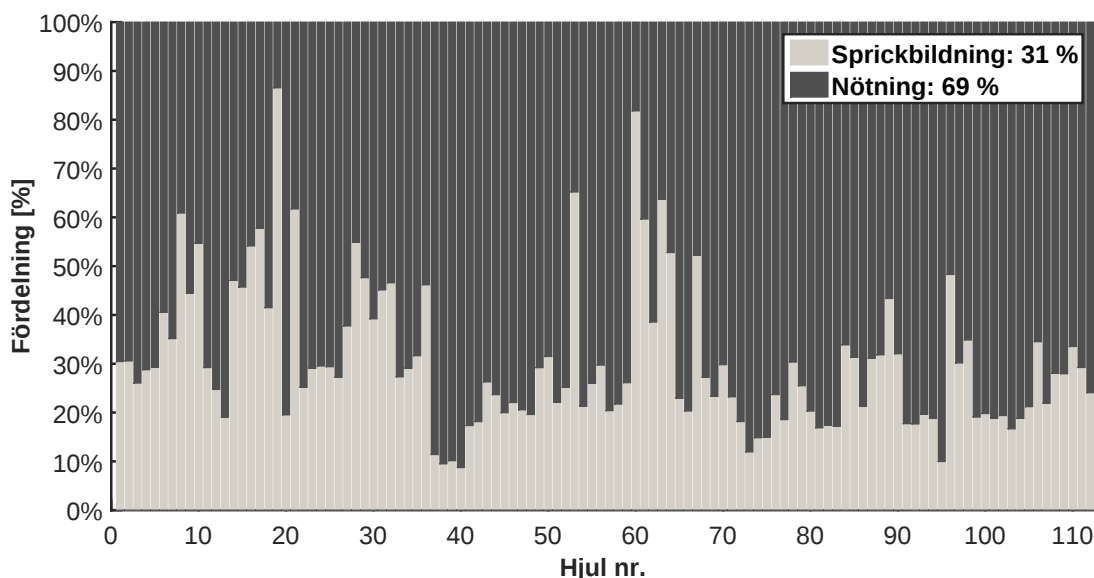


Figur 4.8: SKBM för hjul 39.



Figur 4.9: SKBM för hjul 17.

Hjul 17, vilket är ett av de hjul som tidigare klassificerats som mindre bra och får representera denna del av hjulpopulationen, visar mer spridning av utfallet, se även figur 4.9. Antalet analyser med $FI > 0$ tyder på att detta kan ha betydelse för totala skadan.



Figur 4.10: Fördelning mellan $SKBM_{nöttn}$ och $SKBM_{sprick}$ för hjul.

4.2 Nedbrytningsanalys av räl

4.2.1 Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden

För att få förståelse för och visa på skillnader i nedbrytning och skada, för hela bansträckningen (Laxå – Göteborg), gjordes en analys av skadeindexen $T\gamma$ och FI längs bansträckningen. Vid parametrisering av rälen sällades alla raksträckor och kurvor med en radie större än 1250 m, bort. Resultatet ges ur den översta plotten i figur B.1 i bilaga B, vilken visar hur kurvornas storlek varierar. Både höger- och vänsterkurvor inkluderas här. I de två underliggande plottarna visas glidande medelvärde av de två skademått $T\gamma$ och FI för samma mätpunkter på rälen. Det glidande medelvärdet innebär att medelvärdet för de 30 närmsta punkterna för ett visst metertal beräknas, detta medför en mindre spridning och således en tydligare visualisering av tendenser.

De flesta kurvradier förefaller ligga inom två områden, runt 1000 meter eller runt 600 meter. I det senare fallet, det vill säga vid skarpare kurvor, kan både högre nedbrytnings- ($T\gamma$) och utmattningsspåkänningar (FI) antydast i figur B.1. De flesta

av kurvorna, speciellt de med en mindre kurvradie, tillhör en mindre del (de sista 30 kilometrarna närmast Göteborg) av bansträckningen.

Utgallringen av raksträckor gjordes med tanke på de meta-modeller som användes för beräkning av skadeindex, då dessa gäller enbart för kurvor med en största radie av 1250 m. Vid större kurvradier visade sig även skademått bli så pass små att inverkan från dessa delar antogs vara obetydliga för kommande analyser. Vid korrelationsanalys av $T\gamma$ och FI mot bland annat rälsförhöjningen kunde inga tydliga samband urskiljas.

4.2.2 Rangordning av kurvor

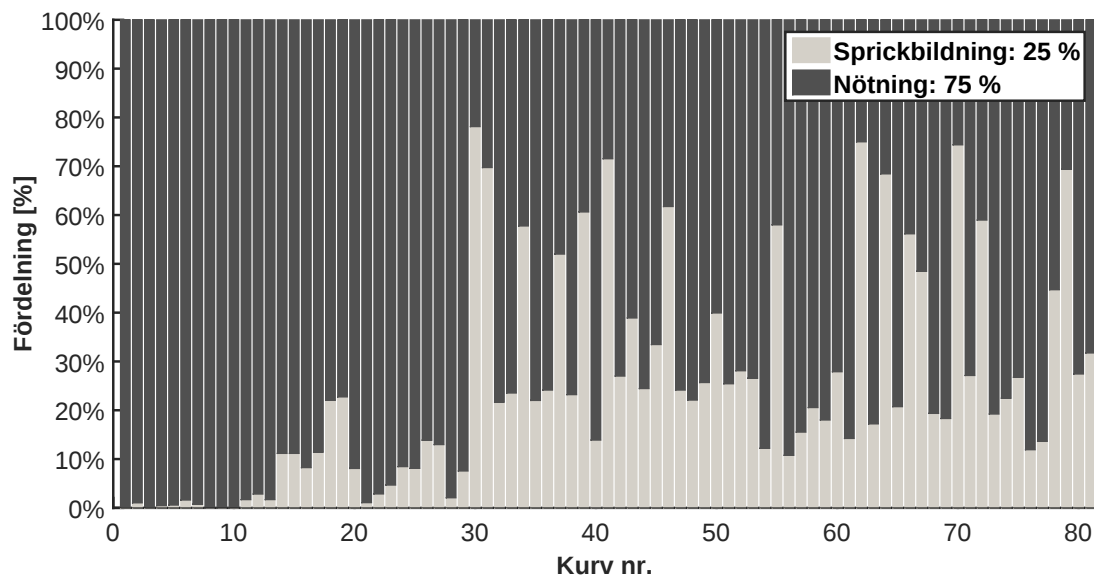
I bilaga C ges en översikt över alla kurvor vars radie ligger i intervallet 400 – 1250 meter, totalt 81 kurvor. Kurvorna är sorterade i fallande ordning, där 1 är de med lägst utfall och 81 de med värsta utfall, enligt SKBM-rankning. Denna rankning fås i sin enkelhet genom att rangordna kurvorna efter dess SKBM-värde. Skademått som inkluderas är $T\gamma$, FI samt SKBM. Dessa utgör således tre olika rankningssystem där kurvorna är sorterade efter SKBM. Skademåttet har i detta avsnitt beräknats för varje kurva på samma sätt som för hjuldelen. Värdena för FI och $T\gamma$ som jämförs är andelen mätvärden som ligger över den nittionde percentilen för varje kurva multiplicerat med medelvärdet av värdena som är högre än det kritiska värdet. Antal slipningar avser slipning av räl som gjorts i underhållssyfte på analyserad räl de 15 senaste åren denna data är inhämtad från Trafikverkets databas BIS.

I tabell 4.2 redovisas fyra kurvor: 30, 70 och 79, som gav höga utfall på skademått och kurva 45 som gav lägst utfall. Noterbart är att samtliga kurvor som gav höga utfall på skademått är högerkurvor med små radier. Dessa kurvor rankas likartat med samtliga skademått.

Tabell 4.2: Rankning av kurvor.

Kurva	Rank SKBM	Rank FI	Rank $T\gamma$	Radie [m]	Bansektion	Spårvidds- ökning [μm]	Höger vänster	Slipningar
30	81	80	81	568	612	5 983	1	2
70	80	81	71	556	612	6 399	1	2
79	78	78	79	400	601	7 060	1	1
45	1	28	1	1111	612	11 104	0	1

Ur rangordningen, bilaga C och tabell 4.2 ovan, kan tydas att många av de högst rankade kurvorna samtidigt visade höga utfall för både nötning, $T\gamma$ och sprickbildning, FI . För att urskilja om någon av dessa kan ses som dominerande kurvan utnyttjades mått för $SKBM_{sprick}$ och $SKBM_{nötning}$. I figur 4.11 visas förhållandet mellan dessa för respektive kurva. Överlag ses nötningen som dominerande (75 % av skadan) för de bandelar som analyserats.



Figur 4.11: Fördelning mellan $SKBM_{nötning}$ och $SKBM_{sprick}$ för kurvor.

För att på ett enklare sätt se utfallet, av rankningar enligt $T\gamma$, FI och $SKBM$, ges en visualisering av dem i figur C.1 (Bilaga C). De streckade horisontella linjerna anger vilket rankningsystem som värden på den horisontella axeln avser. De linjer som är plottade representerar de tio kurvorna som visat på högst rankning för $SKBM$, vilket tydligt ses på den horisontella sträckade linjen som anger rankning enligt $SKBM$. Under respektive heldragna linje är även dess kurvnummer angivet. Figuren ger således en visualisering av hur olika rankningar avviker från varandra för respektive kurva. En rak linje påvisar liknande rankningar för samtliga system medan en linje som inte är rak visar på avvikelser mellan värden för de olika rankningssystemen.

4.2.3 Korrelation mellan utvalda variabler och rangordning av kurvor

Korrelationen mellan de rankningar som presenterats ovan gentemot variabler såsom radie, sektion, höger- eller vänsterkurvor samt antal slipningar undersöktes med en korrelationsanalys. Syftet var att fastställa hur respektive variabel inverkar på rankningen. Korrelationskoefficienten mellan två variabler beräknas enligt [21]:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})}{std(x)} \times \frac{(y_i - \bar{y})}{std(y)} \quad (4.4)$$

Denna koefficient avser linjär korrelation och värdena -1 och 1 innebär negativ respektive positiv korrelation. Resultatet presenteras i tabell 4.3. Ett antal korrelationer kan identifieras, dessa markeras med fet stil i tabellen. Nedan diskuteras mer i detalj för hur respektive variabel påverkar rankning.

Tabell 4.3: Korrelationskoefficienter mellan rankningar och variabler

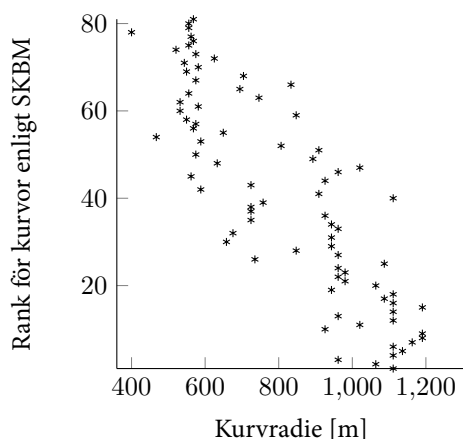
	Rank FI	Rank $T\gamma$	Rank $SKBM$
Radie	-0,787	-0,792	-0,838
Spårviddsändring	-0,666	-0,303	-0,486
Höger/vänster	0,305	0,251	0,338
Slipningar	0,028	0,123	0,126

Radie

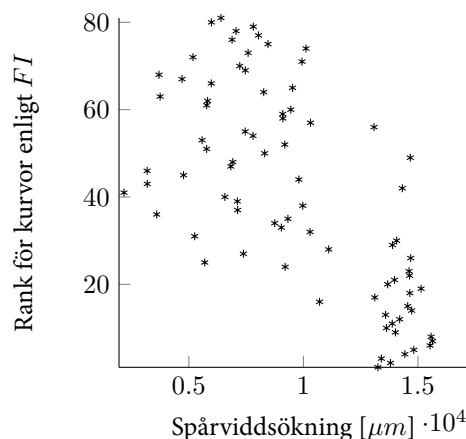
Radien har, för samtliga rankningar, en korrelationskoefficient som tyder på negativt korrelation. Figur 4.12 visar tydligt hur radien och SKBM korrelerar mot varandra, mindre radie ger högre SKBM vilket indikerar större nedbrytning. Liknande korrelation gäller för andra rankningar, dock är den då inte lika stark.

Spårviddsökning

För spårviddsökning råder en viss korrelation för rankning enligt FI , vilket redovisas i figur 4.13.



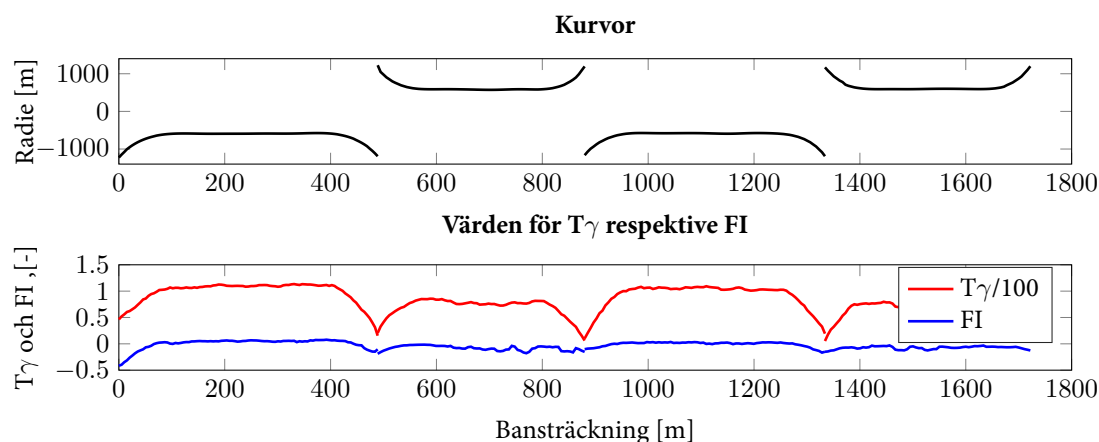
Figur 4.12: SKBM mot radie, $r = -0.838$



Figur 4.13: FI mot spårviddsökning, $r = -0.666$

Vänster- och högerkurvor

Då rankningarna undersöktes med avseende på vänster/höger noterades en mindre korrelationskoefficient för samtliga rankningssystem varpå en utförligare analys utfördes. I figur 4.14 visas två högerkurvor samt två vänsterkurvor med liknande kurvradi och längd. Dessa har plottats med värden för $T\gamma$ och FI (ej rankning).



Figur 4.14: Skillnad mellan höger- och vänsterkurvor

Utifrån figur 4.14 syns att $T\gamma$ är större för kurvor åt vänster. Dock syns inte liknande effekt för FI , detta tas upp utförligare i avsnitt 5 där validiteten av korrelationsanalysen diskuteras. Medelvärden av $T\gamma$ varierar och skiljer i snitt 27 % mellan höger- och vänsterkurvor för samtliga kurvor. Liknande resultat kan även fås då andra kurvor med liknande parametrar plottas upp.

Slipningar

Analysen tyder på att ingen korrelation råder mellan antalet slipningar och rankning.

5 Diskussion

I detta avsnitt diskuteras resultaten som studien kommit fram till. Avsnittet är indelat i en räddel och en hjuldel för att ge en tydlig bild över respektive område. Resultatet är generellt baserade på analyser med tidigare beskrivna metamodeller. Eftersom dessa endast gäller för farkanten kan ytterligare modeller behövas för att undersöka nötning och sprickbildning på farbanan. Skador på farkanten anses dock speciellt för rälerna vara de mest kritiska. Ytterligare undersökningar kan även syfta till att upptäcka bland annat geometrifel såsom vågor och räfflor samt dessas betydelse för den totala skadan. Vidare studier kan även innefatta andra områden, vilket kommer att utvecklas i avsnittet.

5.1 Nedbrytningsanalys av hjul

5.1.1 Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden

Utifrån resultatet konstaterades att hjul 17 är ett representativt dåligt hjul, hjul 39 är ett representativt bra hjul och hjul 69 är ett representativt normalhjul. Detta med bakgrund av att samma resultat kunde verifieras med två olika metoder.

Metoderna innebär att jämföra respektive hjuls beräknade skademått mot en kritisk gräns för nedbrytning. Denna kritiska gräns genererades utifrån den nittionde percentilen av alla hjuls skademått. Man kan diskutera om den kritiska gränsen borde ha dragits vid 85 % eller kanske 95 %. Den faktiska kritiska gränsen för $T\gamma$ drogs dock vid 103 N. Burstow [4] menar att efter 175 N är nötningen så stor att den eliminerar risken för spricktillväxt. Han resonerar vidare att redan vid 65 N är nötningen dock allvarlig och i viss mån börjat reducera spricktillväxten. Det man ska ha i åtanke är att nedbrytning sker olinjärt [14], så om gränsen vid 103 N uppfattas som hög, så är det ändå över denna gräns som den mest bekymmersamma nötningen sker.

I plottarna i bilaga A som visar $T\gamma$ mot kurvradie kan en intressant iakttagelse göras: En ökad kurvradie minskar nötningen på själva hjulet. Detta är genomgående för både det sämsta, det bästa och medelhjulet. Dessutom gäller detta för det glidande medelvärde av samtliga hjul. Sammantaget leder dessa iakttagelser till att man kan fastslå generaliteten i att en ökad kurvradie ökar nötningen på hjul som passerar kurvan.

Ytterligare intressant att notera är att skillnaden mellan hjulen medför en skillnad i nötningsgraden på hjulet. Detta då högre påvisade $T\gamma$ -värden motsvarar en ökad nötningsnivå [14]. Alltså kan nedbrytningsanalysen minskas med en bättre hjulprofil. Det skulle således vara intressant att se hur den geometriska nedbrytningen av det dåliga hjul 17 ser ut, för att kunna fastslå om det finns geometrier som bör prioriteras vid omslipning av hjul.

I respektive plot för FI mot radie är det svårare och dra slutsatser då spridningen för hjulens individuella mätvärden visade en större variation. Ett av de totalt sämsta hjulen, hjul 17, är inte konstant dåligt utan visar variation i resultat beroende på kurvradie. Vid snäva kurvor indikeras mer skada medan lägre skada predikteras vid kurvor med stora radier. För de flesta hjulen ligger dock medelvärde för FI väldigt nära det glidande medelvärde för hela hjulpopulationen. Det som utmärker de totalt sett bästa hjulen är att de är något mindre påverkade av väldigt snäva kurvradier. Med detta som bakgrund kan man se att hjul som är dåliga i vissa kurvor, kan vara bättre i andra kurvor om man endast utgår från FI . Detta betyder att det saknas en generellt fastställd korrelation mellan hjulprofil och radie för FI .

Genomgående för ovanstående analys är antagandet att nötning och sprickbildning anses vara oberoende skadefenomen. För en total skadeanalys bör denna analys kompletteras med ett (explicit eller implicit) viktat skademått med hänsyn till både nötning och utmattning.

5.1.2 Inverkan av hjulprofilens geometri

Analysen av hjulprofilernas geometri utgick direkt från tolkning av rådata. Dessa kunde utan närmare utredning användas för att bekräfta utfallet i analysen av $T\gamma$ och delvis FI då de sämre hjulen från denna analys även var de hjul som var mest nötta.

Intressant att belysa är att det fanns tydliga skillnader mellan hjulen. Detta gäller främst var på profilen som nötningen är som störst, (på flänsen eller på löpbanan). Att hjulen nöts till olika profilgeometrier kan bero ha flera orsaker. Till exempel kan det bero på skillnader mellan vagnar och vilka sträckor som trafikerats. Då både hjul och räl slits olika anses det vara rimligt att kontaktytan och således även kontaktrycket når olika nivåer beroende på kombinationen av hjul och del av bansträckningen. Spänningsnivån påverkar även framtida nedbrytning: om spänningarna ökar accelererar skadebildningen. En förändrad kontaktgeometri kan även bidra till att kontaktpunkten mellan hjul och räl förskjuts ifrån sitt ideala läge och bidrar till ett ökat kryp i kontaktarean vilket innebär ett ökat $T\gamma$ ¹.

För vår undersökning upptäcktes även att hjul som klassats som bra respektive dåliga följde generella geometritrender vilka i viss mån avvek från standardprofilen. Eftersom data kring hjulpopulationen var ospecificerad, och information avseende driftområde för hjulens trafikering saknades, kan det inte garanteras att dessa generella trender kommer vara desamma vid ett annat urval. Det visar dock att geometrin vid övergång mellan fläns och löpband har stor betydelse för nedbrytningen. Om denna geometri underhålls kan därmed hjulens livslängd förlängas.

5.1.3 Skademåttet SKBM

Storleken på det utvecklade skadeindexet SKBM kan antas representera den totala skadan som kan antas uppkomma på grund av nötning och utmattning. Viktningen gjordes utefter gränsvärden där utmattning och nötning anses vara kritiska. Då olika studier visar på viss skillnad var dessa kritiska gränser bör dras kan deras exakta position inte styrkas. Trots osäkerheten kan SKBM utfallet anses rimligt då utfallet har visat sig korrelera bra mot hjul och rälvsnitt med stor nedbrytning och där det uppmätts höga FI samt $T\gamma$ -värden. Vi anser SKBM vara ett bra och lättanvänt verktyg för att uppskatta inverkan av både $T\gamma$ och FI vid skadeanalys av hjul och räl. Genom att vikta utfallet från SKBM kan man enkelt rangordna hjul och räl och därigenom prioritera underhållsåtgärder.

Det kan dock nämnas att i vissa enstaka fall kan större skillnader mellan FI och $T\gamma$ uppstå vilket kräver ytterligare analys. Vissa kurvor eller hjul kan därmed visa på lägre SKBM-värden men ändå utgöra en risk om $T\gamma$ eller FI är högt. Modellen tar i viss grad hänsyn till detta men det rekommenderas att $T\gamma$ och FI används som komplement till SKBM. En vidareutveckling av SKBM föreslås där man bör se över skademåttets zonindelning och viktningen utav dessa. Man kan även väga in framtida driftdata och trafikbelastning för hjulpopulationen samt bansträckningen, för att bättre kunna uppskatta tid till önskat underhåll.

Indexet visade tydliga skillnader mellan olika hjul, vid närmare analyser visade det sig att de med högst utfall på SKBM hade en väsentligt avvikande hjulprofil den nominella profilen. Vidare verifiering av vilka hjul som verkligen var mest skadade har ej kunnat genomföras då ytterligare data för hjulpopulationen som använts i studien saknats. Detta omöjliggör en vidare analys av hjulens driftförhållanden analysen har därför antagits en hastighet på 100 km/h vid framtagandet av $T\gamma$ och FI utifrån metamodellerna.

SKBM består även av två mått för nötning och utmattning, $SKBM_{nöt}$ och $SKBM_{utmattning}$, dessa mått möjliggör en direkt jämförelse mellan $T\gamma$ och FI utifrån den viktning som antagits. Vid jämförelse kan den dominerande skadetypen identifieras. Måtten $SKBM_{nöt}$ och $SKBM_{utmattning}$ visar efter utförd analys på att graden av nötning oftast är högre än risken för sprickbildning. Detta gäller dock för den viktning som antagits för modellen, vid annan viktning blir resultatet annorlunda. Högre nötning minskar risken för sprickor men ökar istället risken för att profilens geometri förändras. Detta kan i sin tur medföra större nedbrytning. Således bör underhållet även fokusera på svarvning för att bibehålla en optimala hjulprofil och inte bara på att svarva bort sprickor. Observera att det dock finns vissa hjul där $SKBM_{utmattning}$ är högre än $SKBM_{nöt}$ i ett sådant fall bör verifiering av sprickorna utföras och svarvningen fokusera på att få bort identifierade sprickor.

Det finns dock osäkerheter i modellen. Förhållandet mellan sprickbildning och nötning beror på flera antaganden som att Burstows [4] studie innefattar sex standardkurvor vilka ses som representativa för övriga kurvor och att viktningen i zonerna endast antas vara exponentiella, utan mer exakt noggrannhet. Exakta värden för gränser och zoner samt underliggande information om hur detta förhållande ser ut kan diskuteras och behöver utredas vidare i framtida studier. I framtida studier kan även fältstudier utföras för att undersöka om framtagna modeller korrelerar mot verkliga skador. Detta kan bland annat bidra till en förfinad viktning mellan $T\gamma$ och FI i SKBM-modellen.

¹ Personlig kommunikation med Kalle Karttunen

5.2 Nedbrytningsanalys av räl

5.2.1 Analys baserad på utvärderade $T\gamma$ - och FI -värden

Vid analysen av skadeindexen för nötning ($T\gamma$) och utmattning (FI) av rälen konstaterades tydlig korrelation mot kurvradien skarpare kurvor genererade högre värden med avseende på både nötning och utmattning. Även om inte raksträckor har tagits i beaktning i denna analys indikerar studien att skadorna på rakspår generellt är mindre än i kurvor. För andra variabler, såsom rälsförhöjning, kunde liknande tydliga korrelationer inte urskiljas. I och med att det endast är en bansträckning och ett givet antal kurvor som undersökts kan det dock inte fastslås att något sådant samband inte existerar. För att undersöka detta ytterligare kan en mer omfattande analys rekommenderas.

5.2.2 Rangordning av kurvor

Vid analysen av kurvorna sågs tydligt att i stort sett samma kurvor hade högst rankning oavsett om denna baseras på FI , $T\gamma$ eller SKBM. De kurvor som rankades som mest skadliga hade en generell en liten kurvradie.

En viktig variabel som ej har tagits i beaktning är hur många mega-grosston trafik som trafikerar de olika sektionerna. Till exempel är bansträckan närmast Göteborg mer trafikerad än övriga delar, ungefär 30 % högre². Således har denna varit utsatt för större slitage. Detta kan ha bidragit till det högre utfallet på skadeindex. Övriga variabler som ej har tagits i beaktande vid studien är varierande väderförhållanden och temperaturskillnader.

För en stor andel av kurvorna sågs att nötning kvantifierad med $SKBM_{nöt}$ dominerar i förhållande till sprickbildning kvantifierad med $SKBM_{utmattning}$ och i vissa fall visade fördelningen i princip på uteslutande nötning. Detta överensstämmer med att sprickbildningen är mindre i kurvor med mycket liten radie [16]. Ett fåtal kurvor visar högre risk för sprickbildning, då $SKBM_{utmattning}$ är större än $SKBM_{nöt}$. Det är även dessa kurvor som rankats högst i det totala SKBM. Hög risk för sprickbildning kan kräva extra inspektion för att inte riskera rälsbrott.

Resultatet med SKBM-analysen ger dock en tydlig bild över vilka kurvor som är mest skadliga. Det kan därigenom användas som underlag för underhållsplanering av både kortare och längre banavsnitt. I figur C.1 ges, som tidigare nämnts, en visualisering för hur rankningarna avviker för de tio sämsta kurvorna. Den största avvikelser uppstår för kurva 70 där rankningen för FI är 10 rankningsenheter större än rankning för $T\gamma$, det motsvarar en avvikelse som är mindre än 10 %. Därmed anses rangordningen för de tio sämsta kurvorna inneha en relativt låg avvikelse. För andra kurvor än kurva 70 är avvikelser betydligt mindre. Denna visualisering underlättar tolkning av den tabell som presenterats tidigare, se tabell C.1.

5.2.3 Korrelation mellan utvalda variabler och rangordning av kurvor

Korrelationen mellan olika utvalda variabler och rangordning av kurvor är som tidigare nämnts framtagen enligt linjär korrelation vilket innebär en enklare form av korrelation mellan två variabler. Den korrelationsanalys som genomförts ger således en första uppskattning om hur inbördes rankning beror av ett flertal variabler. Vad korrelationsanalysen belyser är radiens betydelse av nedbrytning, för såväl $T\gamma$ som FI och SKBM, något som är känt sedan tidigare men som fått en mer precis kvantifiering i denna analys. Vad som är intressant är att SKBM visar på högre korrelation mot kurvradie än vad $T\gamma$ och FI gör. Trots att denna skillnad är tämligen liten (ungefär 6 % högre korrelation för SKBM) kan det tolkas som att SKBM lägger ökad vikt vid radien då kurvor rankas.

För korrelation mellan höger- och vänsterkurvor noterades en viss skillnad mellan dessa. Detta kan bero på flera faktorer som relaterar till tåg och till spår. Det kan tänkas bero på mätfel eller kalibreringar. Men då skillnaden är relativt stor (större än 10 % då korrelationskoefficienten är mellan 0.25-0.50) är det troligtvis ytterligare faktorer som spelar in. Därför är det av intresse att göra en fördjupad studie inom detta område.

Även spårvidden visade på viss korrelation mot kurvornas rankning. Notera dock att det är ökningen av spårvidden som

²Personlig kommunikation med Arne Nissen

analyseras och inte absolut spårvidd. En högre spårviddsändring korrelerar mot en lägre rankning. Detta skulle kunna bero på att kontaktpunkten mellan hjul och räl förflyttas då spårvidden ändras. Förflyttningen sker från flänskontakt till kontakt mot hjulets löpbana vilket påverkar. För att få ett mer underbyggt svar på detta krävs dock mer detaljerade studier inom området.

Till sist analyserades korrelation mellan antal tidigare slipningar och rankning. Ingen korrelation kunde påvisas. Detta kan tolkas som att underhållet i dag ej är helt optimerat då en mycket stor del av spåren slipas. Vad som dock är värt att nämna är att rankningen endast gäller för kurvor och enbart baseras på profilgeometri. Även andra fenomen såsom vågor och räfflor kan vara orsaker till att underhåll genomförs.

6 Slutsatser och rekommendationer

Studien har resulterat i ett verktyg för att fastställa kvalitetsnivån hos hjul och räl. Detta underlättar planering av underhåll inom dessa områden. Modellerna innebär att skademått kopplade till nötning och sprickbildning utvärderades med hjälp av metamodeller. De använda metamodellerna är framtagna för kontakt mellan farkanten hos räl och hjulets flänsrot. Det framtagna verktyget kan användas för att prioritera underhåll av kurvor och hjul. En analys enligt denna studie ger en tydlig bild över vilka banavsnitt och hjul som är mest skadliga. Denna information är mycket värdefull för ett långsiktigt och hållbart underhållsarbete. Modellerna innehåller även information om vilken typ av slitage som dominerar skadebildningen för enskilda kurvor och hjul. Detta medför att kurvor och hjul även kan kategoriseras i kurvor och hjul som inducerar hög nötning respektive hög sprickbildning.

Metamodellerna, som studien till stor del bygger på, är definierade enligt vissa villkor. Detta begränsar användningsområdet. För att ytterligare öka användbarheten kan man i framtiden kan bredda verktygsområdet genom att till exempel ta hänsyn till fler skadetyper samt fler skademekanismer. En sådan utvidgning vore att även inkludera nötning och sprickbildning på hjulets löpbana och rälhuvudet. Metamodeller för en sådan analys finns framtagna [12]. För det framtagna skademåttet SKBM rekommenderas att modellens zoner för nötning och utmattning förfinas och att viktningen mellan dessa studeras djupare.

Under studiens gång identifierades viktiga variabler och deras inverkan på nedbrytningen av järnväghjul och räl kvantifierades. Kurvradien konstaterades vara en central parameter för både nötning och utmattning medan spårviddsändring endast visade på inverkan hos utmattning.

En viktig variabel för uppkomsten av hjulskador är hjulprofilgeometrin. Denna studie visar på hur en analys av hjulprofilerna kan användas för att identifiera och åtgärda de mest skadliga hjulen. I ett framtida arbete kan geometriska målprofiler med hjälp av analyser liknande de i denna studie situationsanpassas för att minska nötning och sprickbildning. Till exempel kan målprofiler för höghastighetståg och för tungt lastade godståg skilja väsentligt.

Vid analys av kurvorna noterades en markant skillnad i predikerat skadeutfall mellan höger- och vänster-kurvor. Bakomliggande faktorer till detta bör analyseras vidare för att komma underfund med möjliga orsaker.

Litteraturförteckning

- [1] Andersson, E. & Berg, M. (2007). *Spårtrafiksystem och spårfordon. D. 1, Spårtrafiksystem*. Stockholm: KTH.
- [2] Arvidsson Thonäng, K. (2011). *Den svenska järnvägen - om orsakerna och kostnaderna för bristfällig politik*. SEKO. http://seko.se/Global/PDF'er/den_svenska_jarnvagen_om_orsakerna_och_kostnaderna_for_bristfallig_politik.pdf, 44s
- [3] Bergström, F. (2013). *Är järnvägen på rätt spår?* WSP Group. http://www.wspgroup.com/Documentsn/pdf/pdf-rapporter/WSP_Jarnvagsrapport_1.pdf (2013-06-27), 10s
- [4] Burstow, M C. (2004). *Whole life rail model application and development for RSSB – continued development of an RCF damage parameter*. London, UK: Rail Safety & Standards Board: 74 pp.
- [5] Deuce, R D. (2007). *Wheel Tread Damage – An Elementary Guide*. Bombardier Transportation, 38 pp
- [6] Ekberg, A. (2014). *Några noteringar om järnvägssäkerhet*. Chalmers Tekniska Högskola (CTH). <http://www.charmec.chalmers.se/FactFlash/>
- [7] Ekberg, A, Kabo, E och Andersson, H. (2002). *An engineering model for prediction of rollin contact fatigue of railway wheels*. Fatigue and fractures of Eng. Materials and structures. Vol 25, N10, 899-909.
- [8] Frick, A. (2005) *Katalog över rälsfel, BVH 524.100*. Banverket.
- [9] Harker, M., O'Leary, P., & Zsombor-Murray, P. (2008). *Direct type-specific conic fitting and eigenvalue bias correction*. Image and Vision Computing, 26(3), 372-381. doi:10.1016/j.imavis.2006.12.006
- [10] Karttunen, K. (2015). *Estimation of gauge corner and flange root degradation from rail, wheel and track geometry data*.
- [11] Karttunen, K. (2012). *Mechanical track deterioration due to lateral geometry irregularities*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola – Avdelningen för Tillämpad Mekanik, Licentiatavhandling.
- [12] Karttunen, K., Kabo, E., Ekberg, A. (2014). Numerical assessment of the influence of worn wheel tread geometry on rail and wheel deterioration. Wear, vol. 317, no. 1-2, pp. 77-91.
- [13] Lewis, R et al. *Wheel-rail interface handbook*. University of Sheffield, UK (2009). 856 s.
- [14] Lewis, R, Dwyer-Joyce R. (2004). *Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels*. Proceedings of the Institution of Mech.Engineers, Part J. Journal of Eng. Tribology.
- [15] Pålsson, B. och Nielsen, J. (2012). *Wheel-rail interaction and damage in switches and crossings*, Vehicle System Dynamics, vol. 50(1), pp. 43-58-163s.
- [16] Stichel, S. (2004). *Ökade laster med hänsyn till spårnedbrytning*. Stockholm: KTH – Avdelningen för järnvägsteknik, 26s.
- [17] Stichel, S. et al. (2008) *Investigation of the risk for rolling contact fatigue on wheels of different passenger trains*, Vehicle System Dynamics. Vol 46, 317-327.
- [18] Trafikverket (2013). *Förslag till nationell plan för transportsystemet 2014–2025*. Underlagsrapport – drift, underhåll och reinvesteringar. Trafikverket. Hämtad 2015-02-10 från http://www.trafikverket.se/contentassets/9e147d1421b14ee9ae83003c9f15617c/underlagsrapport_drift_underhall_och_reinvesteringar.pdf, 164s
- [19] Trafikverket (2014) *Genomförda underhållsåtgärder 2011-2013*. Trafikverket. Hämtad 2015-02-17 från <http://www.trafikverket.se/Aktuellt/Fragor-i-fokus-om-Trafikverket/Underhall--sakerhet-pa-jarnvagen/Mobila-tjanster/Statistik-och-fakta-om-underhall-och-sakerhet-pa-jarnvag/Genomforda-underhallsatgarder-2011-2013/>
- [20] WSP (2014). *Inventering, uppdatering och sammanställning av effektsamband inom investering, trafikering och drift och underhåll på järnväg*. Trafikverket. Hämtad 2015-03-07 från http://www.trafikverket.se/PageFiles/154132/rapport_sek_effektsamband_140331.pdf, 54s.

- [21] Zuyev, S. et al. (2012) *Introduction to Probability and Matematical Statistics VLE Study Guide*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola - Institutionen för Matematiska vetenskaper. 99-109s

Muntliga källor:

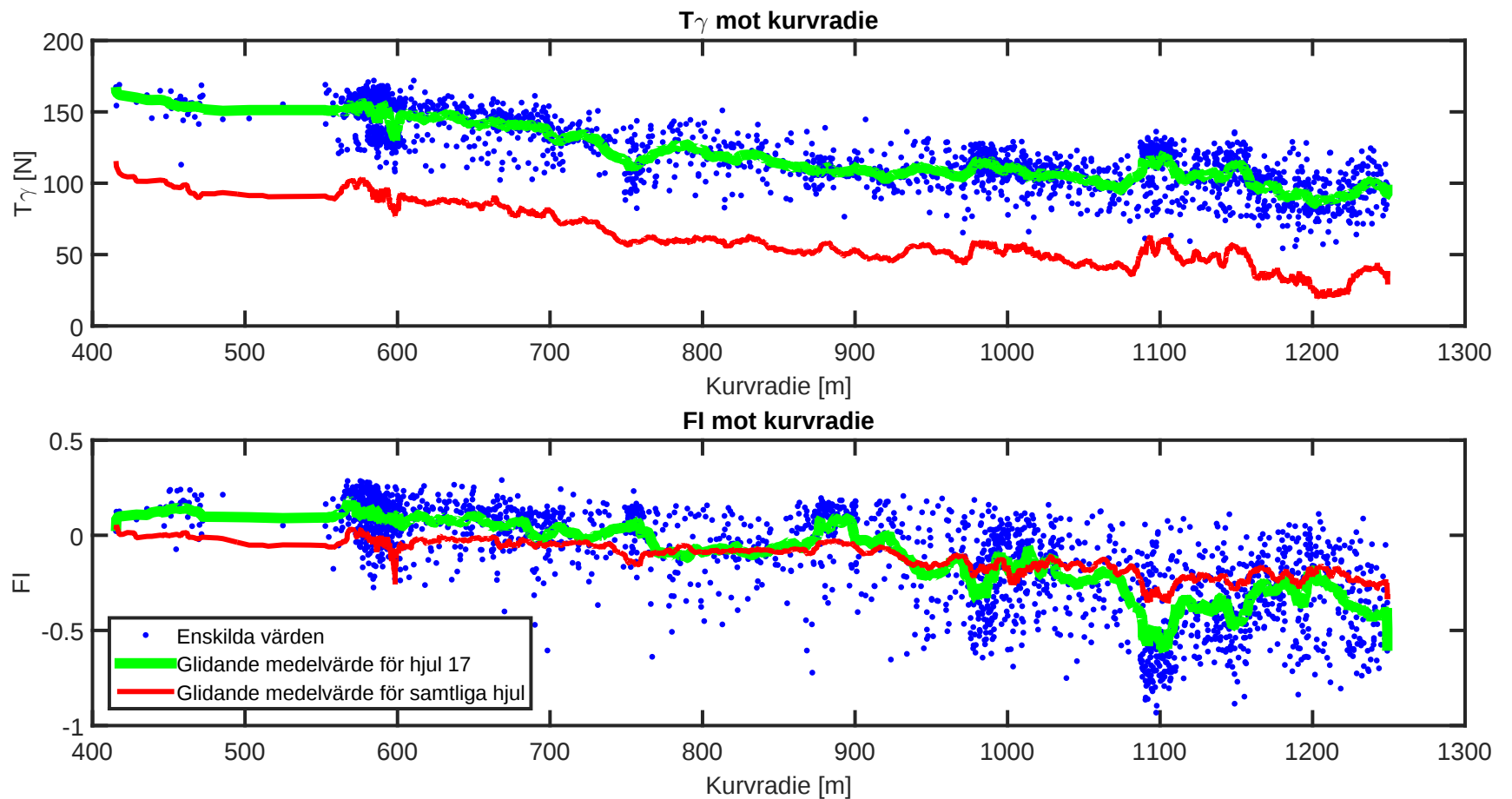
Karttunen Kalle, doktorand, Chalmers tekniska högskola.

Nissen Arne, Spårtekniker, Trafikverket.

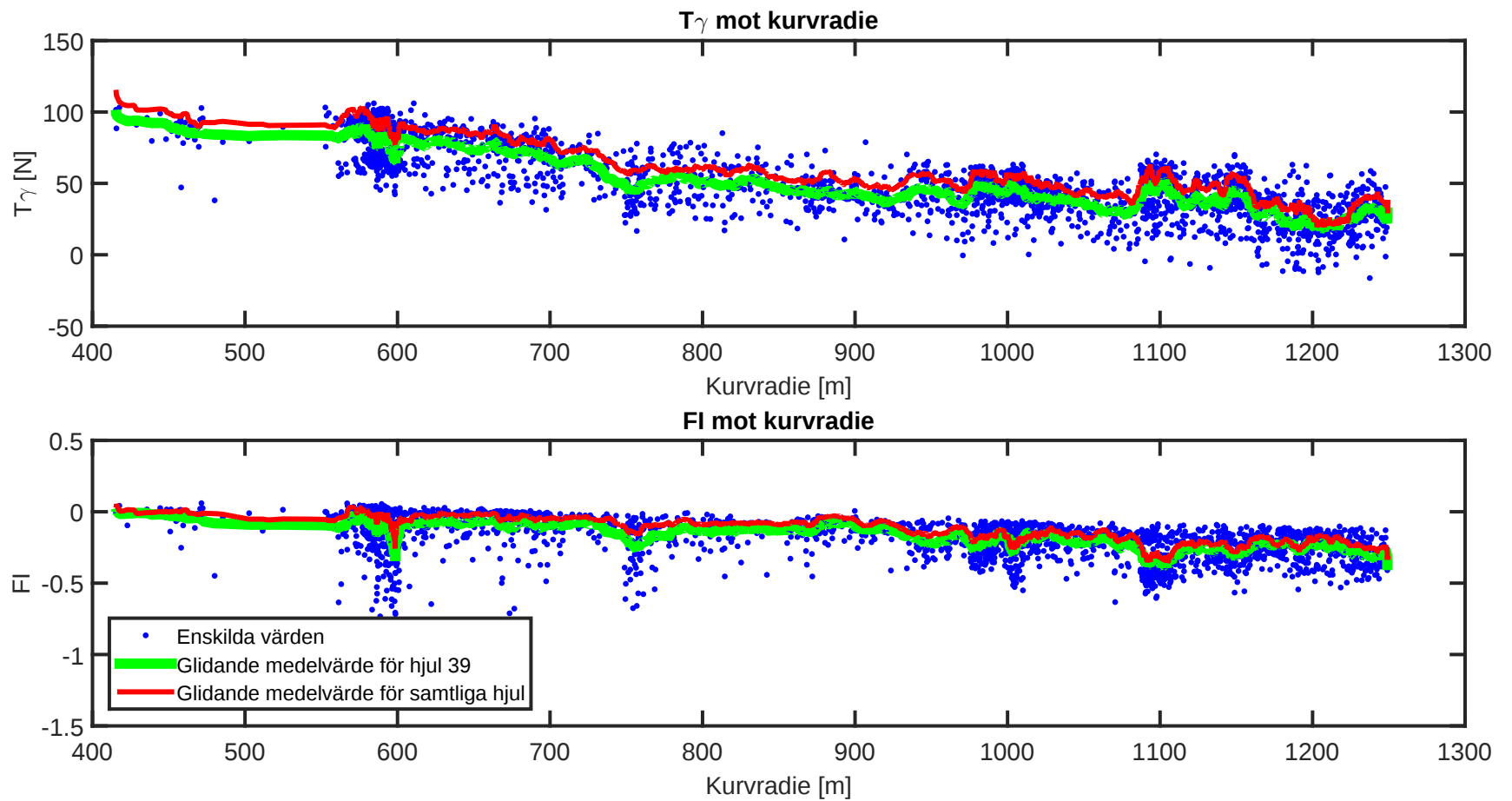
Karlsson Carl-Åke, Nationell samordnare, Trafikverket.

Bilagor

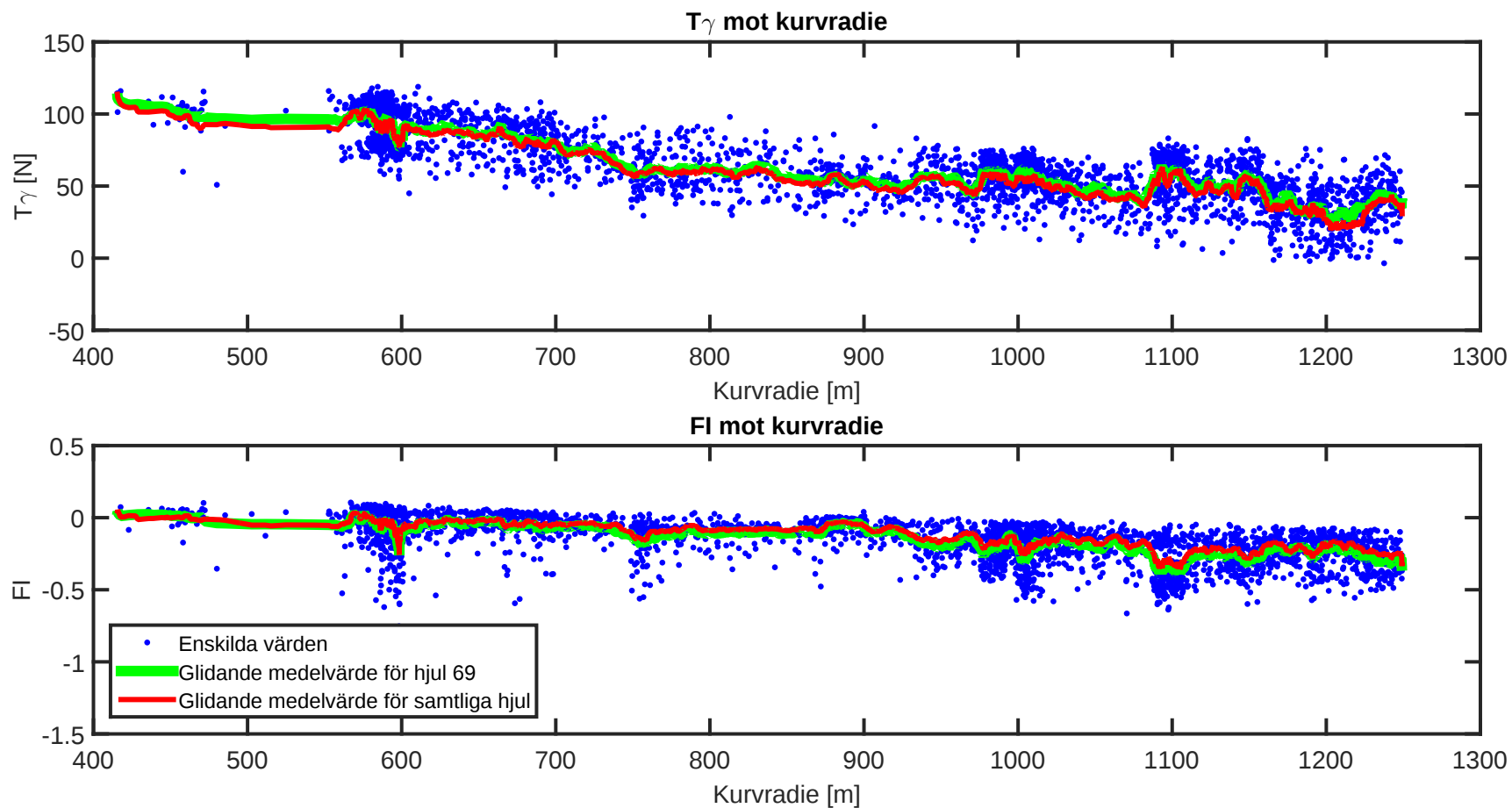
A Korrelation mellan T_γ och FI mot kurvradie för utvalda hjul



Figur A.1: T_γ och FI mot kurvradie, hjul 17

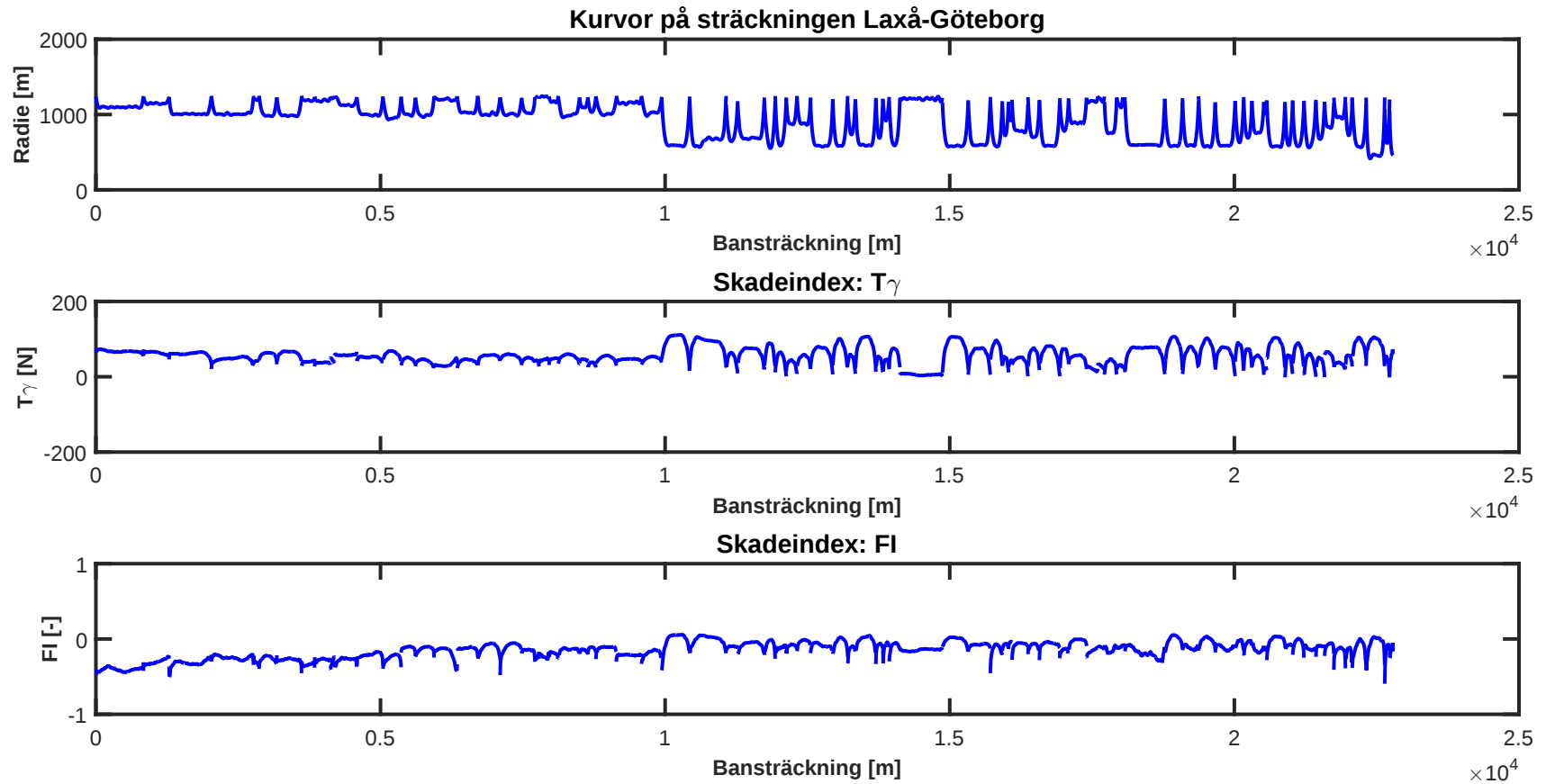


Figur A.2: $T\gamma$ och FI mot kurvradie, hjul 39



Figur A.3: $T\gamma$ och FI mot kurvradie, hjul 69

B T_γ och FI för bansträckningen



Figur B.1: T_γ och FI för bansträckningen

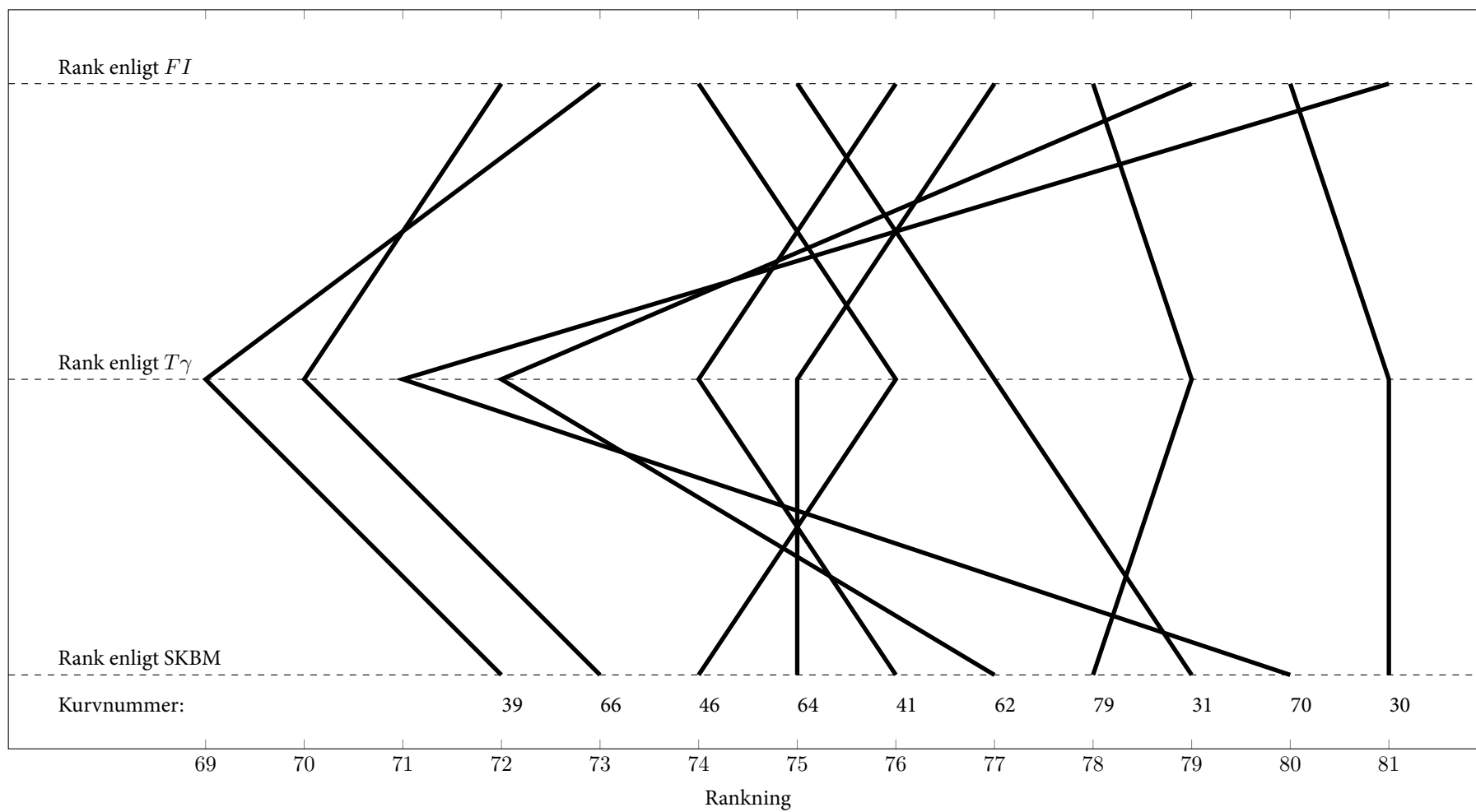
C Rangordning av kurvor baserad på SKBM, FI och T_γ magnituder

Tabell C.1: Rankning av kurvor.

Kurva	Rank SKBM	Rank FI	Rank T_γ	Radie [m]	Sektion	Spårviddsändring	Höger vänster	Slipningar
30	81	80	81	568	612	5 983	1	2
70	80	81	71	556	612	6 399	1	2
31	79	75	77	556	612	8 455	1	1
79	78	78	79	400	601	7 060	1	1
41	77	76	74	562	612	6 885	1	2
62	76	79	72	568	612	7 812	1	3
64	75	77	75	556	612	8 037	1	3
46	74	74	76	521	612	10 113	1	3
39	73	73	69	575	612	7 584	1	2
66	72	72	70	625	612	5 177	1	2
78	71	69	80	543	601	7 463	1	1
72	70	70	68	581	612	7 220	1	2
34	69	71	78	549	612	9 937	1	1
67	68	67	67	704	612	4 701	1	1
48	67	65	73	575	612	9 526	1	3
55	66	68	35	833	612	3 696	1	1
52	65	64	65	694	612	8 266	1	2
53	64	62	61	556	612	5 815	0	1
54	63	53	63	746	612	5 574	1	1
63	62	50	64	532	612	8 307	0	3
61	61	54	58	581	612	7 798	0	3
38	60	55	57	532	612	7 458	0	2
37	59	66	33	847	612	5 976	1	2
44	58	57	66	549	612	10 308	0	1
65	57	61	60	575	612	5 776	0	3
47	56	44	56	568	612	9 801	0	3
33	55	38	53	649	612	9 971	0	1
81	54	63	59	467	601	3 744	0	0
35	53	60	62	588	612	9 447	0	2
75	52	51	49	806	612	5 774	1	1
50	51	58	6	909	612	9 103	1	2
71	50	47	50	575	612	6 830	0	2
43	49	59	18	893	612	9 097	1	1
32	48	52	55	633	612	9 187	0	1
1	47	8	54	1020	512	15 574	1	2
19	46	56	37	962	611	13 083	1	3
73	45	39	44	562	612	7 116	0	2
18	44	49	42	926	611	14 664	1	2
77	43	33	43	725	601	9 036	0	1
80	42	45	36	588	601	4 766	0	1
13	41	12	52	909	512	14 202	1	1
2	40	15	51	1111	512	14 553	1	2
51	39	34	16	758	612	8 747	0	2
40	38	27	45	725	612	7 379	0	2
49	37	35	19	725	612	9 322	0	2
7	36	9	46	926	512	14 016	1	2
68	35	46	32	725	612	3 175	0	1
6	34	13	47	943	512	13 586	1	2
27	33	42	31	962	611	14 317	1	2
74	32	37	20	676	612	7 127	0	2
3	31	1	48	943	512	13 253	0	2
42	30	40	39	658	612	6 571	0	2
24	29	29	38	943	611	13 888	1	2

Fortsättning på tabell C.1

Kurva	Rank SKBM	Rank FI	Rank T_γ	Radie [m]	Sektion	Spårviddsändring	Höger vänster	Slipningar
36	28	43	11	847	612	3 180	0	2
14	27	20	30	962	512	13 678	0	1
58	26	48	40	735	612	6 916	0	1
11	25	14	41	1087	512	14 727	1	1
20	24	17	29	962	611	13 115	0	2
29	23	31	28	980	612	5 252	0	1
17	22	23	21	962	611	14 611	0	3
12	21	10	34	980	512	13 622	0	1
25	20	26	14	1064	611	14 684	1	2
15	19	21	26	943	512	13 978	0	1
60	18	41	3	1111	612	2 165	1	1
23	17	19	22	1087	611	15 136	1	2
59	16	36	7	1111	612	3 593	1	1
22	15	18	25	1190	611	14 645	0	2
57	14	32	4	1111	612	10 289	1	1
4	13	2	27	962	512	13 799	0	2
28	12	11	23	1111	611	13 878	0	2
26	11	22	5	1020	611	14 633	0	2
76	10	24	13	926	601	9 202	0	1
10	9	6	15	1190	512	15 529	1	3
21	8	7	17	1190	611	15 637	1	2
5	7	3	10	1163	512	13 401	1	2
16	6	30	12	1111	512	14 069	1	1
8	5	4	9	1136	512	14 429	0	2
9	4	5	8	1111	512	14 818	0	2
69	3	25	24	962	612	5 691	0	2
56	2	16	2	1064	612	10 704	0	1
45	1	28	1	1111	612	11 104	0	1



Figur C.1: Visualisering av rankning för 10 stycken kurvor som rangordnats som sämst.