



Forskningsrapport 2007:11

Realtidsanalys av utmattningspåkänning från uppmätta spårkrafter

ANDERS EKBERG
ELENA KABO

Institutionen för Tillämpad mekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2007

Forskningsrapport 2007:11

Realtidsanalys av utmattningspåkänning från uppmätta spårkrafter

av

**ANDERS EKBERG
ELENA KABO**

Institutionen för Tillämpad mekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2007

Realtidsanalys av utmattningspåkänning från uppmätta spårkrafter

ANDERS EKBERG, ELENA KABO

© ANDERS EKBERG, ELENA KABO, 2007

Forskningsrapport 2007:11
ISSN 1652-8549

Institutionen för Tillämpad mekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Tel. +46 (0)31 772 1000

Realtidsanalys av utmattningspåkänning från uppmätta spårkrafter

Anders Ekberg & Elena Kabo
CHARMEC

30 december 2007

Denna rapport sammanfattar arbetet med utmattningsprediktering inom CHARMEC-projektet SP11 – VERTIKALA KRAFTER PÅ HÖGHASTIGHETSTÅG. Detaljerade redovisningar på engelska ges i de två rapporterna [1, 2]. Kortfattat är de viktigaste resultaten av denna projektdel att ett kriterium som kan användas för att kvantifiera rullkontaktutmattningspåkänningen vid fältmätningar av hjul-räl-krafter har utvecklats. Dessutom har inverkan av enstaka höga kontaktkrafter analyserats. Varningsnivåer för kontaktkrafter med avseende på olika former av utmattning har getts.

Innehåll

1	Bakgrund	2
2	Kontinuerligt höga vertikala kontaktkrafter t.ex. orsakade av rälkorrugering	2
3	Enstaka höga kontaktkrafter t.ex. orsakade av rälskarvar	3
4	Rekommenderade larmnivåer för uppmätta spårkrafter	4
4.1	Kontinuerligt höga kontaktkrafter	5
4.2	Enstaka högre kontaktkrafter	5
5	Framtida studier	6

1 Bakgrund

I CHARMEC-projektet SP11 – VERTIKALA KRAFTER PÅ HÖGHASTIGHETSTÅG ingår analys av uppmätta kontaktkrafter med avseende på deras utmattningspåverkan. Denna rapport beskriver kortfattat vad som gjorts inom detta område.

Arbetet har fokuserat på två typer av höga vertikala kontaktkrafter. Den ena typen är en kontinuerligt hög påkänning till exempel orsakad av trafikering på korrugerad räl. Den andra aspekten är inverkan av enstaka höga lastnivåer, till exempel vid passage av en rälsskarv.

2 Kontinuerligt höga vertikala kontaktkrafter t.ex. orsakade av rätkorrugering

Vid trafikering på korrugerad räl, eller på spår med dålig geometri fås en stor variation i kontaktkrafter. Speciellt fås en relativt hög andel belastningar med mycket hög påkänning. Dessa kan orsaka utmattningssprickor i hjul och räls. Spårkraftsmätningar med hög samplingsfrekvens utförda med mätvagnar, ger en god bild av kraftspektrat. Dock fanns tidigare ingen möjlighet att översätta detta kraftspektra till motsvarande utmattningspåkänning.

Ett kriterium för rullkontaktutmattning initierat under ytan har tidigare tagits fram inom CHARMEC och finns implementerat i analyspaketet FIERCE. Då detta kriterium kräver att kontaktytans storlek är känd lämpar det sig främst för prediktering i anslutning till numeriska simuleringar. Detta index kan skrivas som

$$FI_{\text{sub}} = \frac{F}{4\pi ab} (1 + \mu^2) + a_{\text{DV}} \sigma_{\text{h,res}} \quad (1)$$

Där F är vertikallasten, a och b hertzkontaktens halvaxlar, $\mu = F_{\text{lat}}/F$ är traktionskoefficienten med F_{lat} som den laterala kraften, a_{DV} är en materialparameter och $\sigma_{\text{h,res}}$ den hydrostatiska delen av residualspänningen. Rullkontaktutmattning beräknas ske då FI_{sub} överskrider materialets utmattningsgräns i skjuvning (vridning). Utmattningsgränsen skall här reduceras med avseende på materialdefekters inverkan.

I denna studie har indexet i ekvation 1 förenklats. Inverkan av traktionen visades vara maximalt 9% under de förhållanden som är intressanta och försummas därför. Experimentella data tyder på att den potentiellt gynnsamma inverkan av de kompressiva residualspänningar som förekommer strax under ytan i hju och räl inte finns,. Därför har även termen $a_{\text{DV}} \sigma_{\text{h,res}}$ försummats. Därutöver användes Hertz kontaktteori för att uttrycka de okända parametrarna a och b i hjul- och räl-radien.

Resultatet blev det förenklade utmattningsindexet [1]

$$FI_{\text{simp}} \equiv 1.3887 \cdot 10^6 \cdot \frac{\sqrt[3]{F \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^2}}{mn} \quad (2)$$

θ [°]	m [-]	n [-]
30°	2.731	0.493
35°	2.397	0.530
40°	2.136	0.567
45°	1.926	0.604
50°	1.754	0.641
55°	1.611	0.678
60°	1.486	0.717
65°	1.378	0.759
70°	1.284	0.802
75°	1.202	0.846
80°	1.128	0.893
85°	1.061	0.944
90°	1	1

 Tabell 1: Värderna av m och n för varierande θ . Från [3].

där R_1 [m] är hjulradien och R_2 [m] räls huvudets radie vid kontaktpunkten. Parametrarna m och n räknas fram via de två hjälpparametrarna

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

och

$$B - A = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} \right)^2} - \frac{2}{R_1 R_2} \quad (4)$$

Om man med hjälp av dessa utvärderar θ genom förhållandet

$$\cos \theta = \frac{B - A}{A + B} \quad (5)$$

fås m och n från tabell 1.

Jämförelser mellan FI_{simp} och FI_{sub} visar att man, för de studerade fallen, får en mycket god överensstämmelse mellan de bägge indexen om rälradien väljs något mindre än den verkliga radien. För det studerade fallet med trafikering i 200 km/tim på ett korrugerat rakspår blev skillnaden i predikterade 95% fraktiler av FI_{simp} och FI_{sub} mindre än 5% om rälradien 0.29 m användes (nominell radie är 0.3 m) [1].

3 Enstaka höga kontaktkrafter t.ex. orsakade av rälskarvar

En studie som behandlar vilken utmattningspåkänning man får av höga transienta laster presenteras i [2]

Den första frågeställningen är huruvida enstaka höga lastnivåer med magnitud F_{trans} påverkar tillväxten av rullkontaktutmattningssprickor i järnvägshjul jämfört med en belastning med enbart nominella lastnivåer F_{nom} . En analys visade att om ökningen i spricktillväxt skall överstiga x procent, så måste transienta belastningar inträffa inom ett minsta avstånd, L , vilket ges av

$$L \leq \frac{d}{x} \cdot \left(\frac{F_{\text{trans}}}{F_{\text{nom}}} \right)^{m_{\text{II}}} \quad (6)$$

Här är d det segment av hjulets löpbana inom vilket en last måste verka för att belasta den tänkta sprickan under löpbanan, m_{II} är en materialparameter.

Insättning av rimliga värden i ekvation 6 indikerar att transienta laster måste upprepas i storleksordningen var femte meter för att ge en inverkan på spricktillväxthastigheten. Detta innebär att de normalt inte påverkar tillväxthastigheten av rullkontaktsprickor i järnvägshjul. Däremot kan de ha en effekt i att reducera utmattningsgränsen så att även lägre lastnivåer bidrar till utmattningsskadan. Dessutom sker slutbrott normalt till följd av en överlast.

Fokus vändes nu mot utmattning av räls. Mätningarna identifierar höga lastnivåer relaterade till spårfel. Räls materialet invid spårfelet kommer att belastas hårt vid varje hjulpassage. Detta innebär att rälsutmattning på grund av de uppmätta ”enstaka” belastningarna är en reell risk.*

Initiering av rullkontaktutmattningssprickor under ytan i räl studerades med hjälp av det kriterium som beskrivs i avsnitt 2. Tillåtna vertikalkraftsnivåer om utmattningsinitiering skall undvikas visade sig vara kraftigt beroende av antagen utmattningsgräns, men ligger i storleksordningen $F_{\text{till}} \approx 175$ till 250 kN.

Utifrån samband som tagits fram i en tidigare studie om larmgränser för hjulplattor [4] analyserades därefter tillväxten av stora sprickor i räler. Spänningsintensitetsfaktorer för ”headcheck-sprickor” i rälhuvud och kantsprickor i rälfot hos UIC60- och BV50-räler presenterades som funktioner av spricklängd och lastnivå. Kantsprickor i foten visar sig vara mest känsliga för belastningsnivån. Risken för initiering och tillväxt av sådana studerades därför vidare. En dimensionering mot utmattningsgränsen resulterade i en tillåten belastning $F_{\text{till}} \approx 230$ kN för BV50 räl och $F_{\text{till}} \approx 250$ kN för UIC60 räl. En dimensionering mot spricktillväxt ($\Delta K_{\text{I}} < \Delta K_{\text{th}}$) för en två millimeter djup spricka resulterade i tillåtna belastningar $F_{\text{till}} \approx 200$ kN för BV50 räl och $F_{\text{till}} \approx 220$ kN för UIC60 räl. Notera att dessa värden inte tar hänsyn till den ytterligare belastning som fås på grund av dragspänningar som uppkommer då rältemperaturen ligger under den spänningsfria temperaturen i ett helsvetsat spår.

4 Rekommenderade larmnivåer för uppmätta spårkrafter

Dessa rekommendationer är en första uppskattning baserad på de simuleringar som redovisas i rapporterna [1, 2]. I ett verkligt fältmättningsfall kommer ett antal övriga störkällor att spela in

*Förenklat uttryckt: Det som hjulet uppfattar som en enstaka belastning på grund av ett spårfel uppfattar rälsektionen som den ”normala” belastningen vid varje hjulpassage.

(såsom ytterligare belastning orsakad av långvågiga spårfel). Allteftersom man får ökad erfarenhet av fältmätningar lär man kunna definiera bättre gränsvärden. Värdena nedan skall alltså ses som en första ”kvalificerad gissning” i en iterativ process. Den stora fördelen med den utförda studien i en sådan process är att alla värden är motiverade och baserade på beräkningar med, mer eller mindre, osäkra variabler. Med ökad kunskap kan variablernas värden ändras och motsvarande reviderade gränsvärden beräknas.

Notera även att gränsvärdena är för ett ”värsta belastningsfall”. Vid fältmätningar används ett tåg som kan ha lägre axellast eller lägre hastighet än det värsta belastningsfallet. Detta kräver korrigerande av lamnivåerna. Denna fråga diskuteras ytterligare i avsnittet 5 nedan.

Förutom jämförelse mot gränsvärde är även nivåernas utvecklingen med tiden intressant. Med regelbundna spårkraftsmätning kan man till exempel följa tillväxt av korrugering och nedkörning av isolskarvar så att underhåll kan planeras i god tid.

4.1 Kontinuerligt höga kontaktkrafter

Nivåer då orsak bör undersökas:

- Släpande 95% percentilvärde av $FI_{\text{simp}} \gtrsim 195$ MPa.
- Upprepade värden omkring $FI_{\text{simp}} \gtrsim 210$ MPa.

Nivåer då underhåll bör sättas in omgående

- Släpande 95% percentilvärden av $FI_{\text{simp}} \gtrsim 210$ MPa.

4.2 Enstaka högre kontaktkrafter

Nivåer då orsak bör undersökas (om de inte redan är kända):

- BV50: $F \gtrsim 190$ kN.
- UIC60: $F \gtrsim 210$ kN.

Nivåer då underhåll bör sättas in omgående

- BV50: $F \gtrsim 240$ kN.
- UIC60: $F \gtrsim 250$ kN.

Notera att dessa kraftnivåer förutsätter att spårkrafternas högfrekventa innehåll inkluderas i mätningen. Inte heller tas hänsyn till den ytterligare belastning som fås på grund av inverkan av temperaturer under den spänningsfria temperaturen.

5 Framtida studier

Under arbetets gång har ett antal viktiga punkter till förbättringar dykt upp. Dessa har inte rymts inom ramen för det nuvarande projektet, men tillför väsentliga förbättringar för praktisk användning av de analysprinciper som läggs fram här. Det är därför en stark rekommendation att dessa aspekter studeras mer ingående i ett framtida projekt.

1. Analys av rullkontaktutmattningspåkänning vid kurvtagning och i spår med mer långvägiga spårfel.
Som nämns i [1] ger sådana driftsförhållanden en kontakt närmre rälskuldran. Beroende på hjulets position i sidled kommer därför rälradien i kontaktpunkten att variera. Genom simuleringar eller mätningar bör man kunna koppla hjulets laterala position (eller ännu hellre sidoacceleration) till kontaktpunktens laterala position. Därifrån bör det gå att uppskatta den aktuella rälradien i kontaktpunkten och FI_{simp} kan bestämmas.
2. Översättning av mätresultat till annan hastighet och axellast.
Mätningarna utförs av ett tåg med en viss axellast och hastighet. Gränsvärdena ovan är däremot satta för värsta tänkbara belastningsfall. Det finns därför ett behov av att översätta uppmätta utmattningspåkänningar till driftsförhållanden med annan hastighet och axellast.
3. Temperaturens inverkan på rekommenderade larmgränser.
För temperaturer under den spänningsfria temperaturen fås en dragspänning i rälén p.g.a. den förhindrade rälsammandragningen. I en tidigare studie har temperaturspänningarnas inverkan på spänningsintensitetsfaktorn för sprickor i rälhuvud och rälfot kvantifierats [4]. Simuleringar visade att inverkan är stor för stora sprickor. Dock behövs anpassade simuleringar för att ta fram rekommenderade gränsvärden som tar hänsyn till temperaturspänningarnas inverkan.

Förutom dessa punkter finns ett antal områden där vi anser att den nuvarande kunskapen (i ett internationellt perspektiv) inte är tillräcklig. Exempel på sådana områden är:

1. En djupare förståelse av mekanismerna bakom hjulbrott orsakade av utmattningssprickor initierade under ytan och vilka parametrar som styr detta.
Kunskapen om initiering och tillväxt av rullkontaktutmattningssprickor i hjul och räl, samt kunskapen om rälbrott och hjulbrott orsakade av termisk belastning har på senare år utvecklats mycket. Däremot är kunskapen om hjulbrott (i detta ingår även den typ av slutbrott som orsakar små materialutfall) orsakade av utmattningssprickor initierade under ytan så gott som obefintlig.
2. Kvantifiering av påkänd zon under en kontaktlast.
Detta relaterar till parametern d i avsnitt 3. Denna är allmänt intressant för att kunna bedöma den nedbrytande inverkan av t.ex. hjulplattor och skarv- eller växelpassager.
3. Grundläggande kunskap om skadeackumulering i hjul och räl belastade under varierade driftsförhållanden.
Här kan mycket mer göras både i form av kontrollerade fält-/laboriestudier och i form av simuleringar. Viss kunskap förväntas inom EU-projektet INNOTRACK (www.innotrack.eu).

4. Bestämning av operativa utmattningsgränser och spridning i dessa för hjul och räl. Utmattningsgränser skall här tolkas i en vid mening och innefattar såväl rullkontaktutmattning (initierad i eller under ytan), som ”vanlig” utmattning. En hel del arbete har gjorts, men det behövs en sammanställning och kompletterande arbeten för att ta fram operativa utmattningsgränser som tar hänsyn till spridning i materialegenskaper, miljöförhållanden, yträhet, m.m. Denna spridningen relaterar även till en kunskap om spridning i storlek hos initiala och/eller tillkomna defekter i materialet och på ytan.
5. Bestämning av spricktillväxtdata för hjul och räl. Här ingår såväl tröskelvärden för tillväxt, som materialparametrar i spricktillväxtlagar. Dessa bör ta hänsyn till effekter av höga tillfälliga laster och inverkan av miljö (vätskeinträngning).
6. Analys av spänningsintensitetsomfång för rälsprickor under olika driftsförhållanden. De initiala studier som finns behöver förbättras för att bättre kunna prediktera spricktillväxt och därigenom definiera underhållsintervall. Delvis bör detta kunna täckas in i fortsättningen av CHARMEC-projektet SP13–LARMGRÄNSER FÖR HJULSKADOR.
7. Bättre kunskap om nedbrytning på grund av höga lastnivåer vid passage av skarvar och växlar. För dessa komponenter gäller inte det antagande om halvoändliga kroppar som ligger bakom såväl Hertz kontaktteori, som de utmattningsindex som använts i analysen. Initiala studier finns i litteraturen och området studeras vidare, bland annat inom EU-projektet INNTRACK (www.inntrack.eu).

Tillkännagivande Detta arbete är finansierat av Banverket, diarienummer S 04-3080/AL50 och har utförts inom det nationella kompetenscentrumet CHARMEC, (www.charmec.chalmers.se). Ett speciellt tack till mellandagspersonalen på daghemmet Smörslottet som gjorde det praktiskt möjligt att färdigställa denna översiktsrapport.

Referenser

- [1] ELENA KABO & ANDERS EKBERG, **Index for real-time prediction of sub-surface initiated rolling contact fatigue in railway wheels**, *Chalmers Applied Mechanics*, Research report 2007:13, 12 pp, 2007.
- [2] ANDERS EKBERG & ELENA KABO, **The influence of vertical load transients on wheel and rail deterioration**, *Chalmers Applied Mechanics*, Research report 2007:12, 20 pp, 2007.
- [3] TIMOSHENKO S P & GOODIER J N, **Theory of elasticity**, *McGraw-Hill*, Auckland, 567 pp, 1970.
- [4] JENS NIELSEN, ANDERS EKBERG & ELENA KABO, **Larmgräns för hjulskadedetektorer – En utredning av risk för rälbrott på Malmbanan**, *Chalmers Tillämpad mekanik*, Forskningsrapport 2007:05, 40 pp, 2007

Appendix – MATLAB-kod för bestämning av kontaktgeometri

```

% Contact geometry according to Hertz
clear all
THETA=[30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90];
M=[2.731, 2.397, 2.136, 1.926, 1.754, 1.611, ...
1.486, 1.378, 1.284, 1.202, 1.128, 1.061, 1.0];
N=[0.493, 0.530, 0.567, 0.604, 0.641, 0.678, ...
0.717, 0.759, 0.802, 0.846, 0.893, 0.944, 1.0];
F=200e3 % 200 kN
R1 = 0.44 % Wheel radius 0.44 m
R2 = [0.1:0.01:0.35]; % Rail radius from 0.1 to 0.35 m
i=0;
for r1=R1;
    i=i+1;
    j=0;
    for r2=R2;
        j=j+1;
        disp('radius = '),r2
        AB = (1./r1+1./r2)./2;
        BA = sqrt((1./r1).^2+(1./r2).^2-2./r1.*(1./r2))./2;
        theta = acos(BA./AB);
        theta = theta.*360./2./pi;
        m = interp1(THETA,M,theta)
        n = interp1(THETA,N,theta)
        c1 = m.*1.9e-4./(AB).^(1/3);
        c2 = n.*1.9e-4./(AB).^(1/3);
        a=c1*F^(1/3)
        b=c2*F^(1/3)
        C1C2(i,j)=c1.*c2;
    end
end
end
FIsub = F.^(1./3)./(4.*pi.*C1C2)
% Plot the result
figure(1)
cax=newplot;
set(cax,'FontName','Times','FontSize',14)
plot(R2,FIsub,'LineWidth',2)
xlabel('R_2')
ylabel('FI_{sub}') grid

```