

Skapat av (Efternamn, Förnamn, org)	DokumentID	Dokumentdatum
Spännar Jan	TDOK 2014:0410	2015-04-01
Fastställt av		Gäller från
Chef VO Underhåll		2008-01-28
Ersätter	Ersatt av	Version
BVH 1588	[Ersatt av]	1.0
Dokumenttitel		
BVH 1588 - Räfflor och Vågor - Tillståndsbedömning (Tersbanddiagram)		

Detta dokument ingår i Trafikverkets säkerhetsstyrningssystem för järnväg. Se särskilda regler för förvaltning av Säkerhetstillstånd.

Innehållsförteckning

Förord/Syfte.....	2
1 Omfattning	3
2 Hjälpmedel och referenser	3
2.1 Hjälpmedel	3
2.2 Referenser	3
Bindande referenser	3
Övriga referenser	3
3 Definitioner och förkortningar	4
4 Ansvar	4
5 Räfflor och vågor (RoV).....	5
5.1 Våglängd.....	5
5.2 Vågdjup	5
5.3 Tersbandsspektrum.....	7
6 Så finner du RoV-diagram.....	10
7 Diagrammets uppbyggnad	10
8 Mätssystemets tillförlitlighet	12
9 Rekommendationer vid tillståndsbedömning.....	12
9.1 Exempel på tillståndsbedömningar.....	13
Ändringslogg	15
Bilaga 1 Uppkomst av räfflor	16
Bilaga 2 Effekter av Räfflor och Vågor	18
Bilaga 3 Mätssystemets uppbyggnad.....	21
Bilaga 4 Brister i mätssystemet	22
Bilaga 5 Att åtgärda RoV - Spårslipning	27

DokumentID	Version
TDOK 2014:0410	1.0

Förord/Syfte

Räfflor och vågor (RoV) uppmäts cirka två gånger per år på Trafikverkets spår av mätvagnen Strix. År 2005 introducerades tersbandsdiagram som ett nytt sätt att redovisa RoV-mätningarna på. Dessa diagram ger en mer överskådlig och detaljerad bild över RoV-nivåerna än de äldre RoV-diagrammen gjorde. Diagrammen har varit uppskattade samtidigt som många upplevt dem som svårtolkade och efterlyst en tolkningshandbok. Därför har denna nya handbok tagits fram inom projektet *FUD spårteknik - ROV - Profil mätsystem*.

Syftet med handboken är att underlätta analys av tersbandsdiagram, som korrekt använda kan förenkla och förbättra bedömning av var spårslipning bör ske. Handboken fungerar som ett komplement till TDOK 2014:0485 (tidigare BVH 825.10) *Slipning av räler och spårväxlar* som beskriver Trafikverkets strategi för spårslipning.

Handboken vänder sig primärt till de spårtekniker som beslutar om och tillhandahåller underhållet av RoV på rälen.

Ansaret för att detta specificerande dokument är uppdaterat och implementerat ligger enligt arbetsordning på förvaltningsansvarig för den del i Trafikverkets ledningssystem som är angett i dokumentets egenskaper.

DokumentID TDOK 2014:0410		Version 1.0
------------------------------	--	----------------

1 Omfattning

Denna handbok är framtagen som ett stöd vid utvärdering av tersbandsdiagram för räfflor och vågor (RoV). I avsnitt 5 6 och 7 beskrivs RoV och tersbandsdiagram. Avsnitt 8 beskriver mätsystemets tillförlitlighet, vilket är viktigt att känna till. Slutligen ges i avsnitt 9 några riktlinjer för hur man utifrån RoV-diagrammen bör välja slipsträckor. I bilagor beskrivs uppkomst och effekter av RoV, mätsystemets uppbyggnad och åtgärder för RoV.

2 Hjälpmedel och referenser

2.1 Hjälpmedel

Inga hjälpmedel finns för detta dokument

2.2 Referenser

Bindande referenser

- [1] *TDOK 2014:0485 (tidigare BVH 825.10) Slipning av räler och spårväxlar*

Övriga referenser

- [2] *Nytt mätsystem för räfflor och vågor, BBS 2005/10* J. Spännar, Banverket
- [3] *ISO 3095:2005 Järnvägar – Akustik – Mätning av bulleremission från spårfordon* SIS, Swedish Standards Institute
- [4] *Analys av STRIX:s RoV-mätningars kurvaturberoende, BBS 2006/18*
S. Gripner, Banverket
- [5] *Out-of-Round Railway Wheels – Causes and Consequences* A. Johansson, ISBN 91-7291-641-9, Chalmers, 2005
- [6] *Modern Railway Track*
C. Esveld, ISBN 90-800324-3-3, Delft University of Technology, Holland, 2001
- [7] *Influence of short-pitch wheel/rail corrugation on rolling contact fatigue of railway wheels*
J. Nielsen, A. Ekberg, R. Lundén, Proc IMechE Vol 219, Part F s 177 – 187, 2005
- [8] *Utvärdering av RoV diagram på Södra stambanan*
P. Corshammar, M. Jonasson, J. Spännar, Rapport Södra Banregionen, 2005
- [9] A. Ekberg, Chalmers
Telefonsamtal 2007-04-18
- [10] *Spårkomponenters inverkan på RoV-mätningar med Strix, BBS 2007/2*
S. Gripner, Banverket
- [11] *Tillförlitlighet hos Strix RoV-system, LA-Spår 2007/2* S. Gripner, Banverket



DokumentID		Version
TDOK 2014:0410		1.0

3 Definitioner och förkortningar

Räfflor och vågor (RoV) används som beteckning för periodiska ojämnheter i längdled på rälhuvudets ovansida.

4 Ansvar

Ej relevant

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

5 Räfflor och vågor (RoV)

5.1 Våglängd

Räfflor och vågor delas in i följande våglängdsområden [1], [2]:

Räfflor	3 - 8 cm
Korta vågor	8 - 30 cm
Medellånga vågor	30 - 160 cm

I Figur 1 visas exempel på räfflor och vågor.



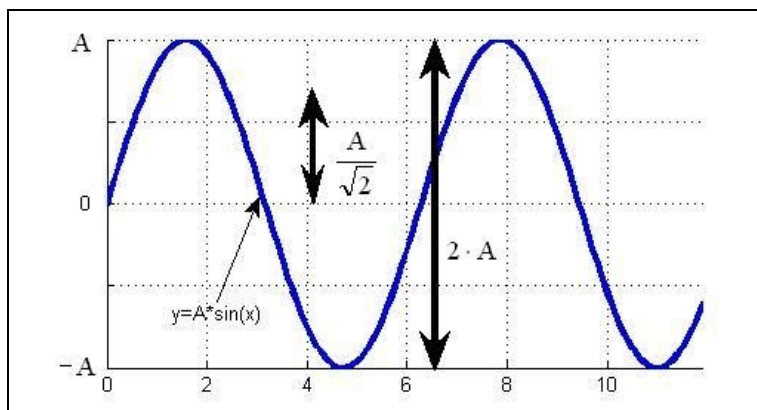
Figur 1. Till vänster räfflor och till höger vågor. Foto: Lennart Lundfeldt BV, Simon Gripner, BV

Mätvagnen Strix uppmäter RoV inom våglängdsområdet 2.2 - 35 cm, alltså räfflor och korta vågor enligt ovan. I fortsättningen används beteckningen RoV eller "räfflor och vågor" för det våglängdsområde som mäts av STRIX.

5.2 Vågdjup

Som mått på vågornas djup anges höjdprofilens rms värde, vilket motsvarar höjdprofilens standardavvikelse (root mean square). Ett annat mått på vågdjupet är höjdprofilens topp-tilltoppvärde. För en sinusformad våg sinusvåg med amplitud A , se figur 2, är topp-till-toppvärdet $2A$ och rms värdet $r_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}}$. För andra signaler finns inget allmänt samband mellan topp-till-toppvärde och rms värde.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------



Figur 2. Sinusvåg

I standarden ”Mätning av bulleremission från spårfordon” [3] definieras en decibelnivå L som:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{r_{rms}^2}{r_0^2} \right)$$

där L är RoV-nivån uttryckt i dB och $r_0 = 1 \mu\text{m}$ är en referensnivå.

Tabell 1. Exempel på vågdjup angivna som decibelnivåer och rms värden.

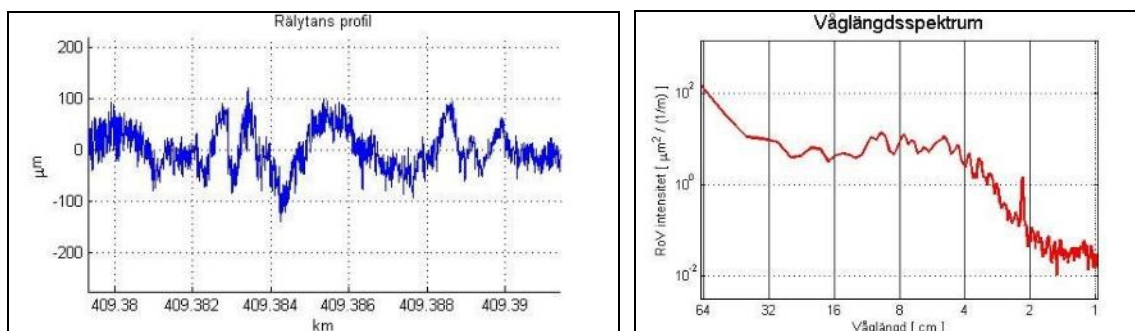
L (dB)	r_{rms} (μm)
-20	0,1
0	1
20	10
40	100

Vågdjupet för räfflor och vågor är vanligtvis av storleksordningen 1-100 μm .

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

5.3 Tersbandsspektrum

Rälytans höjdprofil kan ses som en funktion av positionen längs spåret. Denna höjdprofil är aldrig utan variationer. Med hjälp av grundläggande signalbehandling kan höjdprofilen beskrivas som en uppsättning av sinusvågor med olika våglängd och amplitud. Genom att genomföra en s.k. Fouriertransformation av höjdprofilen ges höjdprofilens spektrum. Spektrumet visar intensiteten för höjdprofilens olika våglängder, dvs. hur stor amplitud de olika våglängderna har. Ett exempel ges i Figur 3



Figur 3. Rälytans höjdprofil som funktion av positionen längs spåret (signalen) och rälytans innehåll av olika våglängder (spektrum).

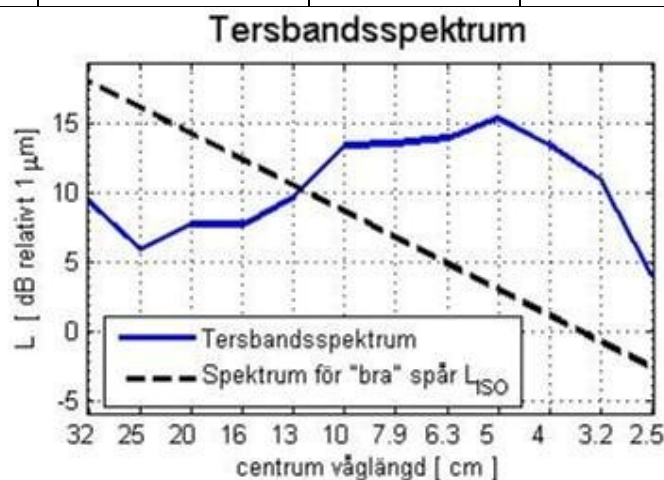
Spektrumet i figur 3 är som synes väldigt ”hackigt”. För att göra spektrumet mera läsbart kan spektrumet delas in i våglängdsband där intensiteten medelvärdesbildas inom banden. Ett vanligt sätt att presentera spektrum på är att dela in våglängdsskalan i tersband, som bland annat används inom ljud- och vibrationsläran. I Tabell 2 ges de olika våglängdsintervallen för tersbanden. I ISO-normen ”Mätning av bulleremission från spårfordon” [3] definieras en norm för spårets RoV-nivå som ett tersbandsspektrum L_{ISO} . Normen anger en tillåten RoV-nivå för spår där buller från spårfordon skall mätas, vilket här används som definition för ett ”bra” spår. I tabell 2 anges normens tillåtna RoV-nivåer för respektive intervall. I Figur 4 ges normen tillsammans med ett exempel på uppmätt tersbandsspektrum.

Tabell 1, Tersband med angivna intervall och tillåten RoV nivå enligt ISO-norm Error! Reference source not found..

Våglängdsmitt (cm)	Våglängdsintervall (cm)	Tillåten RoV nivå L_{ISO} för ”bra” spår enligt ISO-norm [3].	
		L (dB)	r_{rms} (μm)
2.5	2.2 – 2.8	-2.3	0.8
3.1	2.8 – 3.5	-0.5	0.9
4.0	3.5 – 4.5	1.4	1.2
5.0	4.5 – 5.6	3.2	1.4
6.3	5.6 – 7.1	5.1	1.8
8.0	7.1 – 8.9	6.9	2.2
10	8.9 – 11	8.8	2.8
13	11 – 14	10.6	3.4
16	14 – 18	12.4	4.2
20	18 – 22	14.3	5.2
25	22 – 28	16.1	6.4

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

32	28 – 35	18.0	7.9
----	---------	------	-----



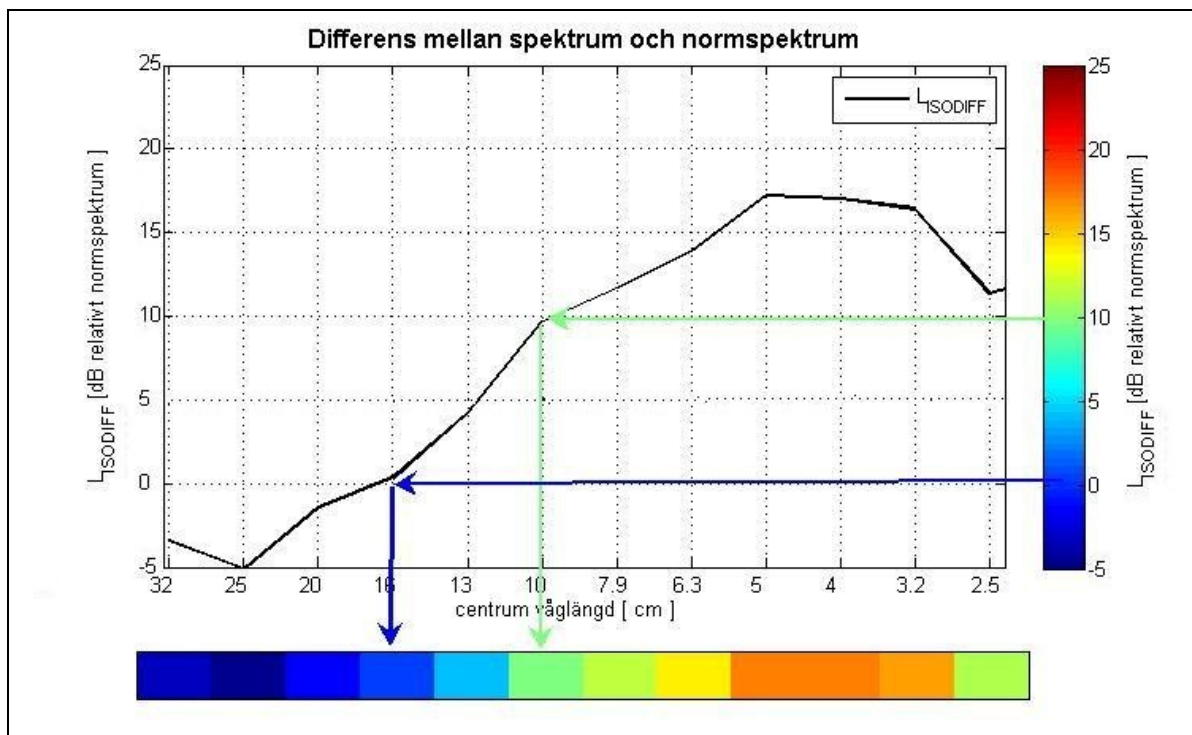
Figur 4. Tersbandsspektrum samt normvärden.

Genom att subtrahera normen från spektrumet, ges ett värde $L_{ISODIFF}$ som representerar hur spåret är relativt ett "bra" spår angivet i dB, se svart kurva i Figur 5.

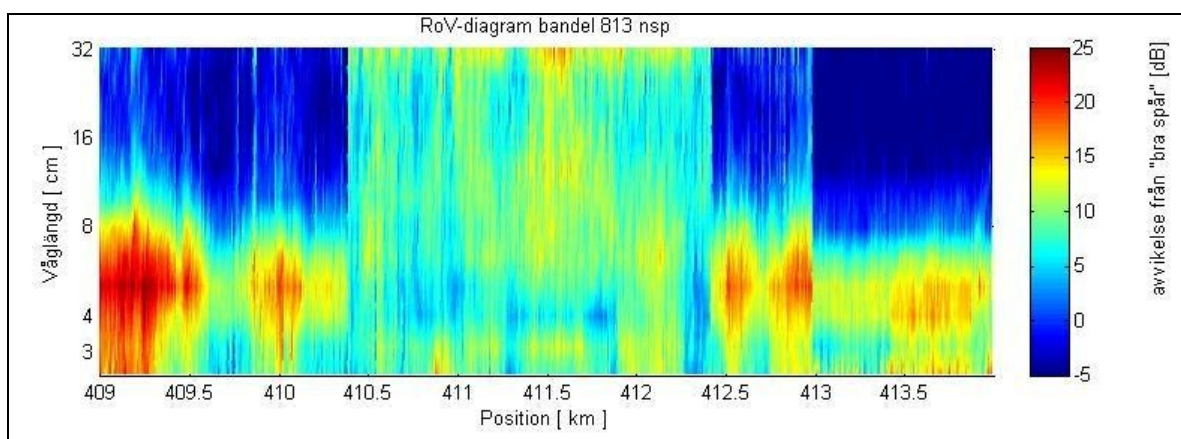
$$L_{ISODIFF} = L - L_{ISO}$$

Ett positivt värde innebär att spåret har en högre amplitud för den våglängden än ett "bra" spår. Värdena på $L_{ISODIFF}$ mellan -5 till 25 dB kan färgkodas enligt färgskalan till höger så att spektrumet representeras av ett färgat fält (nederst i Figur 5). Exempelvis betyder den gröna färgen vid 10 cm våglängd att RoV-nivån är 10 dB högre än vad som är "bra" och den klarblå (vid 16 cm) att RoV-nivån ligger precis på vad som är "bra". Genom att rita ut spektrum som färgade fält för var 10:e meter kan RoV-nivåerna åskådliggöras längs spåret, se Figur 6.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------



Figur 5. Kurvan visar skillnaden mellan spektrum och norm. För varje tersband färgkodas RoV-nivån enligt skalan till höger och visas som ett vågrätt färgat fält nederst längs våglängdsskalan.



Figur 6. Tersbandsdiagram längs spåret. För var 10:e meter längs spåret visas $L_{ISODIFF}$ som de vågräta färgade fälten från Figur 5.



DokumentID TDOK 2014:0410		Version 1.0
------------------------------	--	----------------

6 Så finner du RoV-diagram

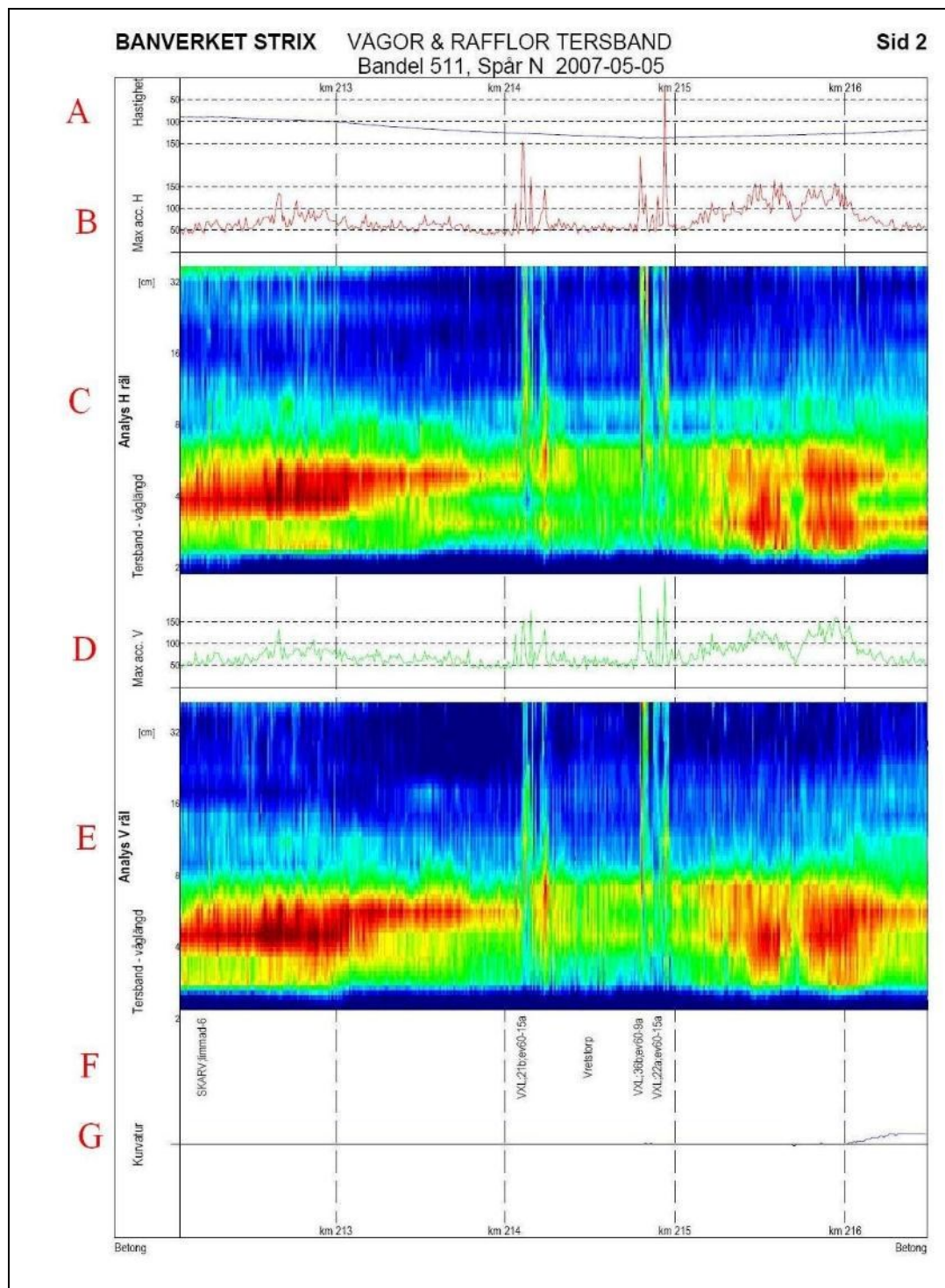
I dagsläget (2008) pågår arbetet med att installera programmet Optram. Då detta tagits i bruk kommer man att kunna studera och analysera RoV-diagrammen i programmet.

7 Diagrammets uppbyggnad

I Figur 7 visas ett exempel på ett tersbandsdiagram. Hela diagrammet följer spårets längdmätning i sidled (x-axeln), vilket markeras med km-tal överst och nederst. Samtliga kurvor har en upplösning på 10 meter (ett spektrum var 10:e meter).

- A. Överst visas mätvagnens hastighet i km/h.
- B. Nästa kurva visar största utslaget på accelerometern ovanför den högra rälen (sett i ökande km-tal).
- C. Tersbandsdiagrammet för högra rälen visas sedan som ett färgdiagram enligt avsnitt 5.3.
- D. Största utslaget på accelerometern ovanför den vänstra rälen (som B ovan).
- E. Tersbandsdiagrammet för vänstra rälen (som C ovan).
- F. Med vertikal text visas skarvar, växlar och stationsnamn. Dessa data kommer från ruttfiler som hämtats från BIS.
- G. Nederst visas kurvaturen. Oavsett mätvagnens körriktning så motsvaras positiva kurvaturvärden av högerkurvor i stigande km-riktning.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------



Figur 7. Exempel på tersbandsdiagram.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

8 Mätssystemets tillförlitlighet

Bristerna i Strix RoV-system, som beskrivs i bilaga 4, ger en viss mätosäkerhet. I [11] redovisas en statistisk undersökning av mätosäkerheten där uppmätta värden från STRIX jämförs med värden från manuella mätningar med en handdriven vagn, kallad CAT (Corrugation Analysis Trolley). Här fastslås att standardavvikelsen för mätfelet är 4.2 dB. Det innebär att ca. 35% av Strix mätvärden har ett mätfel som är större än 4.2 dB och 5 % har mätfel som är större än 8.4 dB.

På grund av denna mätosäkerhet ska Strix RoV-system enbart ses som ett indikeringsystem för var RoV-nivåerna är höga. För att uppmäta ett mer tillförlitligt mätvärde på RoV-nivån bör mätning ske med en handdriven vagn, till exempel CAT.

I rapporten fastslås även ett gränsvärde för hur små vågor som kan uppmätas med Strix till $L=5$ dB rel. 1 μm . Detta motsvarar ett rms-värde på $r_{rms}=1.8$ dB. I färgdiagrammen redovisas så små vågdjup endast som blåa nyanser för våglängder 2-7 cm.

9 Rekommendationer vid tillståndsbedömning

I detta avsnitt ges några riktlinjer för tillståndsbedömningen, det vill säga hur man väljer sträckor att slipa utifrån RoV-diagrammen. Nivåerna har valts så att risken för rullkontaktutmattning och befästningsbrott hålls låga, se bilaga 2, samtidigt som mängden slipsträckor blir rimligt stor utifrån RoV-nivåerna på [Banverkets](#) spår i dagsläget (2007). Se Tabell 3.

Tabell 3. Rekommenderade lägstanivåer för var spårslipning bör ske. Nivåerna skall ses som riktvärden och sättas i relation till de nedan uppspaltade parametrarna.

Kvalitetsklass	RoV-nivå då spårslipning bör ske (dB. rel. norm, färgkodad enligt skala)
K0	15
K1 – K2	20
K3 – K5	25

Nivåerna i Tabell 3 bör inte användas okritiskt vid utvärderingen. Följande parametrar är viktiga att tänka på:

- Spårslipning bör prioriteras banor med hög trafikbelastning.
- Spårslipning bör prioriteras då spåret löper nära bebyggelse där det är viktigare att reducera buller.
- Längre sammanhängande slipsträckor bör prioriteras högre än spridda kortare sträckor eftersom spårslipningen då blir mer kostnadseffektiv.
- Slipning genomförs inte bara för att minska RoV-nivån utan även för att justera rälnas tvärprofil, avlägsna materialdefekter, begränsa rälns ytutmattning med mera, se [1].

DokumentID		Version
TDOK 2014:0410		1.0

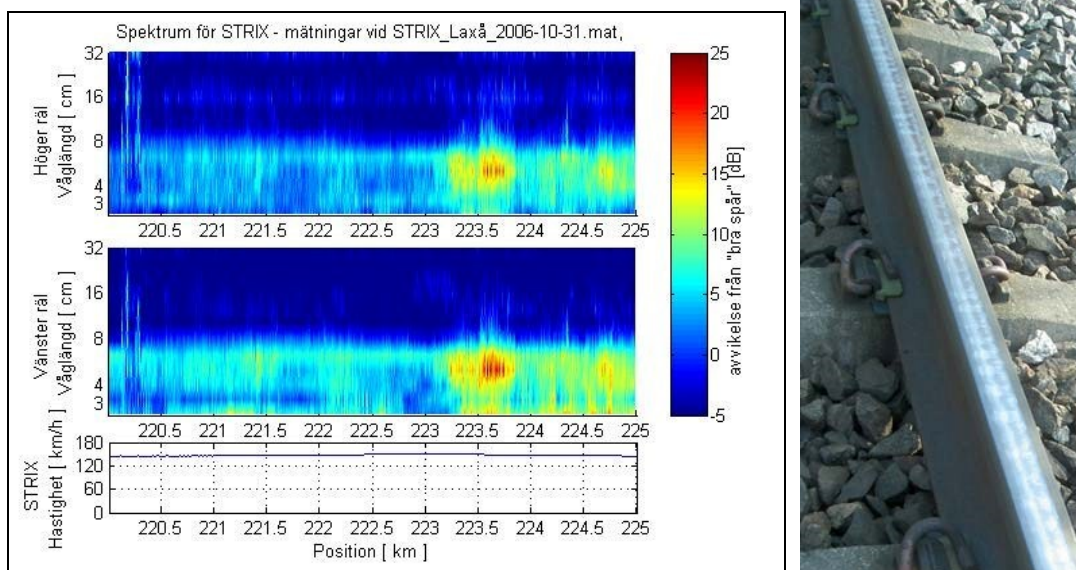
- Enligt avsnitt 8 har mätsystemet en viss mätosäkerhet. Därför bör mätresultaten enbart ses som ett indikeringsystem för var spårslipning skall ske.
- Observera att höga mätta RoV-nivåer kan vara felaktiga och bero på andra källor till vibrationer än RoV, se bilaga 4. Framförallt skarvspår och växlar ger upphov till felaktiga värden, därför bör inte diagrammen användas i dessa fall för att indikera RoV.
- Genom att jämföra senaste diagrammet med äldre för samma sträcka kan man få indikationer om mätdata eventuellt kan vara felaktig.

Tidigare har gränsvärdena för vad som bör slipas angivits som topp-till-toppvärden för våglängdsintervallen 3-30 cm och 30-100 cm. Topp-till-toppvärden är svåra att översätta till rms-värden och decibelvärden, särskilt då dessa våglängdsintervall är så stora.

9.1 Exempel på tillståndsbedömningar

Nedan ges några exempel på hur spåravsnitt kan bedömas:

Exempel bandel 511

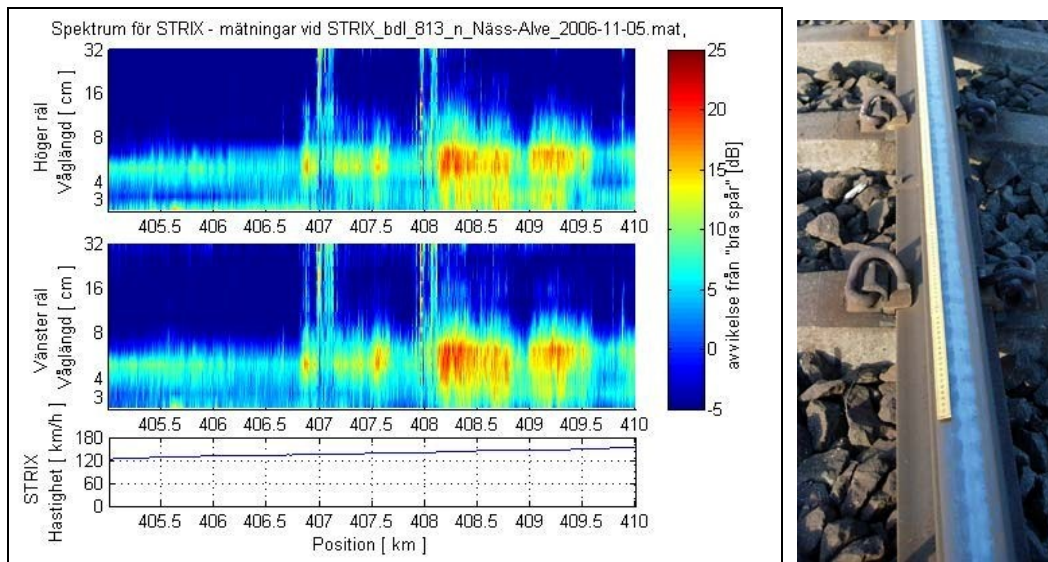


Figur 8. RoV-diagram från bandel 511 nedspår och bild från km 223+700.

RoV-diagrammet i Figur 8 visar ett spår med sth 200 km/h. RoV-nivåerna är acceptabla fram till km 223+200 – 225+000, där de ligger kring 15-20 dB relativt norm, så slipning rekommenderas här.

DokumentID		Version
TDOK 2014:0410		1.0

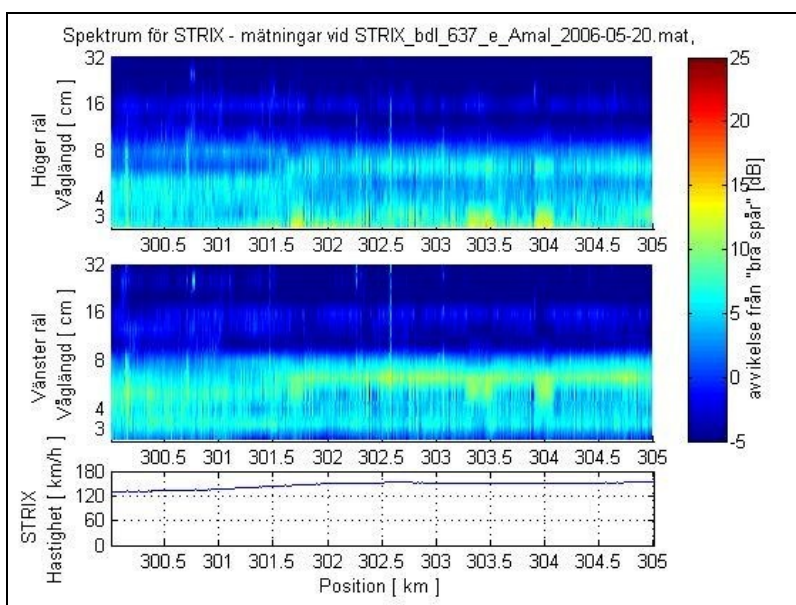
Exempel bandel 813



Figur 9. RoV-diagram från bandel 813 nedspår och bild från km 409+300

Sträcka med sth 200 km/h. RoV-nivåerna är höga vid km 408+000 - 409+500, så spårslipning rekommenderas snarast här. Det är klokt att då även köra km 406+700 - 408+000, även om dessa sträckor inte är lika akuta.

Exempel bandel 637

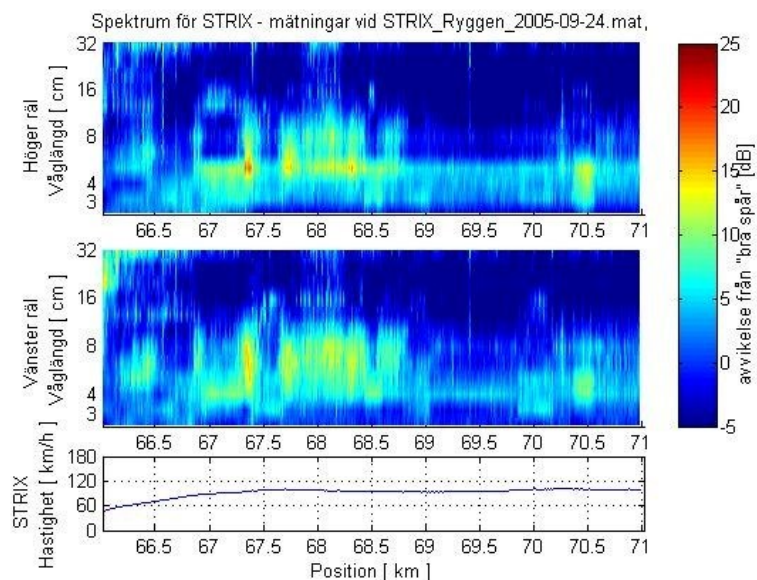


Figur 10. RoV-diagram från bandel 637.

DokumentID		Version
TDOK 2014:0410		1.0

RoV-diagrammet i figur 10 är från bandel 637 med sth 160 km/h. Inget brådiskande slipbehov ur RoV-synpunkt, men km 303+200 – 304+200 kan övervägas så småningom.

Exempel bandel 322



Figur 11. RoV-diagram från bandel 322.

RoV-diagrammet ovan är från bandel 322 med sth 115 km/h och träslipers. Det röda fältet vid km 67+300 orsakas av en skarv. Nivåerna bedöms vara godtagbara på sträckan. Spårslipning kan övervägas vid km 67-69 och vid 70+500 men det bedöms ej vara akut ur RoV-synpunkt.

Ändringslogg

Fastställd version	Dokumentdatum	Ändring	Namn
1.0	2015-04-01	Konvertering till TDOK	Hrstic Dragana

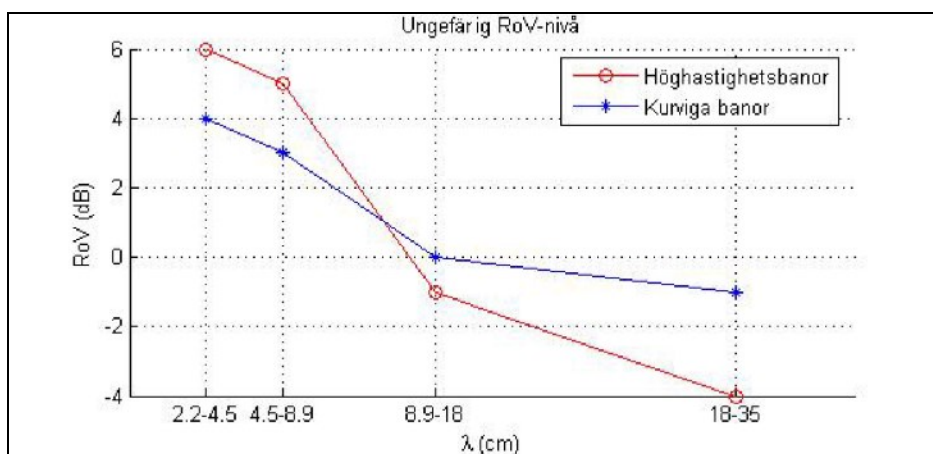
DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

Bilaga 1 Uppkomst av räfflor

Kunskapen om var och varför RoV uppkommer är inte fullständig och det går inte att härleda hela RoV-diagrammets utseende till banans uppbyggnad och trafikering. Vissa mönster har dock kunnat urskiljas:

Snabba och långsamma banor

I [4] påvisas en skillnad mellan slitagemönstret på spår med hög respektive låg sth (största tillåtna hastighet). Räfflorna (2-8 cm) är värre på banor med hög sth än på banor med låg sth, se Figur 12. För vågor (8-35 cm) är problemen störst på banor med låg sth (ofta kurviga banor).

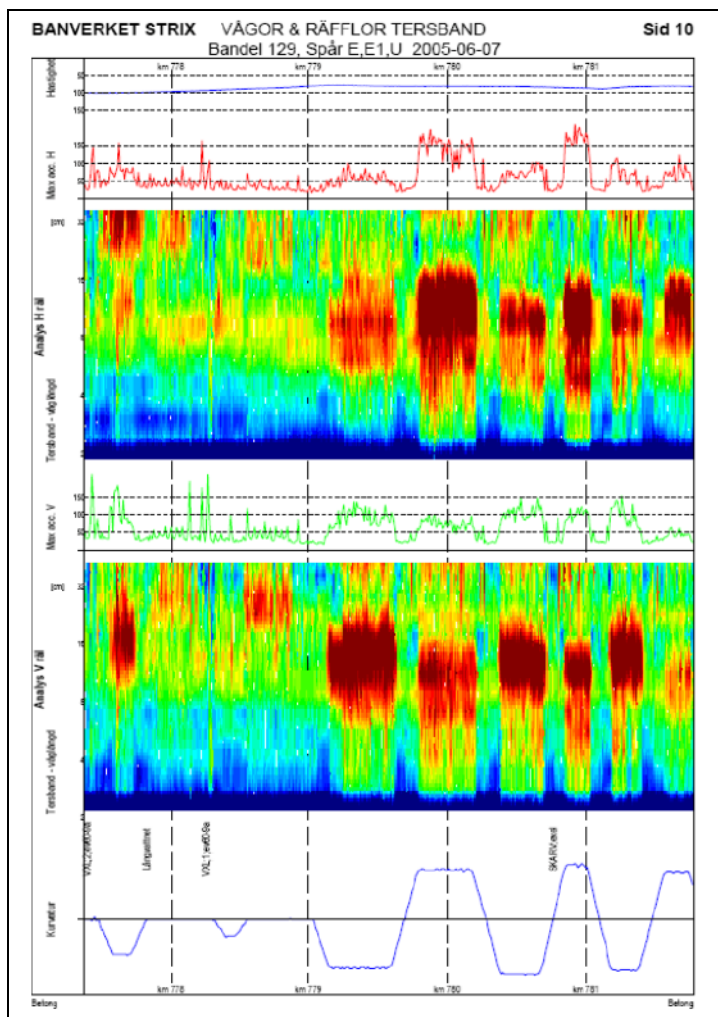


Figur 12. Ungefärliga RoV-nivåer relativt ISO-normen för banor med hög sth och kurviga banor (låg sth). Källa [4].

Kurvor

I [4] visas att snäva kurvor ofta har höga RoV-nivåer. Det är främst våglängder mellan 8-20 cm som uppträder och kurvans inre räl har i regel högst nivåer. Se Figur 13.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------



Figur 13. RoV-diagram för bandel 129 km 777-782, med mycket RoV i kurvorna. En jämförelse mellan höger och vänster räl visar att den inre rälen är värst drabbad (vänster räl i vänsterkurva, dvs. kurva med negativ kurvatur och vice versa).

Accelerations- och inbromsningssträckor

Teoretiskt så bör RoV-nivåerna öka där traktionen mellan hjul och räl ökar, det vill säga då de drivna hjulen accelererar eller då hjulen bromsar. Man har konstaterat att drivna hjul har större hjulorundhet än odrivna [5]. En hypotes från detta är att även rälen drabbas av vågbildning på sträckor där hjul accelererat eller bromsat.



DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

Bilaga 2 Effekter av Räckflor och Vågor

Vibrationer

Då ett spår med RoV trafikeras av fordon med fart v induceras vibrationer i hjul och räls. Sambandet mellan vibrationsfrekvens och RoV-våglängd kan skrivas som

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

De högsta frekvenserna framkommer således vid höga hastigheter och korta våglängder, medan lägre hastigheter och längre våglängder innebär lägre frekvenser. Se Tabell 4.

Tabell 4. Exempel på frekvenser vid olika våglängder, λ , och hastigheter, v .

	$\lambda=30$ cm	$\lambda=10$ cm	$\lambda=2$ cm
$v=70$ km/h	64 Hz	190 Hz	970 Hz
$v=200$ km/h	190 Hz	560 Hz	2800 Hz

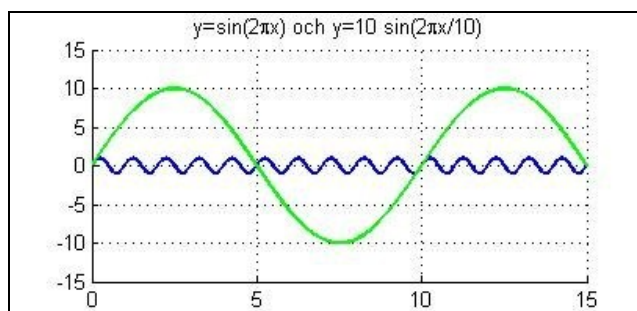
Vibrationerna kan även uppstå på grund av RoV på hjulens löpbana (orunda hjul), vilket ger samma effekter som RoV på rälerne.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

Spårkrafter

Räfflor och vågor ger upphov till dynamiska spårkrafter mellan räl och hjul. En förenklad modell av den maximala dynamiska spårkraften mellan ett hjul som färdas med hastigheten v och en räl med våglängd λ och vågdjup A kan skrivas som¹:

$$F_{\max} = kv^2 \frac{A}{\lambda^2}$$



Figur 14. Exempel på två vågor där den blåa vågen motsvarar 10 gånger större spårkraft än den gröna.

Som exempel på vilka krafter olika vågfomer ger kan vi jämföra de två vågorna i Figur 14. Den blåa vågen har våglängd och amplitud = 1 längdenhet, och den gröna har våglängd och amplitud = 10 längdenheter. Krafterna från dessa vågor blir:

$$F_{BLÅ} = kv^2 \frac{1}{1^2} = kv^2$$

$$F_{GRÖN} = kv^2 \frac{10}{10^2} = \frac{kv^2}{10}$$

¹ Låt spårets profil beskrivas av $y = A \sin(\frac{2\pi x}{\lambda})$ där x är längdskalan längs spåret. Den dynamiska kraften som verkar på en massa m som färdas på detta spår med hastigheten v kan skrivas som:

$$F = m \frac{d^2 y}{dt^2} = mv^2 \frac{d^2 y}{dx^2} = mv^2 A \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sin(\frac{2\pi x}{\lambda})$$

Den maximala dynamiska kraften blir då: $F_{\max} = 4\pi^2 mv^2 \frac{A}{\lambda^2} = kv^2 \frac{A}{\lambda^2}$

DokumentID	Version
TDOK 2014:0410	1.0

Den kortare blåa våglängden genererar alltså 10 gånger *större* kraft än den längre gröna. Detta visar att de kortare våglängderna kan ge större påfrestningar på spår och fordon än de längre våglängderna, även om deras amplituder är lägre. Notera dock att modellen för att beräkna den dynamiska spårkraften är kraftigt förenklad

Nedbrytning av spårets komponenter

Vibrationerna förorsakar nedbrytning av spårets komponenter. I [8] visas exempel på hur Södra stambanan drabbats av befästningsbrott för Pandrol e-clip på fyra platser där RoV-nivåerna är höga.

Rullkontaktutmattning på hjul och räl

RoV-nivåerna leder till ökat slitage på fordonens hjul och på rälen genom så kallad rullkontaktutmattning (Rolling Contact Fatigue, RCF). RCF kan initieras både på hjulets yta och några cm in i hjulet. I en forskningsrapport från Chalmers [7] visas att höga RoV-nivåer med våglängder 4-8 cm ökar risken för RCF på hjul. I rapporten anges riktvärdet $L=17$ dB (rel. 1 μ m) som ej bör överskridas för dessa våglängder för att undvika RCF i *hjul*. RoV kan även förorsaka RCF i *rälen* [9]. Risken för RCF är betydligt högre vid tåghastigheter kring 200 km/h jämfört vid 100 km/h. Även ökade axellaster ger ökad risk.

Buller

Vibrationerna från RoV orsakar buller både i fordonen och i spårets omgivning. Bullret är främst koncentrerat till frekvenser mellan 400-3000 Hz (människan kan uppfatta frekvenser mellan 20-20000 Hz). Dessa frekvenser motsvaras av våglängder kortare än 14 cm i tersbandsdiagrammen vid hastigheter under 200 km/h. Järnvägsbuller orsakas inte bara av RoV på rälsen utan även av RoV på hjulens löpbanor (främst på blockbromsade godsvagnar), slamrande godsvagnar och aerodynamiskt ljud. RoV förorsakar mest buller vid höga hastigheter.

I de fall där rälen RoV är den dominerande orsaken till bullret kan en spårslipning fungera som en effektiv bullerdämpande åtgärd. Det finns exempel på hur personer boende nära järnvägen hört av sig till [Banverket Trafikverket](#) dagarna efter att spårslipning utförts då de upplevt hur bullernivåerna minskat.

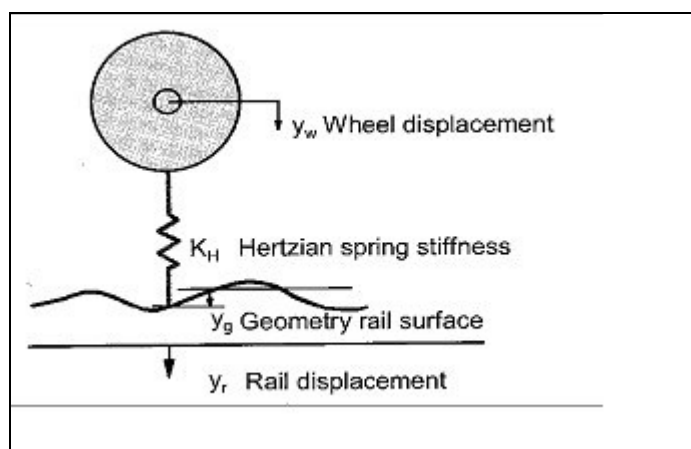
DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

Bilaga 3 Mätssystemets uppbyggnad

Mätvagnen Strix har ett indirekt mätsystem för RoV. På ett av hjulparen har höger och vänster lagerbox försetts med accelerometrar som mäter lagerboxens vertikala acceleration. Ett accelerationsvärde mäts varje cm.

Hjulets vertikala rörelse ("Wheel displacement" i Figur 15) orsakas av *tre* olika bidrag:

1. Rälen vibrerar ("Rail displacement").
2. RoV på rälen ("Geometry rail surface") + RoV på hjul.
3. Hjulparet vibrerar internt. Detta beror på 1. och 2. samt variationer i kontaktkraften mellan hjul och räl ("Hertzian spring stiffness"). Dessutom tillkommer vibrationer i hjulaxeln.



Figur 15. De tre bidragen till hjulets vertikala acceleration. Bildkälla: [6]

Vid bearbetningen av accelerationsdata vill man minska effekterna från 1 och 3 ovan, för att få fram RoV-nivån ur hjulaccelerationen. Detta görs med hjälp av en överföringsfunktion. Överföringsfunktionen H har tagits fram genom att på vissa sträckor jämföra spektrum från hjulaccelerationen med direkt uppmätta RoV-spektrum. Den direkta RoV-mätningen har genomförts med mätinstrumentet CAT (Corrugation Analysis Trolley). Överföringsfunktionen H beskriver ett standardmönster över hur stor del av hjulaccelerationen $\ddot{y}_w$ som har orsakats av RoV-nivån y_g , beroende på frekvensen f . Matematiskt kan det (lite förenklat) skrivas:

$$y_g(f) = H(f) \cdot \ddot{y}_w(f)$$

För detaljer hänvisas till [2] och [6].

DokumentID	Version
TDOK 2014:0410	1.0

Bilaga 4 Brister i mätsystemet

I detta avsnitt redovisas några kända brister i mätsystemet där accelerometrarnas vibration orsakas av andra vibrationskällor än rälnas RoV, vilket (felaktigt) visas som höga RoV-nivåer.

I bilaga 3 visas att de uppmätta hjulvibrationerna teoretiskt orsakas av:

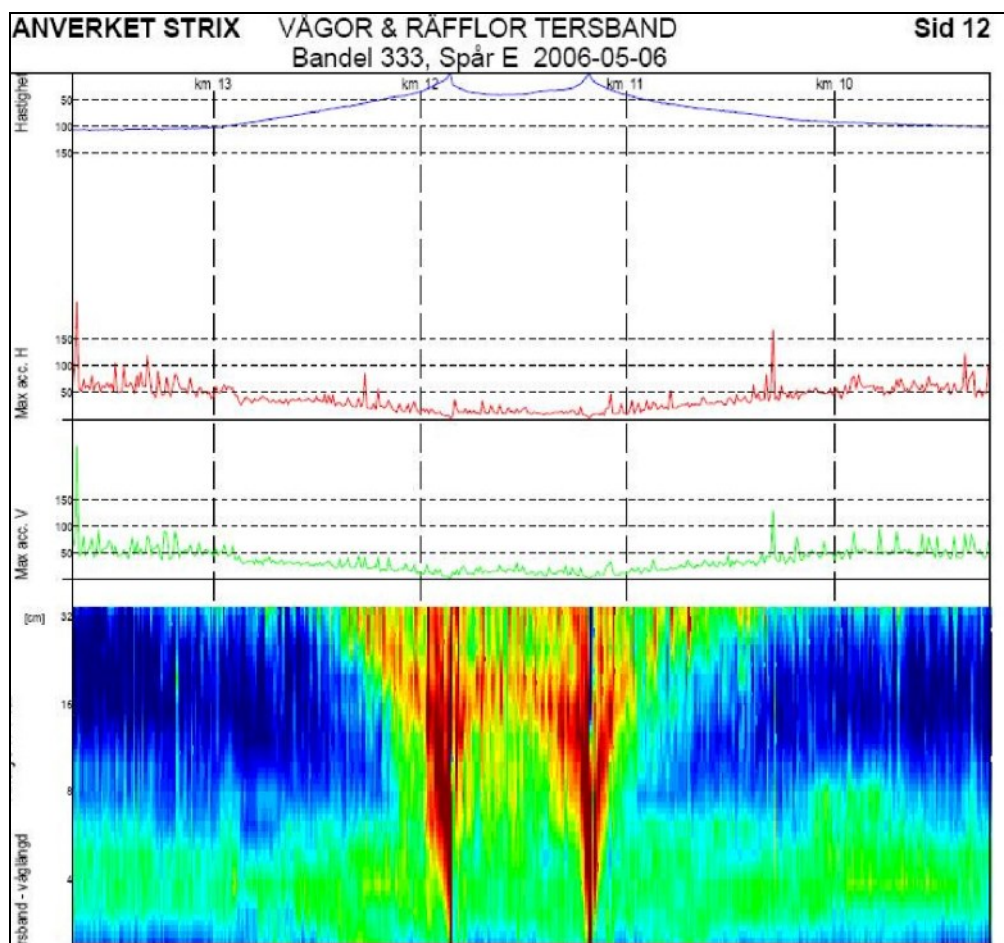
1. Rälens vibration
2. Rälens och hjulets RoV
3. Interna hjulvibrationer

En överföringsfunktion finns för att kompensera bort effekterna 1, 3. Problemet är att överföringsfunktionen förutsätter att det finns ett standardmönster för hur stor andel av hjulvibrationen som härstammar från rälens RoV, för olika frekvenser. Så är inte alltid fallet. Mellan olika mätplatser och tidpunkter finns skillnader i hur stor andel av hjulvibrationen som orsakas av de tre vibrationskällorna. I nedanstående avsnitt ges några exempel på orsaker till dessa skillnader.

Hastighetsberoende

Ju fortare ett hjul rullar på en vågig räl, desto större blir den vertikala accelerationen. Mätsystemet kompenserar visserligen för detta, men problemet är att vid lägre hastigheter blir andra vibrationer (brus) större relativt RoV-vibrationerna. RoV-nivåerna visas därför felaktigt som mycket höga då hastigheten är låg. *För att förhindra missförstånd kring bruset kommer inga tersbandsdiagram att ritas ut då mät hastigheten understiger 60 km/h, från och med 2007.* En viss vaksamhet bör fortfarande iakttas då diagram studeras kring inbromsningar och accelerationer

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

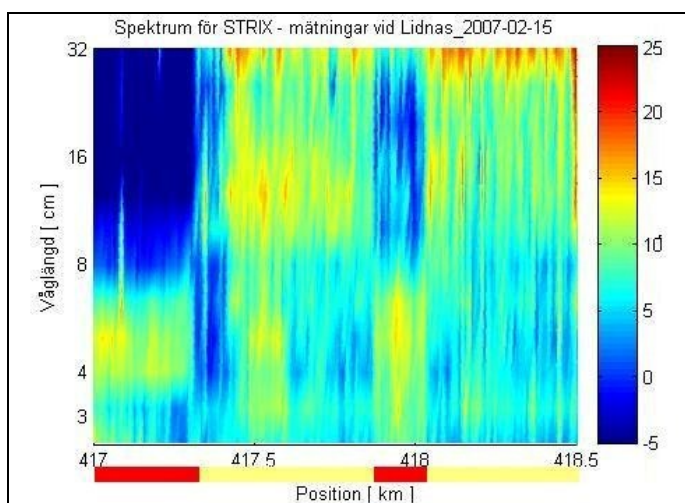


Figur 16. Accelerationsvärdena (Max. acc. H / V) sjunker med sjunkande mät hastighet. Den acceleration som återstår består främst av brus vilket felaktigt tolkas som höga RoV-nivåer (rött i tersbandsdiagrammet).

Spårstyvhet - komponentberoende

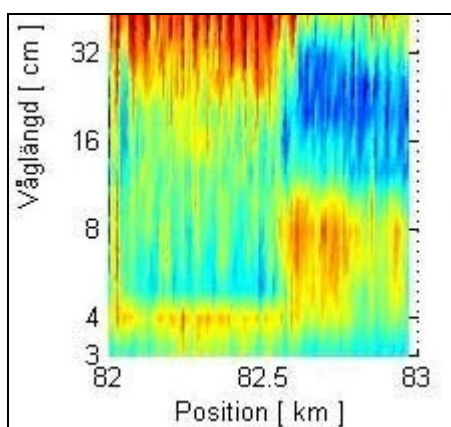
Spårets styvhet påverkar hur mycket rälna vibrerar för olika frekvenser. Styvheten beror bland annat på spårets underbyggnad, slipertyp, befästningstyp, mellanlägg och räلتyp. I Figur 17 visas ett exempel på hur hjulvibrationerna varierar på spår med Pandrol-befästning med 10 mm gumlimellanlägg och Fist-befästning med 5 mm gumlimellanlägg. Mätning med en handdriven vagn, CAT, visar att de faktiska RoV-nivåerna i det här fallet knappt skiljer sig vid övergångarna. Skillnaderna beror på att rälna vibrerar med olika frekvenser på de två befästningstyperna, vilket (felaktigt) visas som olika RoV-nivåer.

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------



Figur 17. Bdl 813 nsp. km 417+900-418+60. Sträckor som indikeras med röda fält på den horisontella färgskalan har Pandrol-befästning med 10 mm gummimellanlägg medan sträckor med gula fält har Fistbefästning med 5 mm gummimellanlägg.

I Figur 18 visas på samma sätt hur mätningarna skiljer sig på trä- och betongslipers med olika befästningar, trots att RoV-nivåerna enligt CAT mätning är nästan likadana för de två spårtyperna.



Figur 18. Bdl 494: Mellan km 82+000 till 82+577 finns betongslipers med Pandrol-befästning och 10 mm gummimellanlägg och mellan 82+577 till 83+000 finns träslipers med Heybackbefästning och 3.5 mm gummimellanlägg.

I [10] konstateras att Strix i genomsnitt mäter lägre nivåer på Heyback-spår än på Pandrol G10-spår, något som stämmer för de längre våglängderna i Figur 18. För Fist-spår mäts högre nivåer för längre våglängder och lägre nivåer för kortare våglängder jämfört med Pandrol G10-spår, vilket stämmer med Figur 17.

DokumentID		Version
TDOK 2014:0410		1.0

Årstidsberoende

Även årstidsvariationerna inverkar på spårets styvhet. Teoretiskt bör RoV-mätningar under sommartid ge högre nivåer än under vintertid eftersom ett fruset spår rör sig mindre. De två reguljära RoV-mätningarna bör planeras in under vår och höst så att de genomförs med någorlunda lika styvhet i marken.

Orunda mätjul

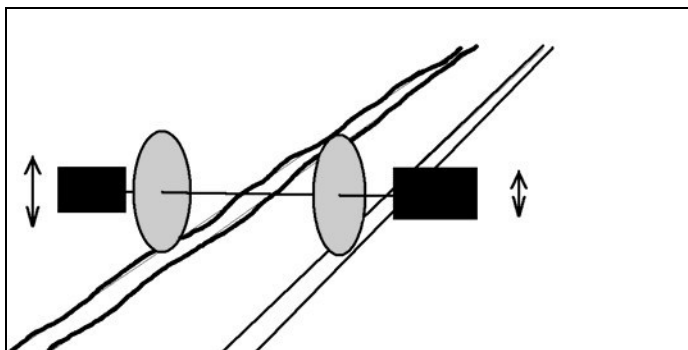
Räfflor och vågor kan uppstå på hjulens löpbanor (orunda hjul). Om hjulets RoV är större än rälsens RoV blir hjulorundheten den dominerande orsaken till vibrationerna. Mätjulen på Strix skall ha låga RoV-nivåer för att säkerställa att det är rälsens RoV som uppmäts. Därför svarvas de ofta och bromsas aldrig. *Orunda mätjul är trots dessa åtgärder en möjlig felkälla.*

Andra vibrationskällor i kurvor

I kurvor kan hjulvibrationer uppstå på grund av dålig rälprofil och/eller flänskontakt för mätjulen på Strix. Det är möjligt att dessa vibrationer ger utslag i RoV-diagrammen.

Överhörning mellan vänster och höger sida

Visningen av höger respektive vänster räl bygger på accelerationsmätning på höger respektive vänster lagerbox. Problemet är att om exempelvis vänstra rälen har betydligt mer RoV än den högra kommer viss överhörning att ske så att vibrationerna i vänstra hjulet skapar vibrationer i den högra lagerboxen, se figur 19. Diagrammen visar därför även höga RoV-nivåer för den högra (släta) rälen.



Figur 19. Principskiss, överhörning.

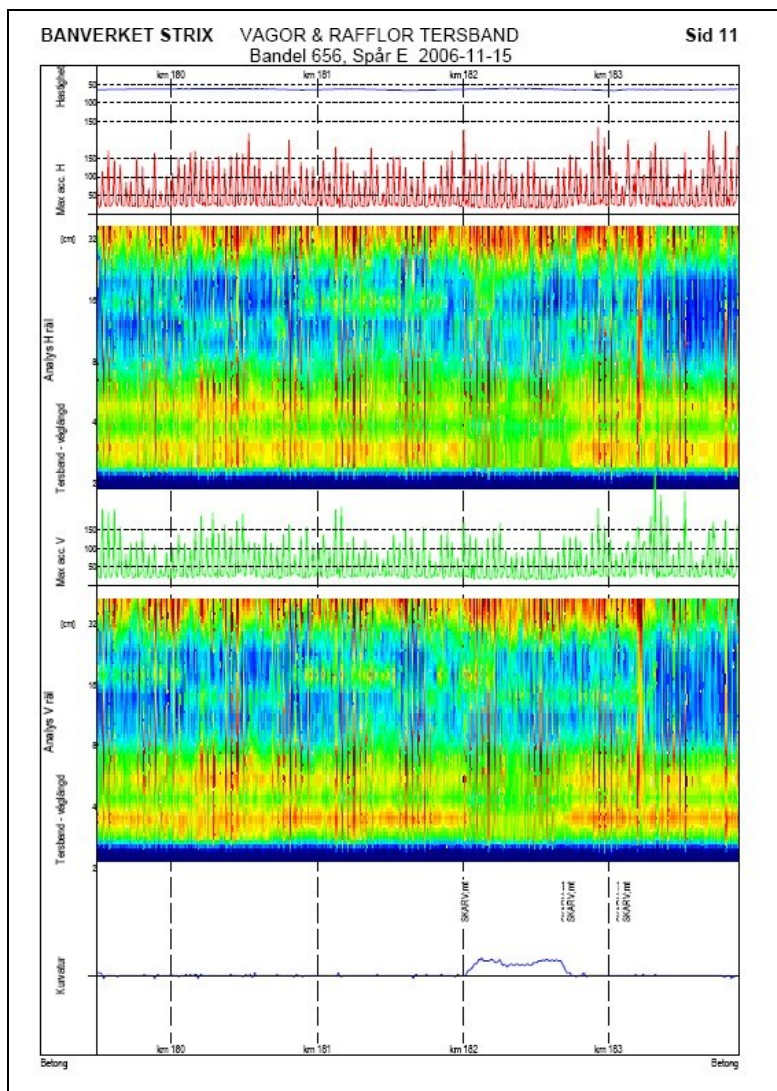
Växlar, skarvar och skarvspår

Då en skarv eller en korsning passeras får mätjulen ofta ett vertikalt slag. I signalteorin kallas en sådan kortvarig puls med hög amplitud för en transient och den innehåller ett brett intervall av frekvenser. I tersbandsdiagrammet ger dessa slag högre dB-nivåer för alla våglängder, se Figur 7 vid km 214.

Att en hög RoV-nivå visas vid en växel beror dock inte alltid på slag mellan hjul och korsning. De faktiska RoV-nivåerna kan vara högre, exempelvis pga. att linjeslipning genomförts utan att växeln har slipats.

DokumentID TDOK 2014:0410		Version 1.0
------------------------------	--	----------------

Vid mätning på skarvspår erhålls transienter vid skarvpassagerna (var 20:e eller var 40:e meter). Se Figur 20

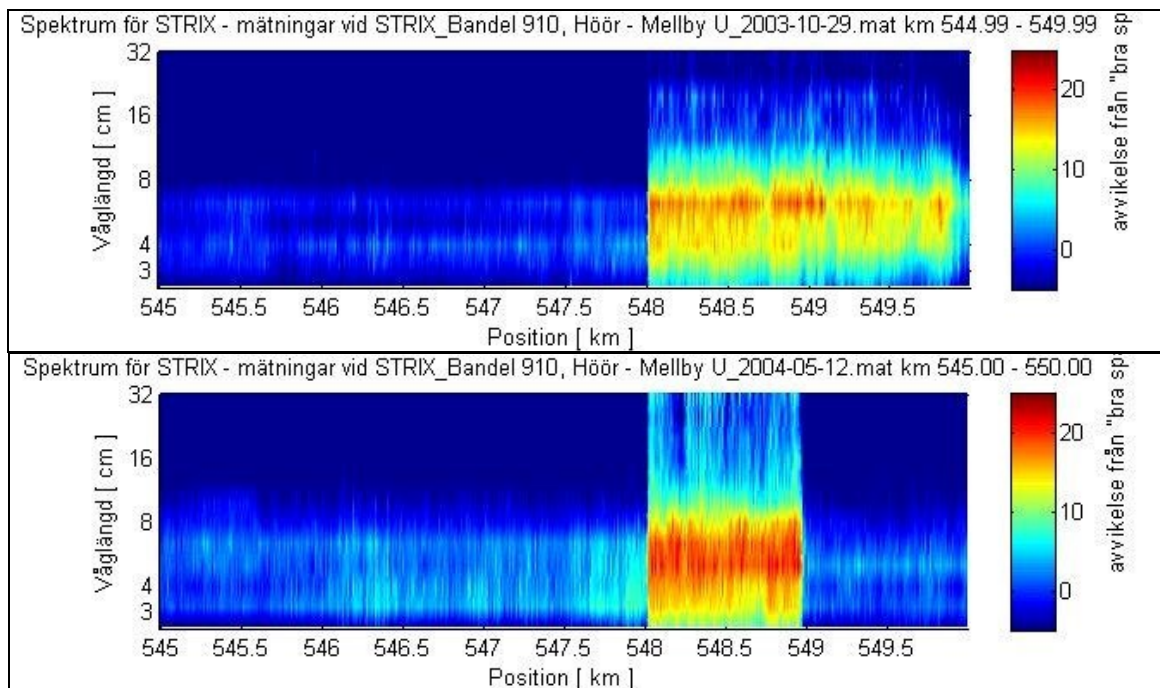


Figur 20. Skarvspår karakteriseras av taggiga accelerometersignaler (slag var 40:e eller 20:e meter).

DokumentID TDOK 2014:0410	Version 1.0
------------------------------	----------------

Bilaga 5 Att åtgärda RoV - Spårslipning

Räfflor och vågor åtgärdas genom att slipa ner rälsen så den blir slätare. I figur 21 nedan visas exempel på effekten av en spårslipning.



Figur 21. Bandel 910 usp. km 545-550. RoV-mätning 2003-10-29 och 2004-05-12. Mellan dessa mätningar har spårslipning genomförts på km 549-550. Km 548-549 slipades inte trots att denna sträcka också var i behov av slipning.

Vid spårslipning görs en åtskillnad mellan underhållsslipning och korrektiv slipning [1]. Underhållsslipning är en enkel slipning medan en korrektiv slipning genomförs då större skador föreligger. Vid en korrektiv slipning körs sliptåget upprepade gånger över rälsen tills den blivit tillräckligt slät. Observera att slipning inte bara genomförs för att minska RoV-nivån utan även för att justera rälernas tvärprofil, avlägsna materialdefekter, begränsa rälsens ytutmattnings med mera.