



Forskningsrapport 2007:04

## Lateral spårstabilitet – slutrapport

**ERLAND JOHNSON, GUNNAR KJELL,  
LARS JACOBSSON & ROBERT LILLBACKA,  
ELENA KABO & ANDERS EKBERG**

*Institutionen för Tillämpad mekanik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2007



Forskningsrapport 2007:04

# Lateral spårstabilitet – slutrapport

ERLAND JOHNSON, GUNNAR KJELL,  
LARS JACOBSSON & ROBERT LILLBACKA,  
ELENA KABO & ANDERS EKBERG

Institutionen för Tillämpad mekanik  
Avdelningen för Material- och beräkningsmekanik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige, 2007

## Lateral spårstabilitet – slutrapport

ERLAND JOHNSON, GUNNAR KJELL, LARS JACOBSSON & ROBERT LILLBACKA,  
ELENA KABO & ANDERS EKBERG

© ERLAND JOHNSON, GUNNAR KJELL,  
LARS JACOBSSON & ROBERT LILLBACKA,  
ELENA KABO & ANDERS EKBERG, 2007

Forskningsrapport 2007:04  
ISSN 1652-8549

Institutionen för Tillämpad mekanik  
Avdelningen för Material- och beräkningsmekanik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telephone +46 (0)31 772 1000

# Lateral spårstabilitet – slutrapport

ERLAND JOHNSON, GUNNAR KJELL, LARS JACOBSSON &  
ROBERT LILLBACKA **SP**  
ELENA KABO & ANDERS EKBERG **Chalmers**

7 maj 2007

Det gemensamma CHARMEC/SP-projektet Lateral spårstabilitet startade 2003 och avslutades under våren 2007. Det övergripande målet för projektet var att motverka uppkomsten av solkurvor. Detta skulle åstadkommas genom att öka möjligheten att besvara de två fundamentala frågorna när det gäller uppkomsten av solkurvor: Vilken kompressiv axialkraft verkar i rälen och vilket sidomotstånd har spåret?

Detta övergripande mål bröts ned i tre delprojekt:

- Utveckling av bättre metoder för mätning av spänningsfri temperatur
- Numerisk simulering av ballastens sidomotstånd
- Utveckling av en numerisk modell för prediktering av uppkomst av solkurvor.

Detta är en kortfattad sammanställning av vad som utförts och vilka resultat som uppnåtts. Detaljerad information finns i de hänvisade rapporterna.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>3</b>
1.1	Solkurvor . . . . .	3
1.2	Neutraltemperatur och spänningsfri temperatur . . . . .	3
1.3	Mål . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Några mätmetoder för spänningsfri temperatur i räl</b>	<b>6</b>
2.1	Kapmetoden . . . . .	7
2.2	Lyftmetoden . . . . .	7
2.3	Ultraljudsmetoder . . . . .	8
2.4	Deformationsmetoder . . . . .	8
2.5	Magnetiska metoder . . . . .	8
2.6	Röntgenmetoder . . . . .	9
2.7	Vibrationsmetoder . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Experimentell undersökning av vibrationsmetoderna</b>	<b>10</b>
3.1	Rälresonansmetoden . . . . .	10
3.2	Spårresonansmetoden . . . . .	10
3.2.1	Fältmätningar . . . . .	11
3.2.2	Spårresonansmetodens potential . . . . .	11
3.3	Vägledarmetoden . . . . .	11
3.3.1	Vägledarmetodens fysik . . . . .	12
3.3.2	FE-beräkningar . . . . .	13
3.3.3	Laboratoriemätningar . . . . .	14
3.3.4	Bestämning av axialkrafter från mät- och beräkningsresultat . . . . .	15
3.3.5	Analys av onoggrannhet och osäkerhet . . . . .	15
3.3.6	Slutsatser av metodens potential . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Vilket sidomotstånd har spåret?</b>	<b>20</b>
4.1	Numeriska simuleringar . . . . .	20
4.2	Resultat från parameterstudier . . . . .	22
4.2.1	Reaktionskrafter och förskjutningar . . . . .	22
4.2.2	Parameterinflytande . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Kan man förutsäga när solkurvor uppkommer?</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Sammanfattning av resultat och slutsatser</b>	<b>27</b>
6.1	Mätning av spänningsfri temperatur i räl . . . . .	27
6.2	Bedömning av spårets sidomotstånd . . . . .	27
6.3	Prediktering av risk för solkurva . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Rekommendationer</b>	<b>29</b>

# 1 Bakgrund

## 1.1 Solkurvor

I teorin är en solkurva ett enkelt fenomen: På sommaren leder den ökade temperaturen till att rälen värms upp och vill expandera. Traditionellt har detta lösts med skarvspår där utrymme finns för rälen att expandera. Skarvspår har emellertid nackdelar, bland annat sämre komfort, ökade underhållskostnader och begränsningar i vilka hastigheter som kan tillåtas. Därför går utvecklingen alltmer mot skarvfria spår. Då rälen inte kan expandera byggs istället höga tryckkrafter upp. När dessa krafter nått en kritisk nivå kommer rälen att knäcka ut och en solkurva bildas. På motsvarande sätt byggs dragkrafter upp i rälen på vintern. Dessa ökar risken för rälbrott.

Solkurvor eller tendenser till solkurvor är relativt frekventa under sommarhalvåret i Sverige. Som ett exempel togs en rapport ut för solkurvor under perioden 22 april till 11 augusti 2003, se kapitel 2 i referens [4]. Rapporten visar att 82 händelser rapporterats under dessa 111 dagar.

## 1.2 Neutraltemperatur och spänningsfri temperatur

Nivån på dragkraften på vintern och tryckkraften på sommaren bestäms av vid vilken temperatur rälen är spänningsfri. Denna temperatur benämns spänningsfri temperatur och bestäms då rälen fixeras i spåret. Dessvärre ändrar den sig dock med tiden genom påverkan från tåg och banunderhållsarbeten. En hög spänningsfri temperatur minskar problemet med solkurvor på sommaren men ökar istället risken för rälbrott på vintern. På motsvarande sätt leder en låg spänningsfri temperatur till minskad risk för rälsbrott, men ökad risk för solkurvor. Detta beskrivs mer ingående i kapitel 2 i referens [1], i kapitel 1 i referens [2], samt i kapitel 4.3 och APPENDIX 1 i referens [4].

För att balansera riskerna mellan solkurva och rälbrott fastställs en neutraltemperatur av Banverket. Utifrån denna definieras ett tillåtet neutraltemperaturintervall. På grund av klimatet varierar detta temperaturintervall mellan olika delar av Sverige. Detta finns reglerat i Banverkets föreskrift BVF 540.33. De neutraltemperaturintervall som för närvarande gäller listas i tabell 1.

Region i Sverige	Tillåtet intervall för neutraltemperaturen [°C]
Norr	7–17
Mellersta	12–22
Östra	14–24
Västra	14–24
Södra	12–22

Tabell 1: Tillåtna intervall för neutraltemperatur i Sverige.

Den spänningsfria temperaturen (d.v.s. den temperatur där axialkraften i rälen är noll) måste ligga inom neutraltemperaturintervallet. Detta betyder i praktiken att den måste mätas löpande och eventuellt korrigeras.

Mätning av spänningsfri temperatur  $T_N$  görs genom mätning av axialkraften  $F$  i rälen. Genom att man samtidigt mäter rältemperaturen  $T$  kan den spänningsfria temperaturen därefter enkelt bestämmas enligt följande samband

$$T_N = T + \frac{F}{\alpha EA} \quad (1)$$

där  $\alpha$  är rälens värmeutvidgningskoefficient,  $E$  är rälens elasticitetsmodul och  $A$  är rälens tvärsnittsarea. Kraften  $F$  är i ekvation 1 positiv som dragkraft och negativ som tryckkraft.

Om mätningen visar att den spänningsfria temperaturen ligger utanför tillåtet neutraltemperaturintervall (se tabell 1) så måste denna korrigeras genom kapning och därefter borttagning eller inläggning av rälsegment, beroende på om den spänningsfria temperaturen är för låg eller för hög. Procedurer för detta finns i BVF och är också kortfattat beskrivna i [3].

### 1.3 Mål

Som nämnts ovan förändras den spänningsfria temperaturen med tiden. Detta innebär att man regelbundet måste mäta och eventuellt korrigera denna så att den ligger inom det förbestämda intervallet. Att identifiera, undersöka, utveckla och experimentellt prova en effektiv, flexibel, billig och tillförlitlig metod för att mäta den spänningsfria temperaturen är det ena huvudmålet med detta projekt. Delaktiviteterna i detta delprojekt har varit att

- ◇ Identifiera olika tekniker och metoder som är möjliga för mätning av kraft och välja ut de som är applicerbara på räl.
- ◇ För var och en av metoderna som identifierats som användbara på räl ta fram deras teoretiska grund, kommersiella status, kostnadsaspekter och mättid och utifrån dessa bedöma metodens potential.
- ◇ Välja ut någon eller några metoder för fortsatta teoretiska och experimentella studier.

Men risken för en solkurva beror inte bara av vilken tryckkraft som verkar i rälen, utan också av det sidomotstånd som rälen har. Detta sidomotstånd bestäms av rälens profil, befästningar, slipers och ballast. Det är känt att en hög sidostyvhet i spåret minskar risken för solkurvor. Däremot är kunskapen mer bristfällig om hur detta samband ser ut i detalj. Det är inte heller helt utrett hur de olika spårkomponenterna påverkar den totala sidostyvheten. Att öka denna kunskap, samt att ta fram en modell för att prediktera vid vilka förhållanden solkurvor uppkommer är projektets andra huvudmål. För detta delprojekt har delaktiviteterna varit att



- ◇ Identifiera vad som finns gjort inom detta område runt om i världen.
- ◇ I detalj analysera ballastens inverkan på spårets sidomotstånd.
- ◇ Bygga upp en datormodell för prediktering av risk för solkurvor under olika förhållanden.

Genom att dels kunna mäta och säkerställa den spänningsfria temperaturen effektivt i en större del av rälbeståndet och dels förbättra sidostyvheten kan projektets huvudmål nås, nämligen att minska risken för uppkomst av solkurvor.

## 2 Några mätmetoder för spänningsfri temperatur i räl

Mätning av axialkraft i räl sker idag huvudsakligen genom den s.k. kapmetoden. Denna metod är tidsödande och dyr. En alternativ metod som Banverket börjat använda är lyftmetoden. En nackdel med denna är att den bara fungerar för dragbelastad räl. Det finns därför ett behov av att hitta bättre metoder.

I en förstudie som redovisas i referenserna [3, 4, 5, 9] kartlades vad som har gjorts inom detta område runt om i världen. Ett antal metoder för att mäta normalkrafter i räl, samt numeriska metoder för att prediktera uppkomst av solkurvor identifierades och deras för- och nackdelar beskrevs.

Inledningsvis gick vi igenom alla tänkbara fysikaliska principer där kraft eller spänning på något sätt ingår. På detta sätt kunde möjliga principer för kraftmätning identifieras. Bland dessa identifierades sju klasser av metoder som tänkbara för bestämning av axialkraft i räl medan ytterligare åtta principer bedömdes som oanvändbara. För de tänkbara metoderna togs följande information fram:

- ◇ Fysikalisk princip och vilken fysikalisk kvantitet som mäts (och som sen relateras till den sökta axialkraften i rälen)
- ◇ Noggrannhet i mätt axialkraft, alternativt i spänningsfri temperatur
- ◇ Ungefärlig mättid
- ◇ Kommersiell status och speciellt vilka produkter som finns på marknaden
- ◇ Krav på utbildning för de som utför mätningen
- ◇ Krav och restriktioner för mätmetoden, t.ex. krav på kurvradie, väder, årstid eller temperatur.
- ◇ Nödvändig utrustning
- ◇ Specifika fördelar respektive nackdelar med metoden
- ◇ Litteraturreferenser och speciellt referenser till järnvägstillämpningar

Resultatet av denna översikt har sammanställts i två rapporter [3, 4]. Den första rapporten är ett kortare sammandrag på svenska medan den andra är en mer utförlig rapport på engelska. Utöver kapmetoden och lyftmetoden som används idag så studerades följande metoder

- ◇ Ultraljudsmetoder
- ◇ Deformationsmetoder
- ◇ Magnetiska metoder
- ◇ Röntgenmetoder

## ◇ Vibrationsmetoder

En sammanfattning av resultatet från undersökningen av dessa metoder ges nedan. För utförligare information hänvisas till referenserna [3] och [4].

### 2.1 Kapmetoden

Kapmetoden är den metod som till övervägande delen används av Banverket idag. I korthet mäts rältemperaturen. Rälen lossas från slipern och kapas på ett ställe. Innan kapningen gör man markeringar på rälen på ömse sidor om det tänkta kapstället och mäter upp avståndet mellan dessa. Efter kapningen, när rälen vuxit (vid tryckkraft i rälen) eller krympt (vid dragkraft i rälen) mäts avståndet upp igen.

Metodens fördelar är flera. Den fungerar både när för drag- och tryckkrafter i rälen och noggrannheten är fullt tillräcklig. Den fungerar både i kurvor och på raksträckor. Metoden används idag och erfarenhet finns ute i organisationen. Den utrustning som behövs är spridd. En annan fördel är att metoden direkt mäter kraften i hela räلتvärsnittet.

Metoden har ett antal svagheter. Den är förstörande och man inför en ny svets efter ihopsättning av rälen. Mättiden är lång med trafikavbrott som följd. Detta gör metoden dyr. Metoden kan inte heller användas om den spänningsfria temperaturen avviker mer än 20 grader från aktuella rältemperaturen.

### 2.2 Lyftmetoden

Lyftmetoden är en annan metod som börjat användas av Banverket. I denna metod lossas rälen på en sträcka av trettio meter och lyfts sedan upp med hjälp av en hydraulcylinder. Den pålagda vertikala kraften mäts med en lastcell medan motsvarande vertikala förskjutning mäts med en lägesgivare. Alla data lagras i en handdator som också utför beräkningar på de mätta storheterna. Förhållandet mellan kraft och förskjutning, den s.k. vertikala styvheten, beror på den longitudinella kraften i rälen som därmed kan beräknas. Utöver uppmätt vertikal styvhet behöver man uppgifter om bl.a. rälprofil och eventuell kurvradie.

Fördelarna med metoden är att den är icke-förstörande. Noggrannheten vid bestämningen av den spänningsfria temperaturen, ca 3–4 ° C, är tillräcklig för praktiskt bruk. Metoden är också relativt snabb, en mätning kan klaras av på ca en timme. Metoden är kommersiellt tillgänglig med användarvänliga datorgränssnitt. Två kommersiella metoder finns. Den mest kända är den s.k. VERSE-metoden.

Nackdelarna med metoden är främst att den inte fungerar i alla situationer. Den kan inte användas i kurvor med en radie som är mindre än 700 meter. Vidare kan den bara användas när dragkrafter råder, dvs när rältemperaturen är lägre än den spänningsfria temperaturen. Vissa typer av fastsättningar av rälen mot slipers är också svåra att hantera med metoden.

## 2.3 Ultraljudsmetoder

Ultraljud fortplantar sig genom ett material med en hastighet som beror av spänningstillståndet i materialet. Genom att mäta hur fort ultraljudsvågen går kan man bestämma spänningarna i materialet. Vid mätning av krafter i räl använder man antingen longitudinella vågor som får gå längs med rälen eller skjuvvågor som får gå tvärs igenom räلتvärsnittet.

Fördelar med metoden är att den är icke-förstörande och förhållandevis snabb. Detta gör att trafikstörningarna blir minimala. Metoden finns kommersiellt tillgänglig med bärbar utrustning. Kommersiella system är DEBRO30, DB-metoden, NIST och RIPL. Både kostnaden för utrustningen och kostnaden per mätpunkt är rimliga. Noggrannheten är normalt tillräcklig förutsatt att tillräcklig kalibrering kan utföras.

Nackdelarna är att metoden är förhållandevis okänslig för spänningsvariationer eftersom ultraljudsvågornas hastighet också beror på rälmaterialets kornstruktur, dess mikrosammansättning, defekter samt dess temperatur. Våghastigheten påverkas också av om materialet har deformerats plastiskt. Detta är fallet nära anliggningsen mot hjulen. Denna del av rälen måste alltså undvikas vid mätningen. För att hantera alla dessa faktorer måste man kalibrera mot en rälbit med samma egenskaper som den räl man vill mäta på. Dessutom får inte egenskaperna variera längs med rälen. En annan nackdel med ultraljudsmetoden är att den bara mäter lokala spänningar längs vågens väg genom rälen och inte den totala axialkraften som ju är av primärt intresse. Även detta måste kompenseras för.

## 2.4 Deformationsmetoder

Krafterna i rälen kan beräknas om rälen deformationer kan mätas. Detta kan göras med hjälp av töjningsgivare. Eftersom töjningsgivarna sitter på ytan, kommer de enbart att ge förhållandena i räلتvärsnittets yttre delar. Kompensation måste därför göras till de interna spänningsvariationerna.

Fördelarna med deformationsmetoderna är att de är icke-förstörande. De klarar situationer med både drag- och tryckkrafter och kan användas både i kurvor och på raksträckor. Flera kommersiella utrustningar finns tillgängliga. Noggrannheten i spänningsfri temperatur på 2–3 °C är fullt tillräcklig.

Metodernas svaghet ligger främst på installationen. Installationstiden är lång (även om man sedan kan genomföra snabba mätningar). Vidare måste den spänningsfria temperaturen mätas på ett annat oberoende sätt vid installationen.

## 2.5 Magnetiska metoder

Den i järnvägssammanhang vanligaste typen av magnetisk metod, den s.k. Barkhausen-metoden bygger på att ett växlande magnetfält läggs på rälen. När magnetiseringsriktningarna successivt ändras skickas högfrekventa elektromagnetiska och akustiska signaler ut. Dessa signaler beror av spänningstillståndet i materialet. Genom att mäta signalerna kan därför spänningar i rälen bestämmas. Från dessa kan axialkraften i sin tur bestämmas.

Fördelar med metoden är att den är icke-förstörande, snabb (flera hundratals meter per timme) och har en tillräcklig noggrannhet, ca  $\pm 3$  °C. Den klarar både dragkrafter och tryckkrafter och fungerar både i kurvor och på raksträckor. Kommersiella metoder finns.

Metoden har ett antal nackdelar som gör den tveksam för Banverkets vidkommande. Den kräver omfattande kalibrering mot andra metoder och också att mätningar utförs vid två olika temperaturer. En annan nackdel är att man, liksom för många andra metoder, endast mäter ytillstånd.

## 2.6 Röntgenmetoder

Röntgenmetoden bygger på att röntgenvågor som skickas in i rälmaterialet bryts i de enskilda kornen och därefter kommer tillbaka i en speciell riktning som beror av atomavstånden i kristallen, d.v.s. av töjningen. Genom att variera riktningen på den ingående röntgenstrålen kan spänningstillståndet i olika riktningar bestämmas.

Metoden är snabb och icke-förstörande. Den vilar på en väl utvecklad teori där metoder finns för att hantera svårigheter såsom inverkan av materialets struktur och materialavvikelser på mikronivå.

Nackdelarna är att man endast mäter ytillstånd. Ytan måste också vara väl rengjord. Inga järnvägsundersökningar har hittats i litteraturen men mobil röntgenutrustning finns.

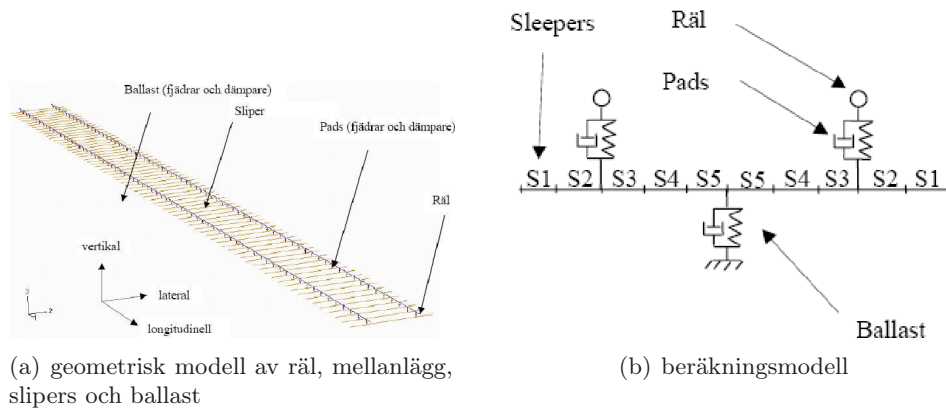
## 2.7 Vibrationsmetoder

Två huvudprinciper har identifierats för användning av vibrationsmetoder vid bestämning av krafter i järnvägsräl. Den första principen bygger på att egenfrekvenserna i en fri räl beror på den axiella kraften. Ju högre kompression, desto lägre egenfrekvens. Speciellt är lägsta egenfrekvensen noll då axialkraften är lika med knäcklasten. Genom att mäta frekvensresponsen när rälen satts i rörelse kan man därför bestämma axialkraften. Problemet är att man behöver kunna beskriva rälen inspänningsförhållanden mot slippers väldigt noggrant. En variant av metoden är därför att inkludera hela spåret i det svängande systemet och därigenom få bort inverkan av rälen specifika inspänningsförhållanden.

En annan vibrationsprincip bygger på att man tvingar rälen att svänga med en viss påtvingad frekvens och betraktar rälen som en vågledare där våglängden då kommer att bero av axialkraften.

De olika vibrationsmetoderna är icke-förstörande och har möjlighet att utvecklas till snabba metoder eftersom endast några meter av rälen behöver lossas. De har inte några kritiska restriktioner vad gäller krav på spänningstillstånd, temperatur, kurvradier etc. Nackdelen är att ingen produkt är kommersiellt tillgänglig i dagsläget.

Då de verkade mest lovande valdes vibrationsmetoderna ut för en fördjupad teoretiskt studie. Resultaten beskrivs kortfattat nedan. En utförligare beskrivning finns i fem rapporter [5, 6, 9, 11, 12].



Figur 1: Modeller av spårssystem.

### 3 Experimentell undersökning av vibrationsmetoderna

#### 3.1 Rälresonansmetoden

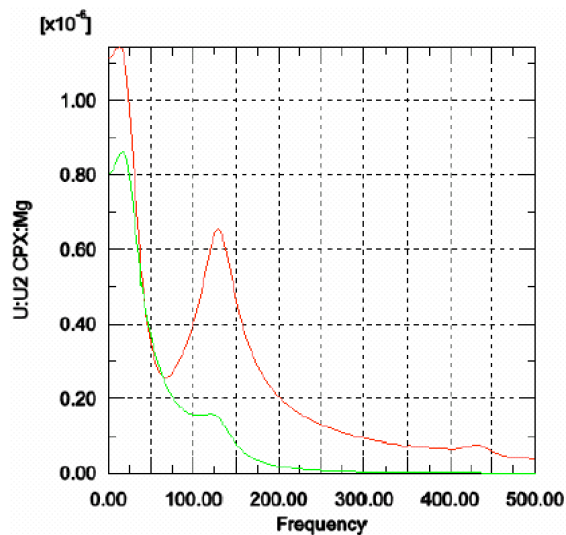
Teoretiska studier har gjorts av svängande rälsegment med dels balkmodeller ([5] avsnitt 3.1 och [6] avsnitt 3.1) och dels FE-modeller [11]. Det visar sig att egenfrekvensen är känslig inte bara för axialkraft utan även för rälens inspänningsförhållanden mot slippers. Ett problem är att denna inspänning inte är kontrollerbar i fält.

Laboratorieförsök konfirmerade dessa slutsatser. De påvisade dessutom att problemet är så kraftigt olinjärt att det i praktiken inte är lösbart. Den främsta förklaringen till detta torde vara de olinjära mellanläggen.

Sammanfattningsvis är resonansmätning hos räl inte en lämplig metod för bestämning av den spänningsfria temperaturen när det föreligger tryckkrafter i denna. Om man är säker på att det är dragkrafter i rälerna kan fler klämmor lossas och en betydlig längre frivängande rälsegment erhållas. Inspänningen av detta i rälklämmorna blir då mindre kritisk och metoden skulle kunna bli användbar. Den matematiska behandlingen av rälresonanser liknar den för lyftmetoden varför metoden skulle kunna bli ett komplement eller ersättning av lyftmetoden.

#### 3.2 Spårresonansmetoden

I denna metod studeras den samverkande svängningen av räl tillsammans med slippers och ballast. Den lägsta resonansfrekvensen för detta system ligger i storleksordningen 10 Hz. Här finns inga avgränsade randvillkor utan en lång bit av banvallen sätts i svängning, se avsnitt 3.3 i [5]. En matematisk analys av metoden har i ett första steg gjorts analytiskt (se avsnitt 3.3 i [6]) och därefter med FE-modeller (se avsnitt 1 i [11]). Resultaten visar att resonansfrekvensen beror av axialkraft och sidomotstånd i kombination. Frekvensen är förhållandevis okänslig för axialkraften om inte sidomotståndet redan är lågt [11].



Figur 2: Resultat från finita element-beräkningar av banvallsresonanser. Lägsta egenfrekvensen är strax över 10Hz.

### 3.2.1 Fältmätningar

I ett helt annat projekt mättes laterala accelerationer i räl vid tågpassager. Syftet med den mätningen var att studera ljudutbredning och det handlade därför om att mäta högfrekventa vibrationer. Som en första undersökning av spårresonansmetoden har vi trots detta försökt att frekvensanalysera resultaten från dessa mätningar med avseende på lågfrekventa vibrationer. Det visade sig vara möjligt att lösa upp de lågfrekventa vibrationerna, men från vibrationer orsakade av tågpassager går det inte att skatta laterala banvallsresonanser. Detta beror på att vid normala driftsförhållanden exciteras frekvenser i samma frekvensområde som banvallsresonanserna. Det går därför inte att skilja på de vibrationer som är "fordonsrelaterade" och de som är "spårrelaterade".

### 3.2.2 Spårresonansmetodens potential

Som nämnts ovan är det inte möjligt att skatta laterala banvallsresonanser utifrån accelerationer uppmätta vid tågpassager. För att utvärdera metoden måste därför banvallen exciteras på annat sätt, t.ex. med hydraulcylindern i Banverkets mätvagn. Då detta inte rymts inom projektet har vi i dagsläget svårt att uttala oss om metodens användbarhet och potential.

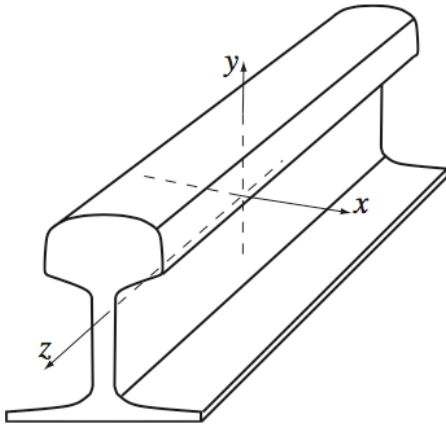
## 3.3 Vågledarmetoden

Att bestämma axialkraften genom att mäta hur egenfrekvensen hos en belastad räl skiljer sig från en obelastad fungerade dåligt eftersom randvillkoren var komplicerade. Det är därför önskvärt att finna en vibrationsmetod som inte är känslig för randvillkor. En sådan metod finns föreslagen i en amerikansk doktorsavhandling. Vi har implementerat

denna metod och testat den med fullskaleförsök i vårt laboratorium. Metoden bygger på en kombination av mätning och beräkningsanalys. En stor del av beräkningarna kan göras en gång för alla varvid resultaten läggs upp i en databas. Den analys som måste göras i samband med mätningen i fält kan därmed minimeras. Den kan med fördel också automatiseras så att ingen beräkningskompetens behöver utnyttjas i fält.

### 3.3.1 Vågledarmetodens fysik

Uppställande av dynamisk jämvikt för en oändligt lång svängande balk ger en vågekvation. Under tämligen allmänna villkor kan lösningen till vågekvationen då balken exciteras sinusformigt skrivas



Figur 3: Definition av koordinatsystemet i rälen

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u(x, y) \cdot e^{i\omega t - ikz} \\ v(x, y, z, t) &= v(x, y) \cdot e^{i\omega t - ikz} \\ w(x, y, z, t) &= w(x, y) \cdot e^{i\omega t - ikz} \end{aligned} \quad (2)$$

I ekvation 2 är  $u$  förskjutning i  $x$ -led,  $v$  förskjutning i  $y$ -led och  $w$  förskjutning i  $z$ -led. I det allmänna fallet förekommer förskjutning i dessa tre riktningar samtidigt. Rörelsen hos rälen är då en kombination av lateral och vertikal böjsvängning, torsionssvängning samt longitudinell dragsvängning.

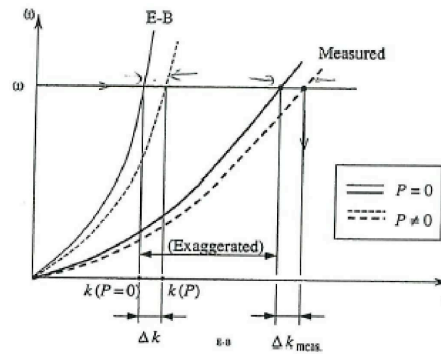
Variabeln  $k$  i ekvation 2 är det s.k. vågtalet. Om  $k$  är reell varierar förskjutning-

en sinusformigt i balkens längdriktning, vi har en propagerande våg. Om  $k$  är komplex får vi en dämpad våg. Lösningen innehåller oändligt många vågtal  $k$ , svarande mot olika propagerande och dämpade böj-, torsions- och dragsvängningar. För varje svängningsmod beror  $k$  på excitationsfrekvensen  $\omega$ , den s.k. dispersionsrelationen.

Om balken är påverkad av en axiell kraft ändras dispersionsrelationen för böjvågornas vågtal något. Denna ändring i vågtalet skulle kunna användas för att skatta axialkraften. För att få en bra uppskattning av ändringen bör vågtalet för den obelastade rälen beräknas på noggrannast tänkbara vis, d.v.s. helst med en detaljerad FE-modell vilka kan analysera såväl propagerande som dämpade sammansatta vågrörelser. Tyvärr är det mycket komplicerat att beräkna vågtal för axialbelastade balkar på detta vis. I de analyser som gjorts i detta projekt antar vi därför att den relativa ändringen i vågtal för en belastad räl kan beräknas med Euler–Bernoullis balkteori vilken enbart kan inkludera propagerande vågor. Trots att detta kan ge skillnader i absoluta vågtal så blir felet i relativ ändring av vågtal på grund av axialbelastning liten, se figur 4.

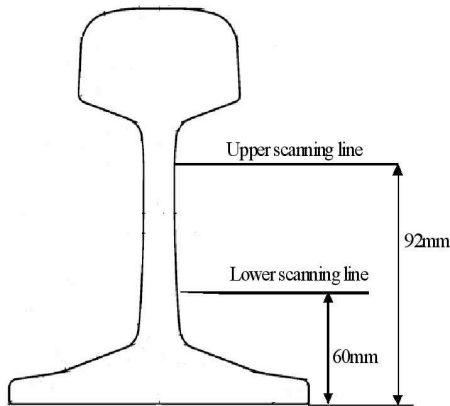
Den experimentella metod som använts går ut på att excitera lateral böjsvängning i rälen, mäta utböjningen och från denna skatta våglängden d.v.s. vågtalet. Detta vågtal jämförs sedan med det vågtal som beräknats för den obelastade rälen. Ur skillnaden kan





Figur 4: Jämförelse mellan verklig dispersionsrelation (excitationsfrekvensen  $\omega$  som funktion av vågtalet  $k$ ) för en propagerande böjvåg och dispersionsrelation beräknad med Euler–Bernoulli-teori. Absolutvärden skiljer sig åt, men den relativa ändringen kan med god noggrannhet beräknas med Euler–Bernoullis teori.

axialkraften skattas. Ändringen i vågtalet beroende på axialkraften är liten varför såväl mätningar som beräkningar måste vara mycket noggranna.



Figur 5: Rältvärnsnittet och de två scanningslinjer längs vilka den laterala utböjningen mättes i laboratorieuppställningen.

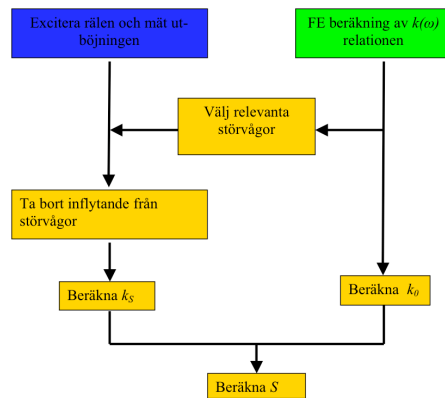
Den utböjning vi kommer att mäta består till stor del av lateral böjning, men även av bidrag från andra moder, främst torsionsmoder och dämpade vågor. Genom att placera excitern i neutrallagret och rikta denna noga kan dessa störvågor reduceras, men inte helt elimineras. Innan våglängden beräknas måste därför den del av utböjningen som beror av störvågorna bestämmas och elimineras. Detta görs genom att ställa upp ett uttryck där samtliga tänkbara vågor summeras med okända amplituder. Även vågtalet för böjmoden antas i detta uttryck vara okänd. Detta uttryck anpassas sedan till den uppmätta utböjningen vilket leder till att vågtal och amplituder bestäms. De olika stegen i

metoden visas i figur 6.

För att bättre kunna detektera torsionsmoder är det lämpligt att mäta utböjningen längs två parallella linjer på rälets liv, se figur 5.

### 3.3.2 FE-beräkningar

Beräknings- och analysdelen beskrevs först i en avhandling från USA. Detta finns beskrivet i avsnitt 4.2 i [5] och avsnitt 4.2 i [6]. Det visade sig att denna information var ofullständig och många frågor väcktes som inte heller klarnade i kontakter med Univer-



Figur 6: Analysgång i vågledarmetoden. Som framgår av figuren innehåller metoden såväl experimentell verksamhet, d.v.s. excitering och mätning (blå box) som FE-beräkningar (grön box) och analys (gula boxar).

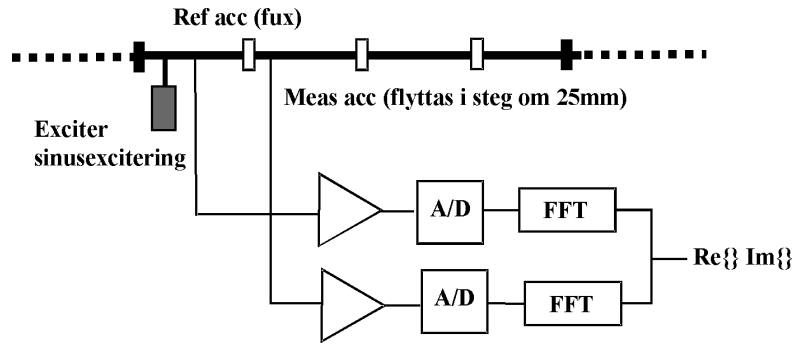
sitetet i USA. För att kunna utvärdera och förstå metoden behövde därför matematiken bakom metoden redas ut och implementeras i en FE-kod. Detta finns utförligt beskrivet i [9]. Den matematiska formuleringen svarar mot en stor mängd vågor som utbreder sig vinkelrät mot räلتvärsnitt. En finita elementformulering av ett sådant problem finns inte i kommersiella koder varför en egen FE-kod fick utvecklas och skrivas i projektet. Denna finns kortfattat beskriven i [12].

### 3.3.3 Laboriemätningar

Vågledarmetoden blir noggrannare ju längre frisvängande rälsegment som används eftersom utböjningen av den svängande rälen blir större och därmed lättare att mäta noggrant. Detta måste dock balanseras mot risken för knäckning vid höga axiella tryckklaster. I laborieuppsättningen vågade vi därför inte lossa mer än tre klämmor.

För att mäta rälets utböjning användes accelerometrar i laboriet då vi inte visste storleken på utböjningarna eller vilken noggrannhet hos mätsystemet som krävdes. I fältmätningar kommer lasermätning att användas eftersom detta är en snabb och noggrann metod.

Vi ritsade två längsgående linjer på rälen som definierade de två scanningslinjerna. På varje linje gjorde vi sedan tvärritsar var 25e mm. Varje skärning mellan tvär- och längsgående rits gav en mätpunkt. Mätaccelerometern flyttades mellan dessa mätpunkter. Detta mätförfarande tar lång tid och drift hos mätsystemet kan då störa mätningen. Det är därför nödvändigt att ha en referensaccelerometer som inte flyttas. Utböjningen mäts då som kvoten mellan dessa accelerometersignaler. Genom att använda samma typ av accelerometrar, signalkonditioneringssystem och datainsamlingsystem elimineras de flesta fel som beror på dålig stabilitet hos mät- och excitationssystemet. För varje mätpunkt samplades ca 20 sekunder långa tidsförlopp till mätdator. Med Fast Fourier Transform (FFT) teknik bestämdes real och imaginärdelar i signalerna. Figur 7 visar en schematisk skiss av mätsystemet.



Figur 7: Schematisk skiss av mätsystemet. Mät- och referensaccelerometer är av samma typ. Signalkonditionering och sampling till dator görs med identisk utrustning. Eventuell temperaturdrift eller annan långtidsinstabilitet kommer därför inte att påverka kvoten mellan mät- och referensaccelerometersignalerna.

Beräknade laterala utböjningarna från en mätserie visas i figur 8.

### 3.3.4 Bestämning av axialkrafter från mät- och beräkningsresultat

Som framgår av figur 8 innehåller den uppmätta utböjningen normalt en torsionskomponent. Troligtvis finns det även dämpade vågor, även om dessa inte syns direkt i figur 8. För att kunna bestämma våglängd och vågtal med erforderlig noggrannhet måste dessa störvågor elimineras.

Från FE-beräkningarna kan möjliga utböjningsmoder vid den aktuella excitationens frekvensen erhållas. Plottar av dessa visas i figur 9.

Våglängden för laterala böjmoder skall nu bestämmas. Detta görs genom anpassning av våglängd och amplitud hos de möjliga utböjningsmoderna så att avvikelserna från uppmätt utböjning minimeras, se figur 10. Den våglängd för lateral böjning vi erhöll vid anpassningen används nu för att skatta axialkraften.

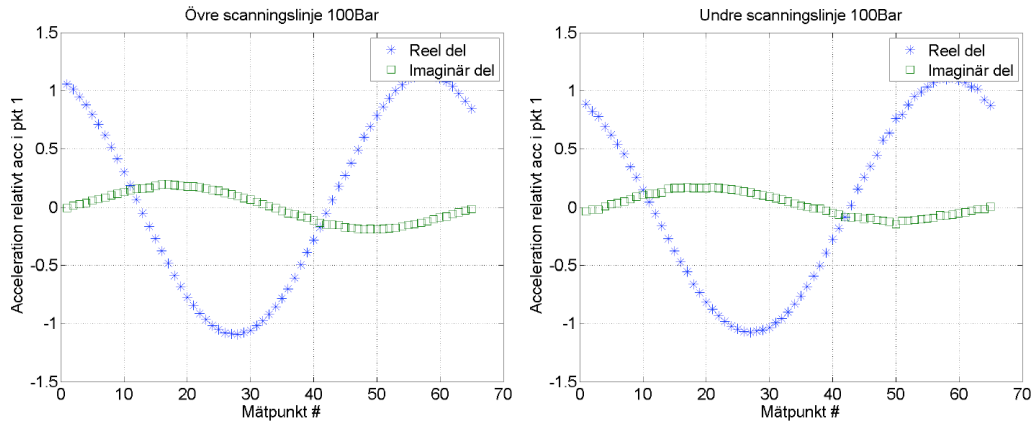
Vi genomförde fyra olika mätserier med olika pålagda axialkrafter och skattade axialkraften vid varje mätserie. Skattade krafter jämfördes sedan med verkliga krafter. Resultatet visas i figur 11.

### 3.3.5 Analyser av onoggrannhet och osäkerhet

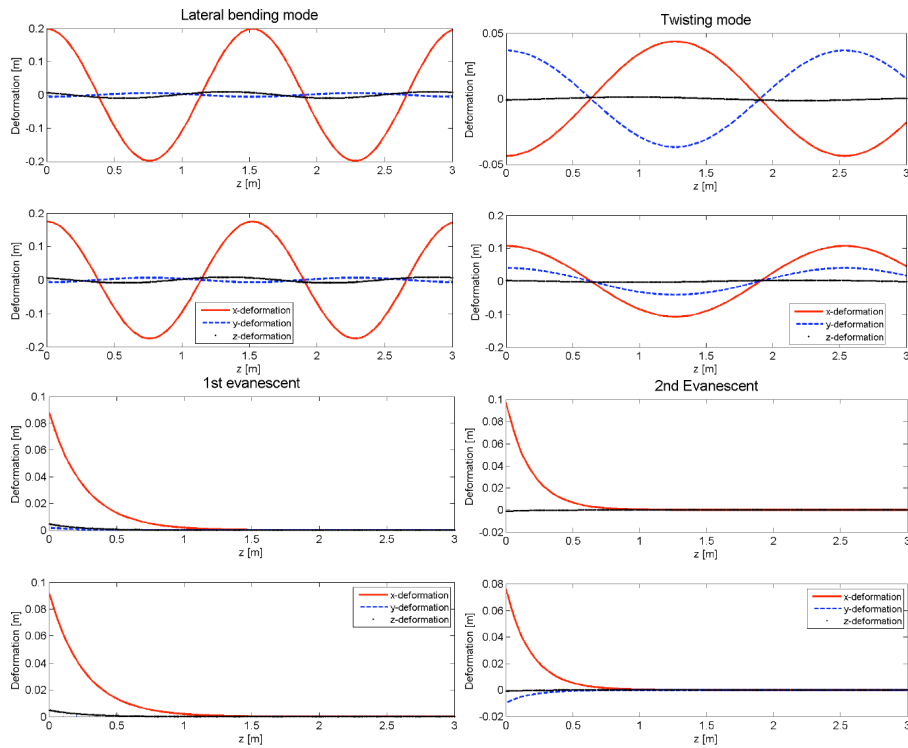
Vågledarmetoden går ut på att skatta skillnad i vågtalet för den laterala böjsvängningen för belastad och obelastad räl enligt ekvation 3.

$$\Delta k = \hat{k}_s - k_{FE} \quad (3)$$

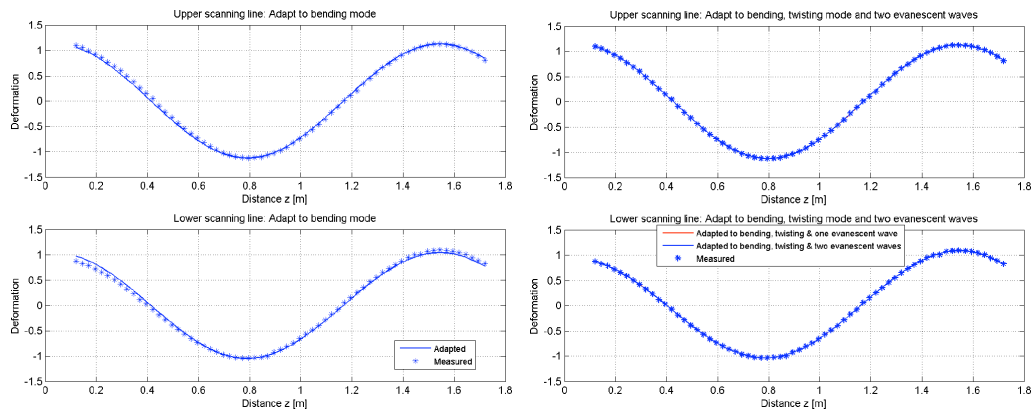
Vågtalet för den belastade rälen,  $\hat{k}_s$ , får vi från mätningarna och vågtalet för den obelastade rälen,  $k_{FE}$ , från FE-beräkningarna. Utifrån skillnaden i vågtal,  $\Delta k$ , skattas sedan axialkraften,  $\hat{S}$ , enligt ekvation 4.



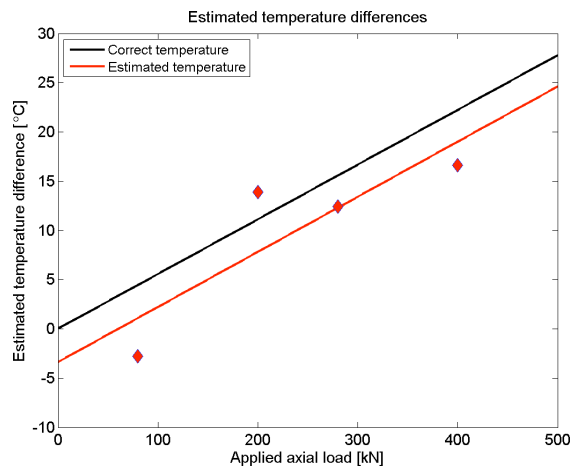
Figur 8: Uppmäta laterala utböjningar längs de två scanningslinjerna vid en mätserie. Det syns att utböjningarna längs de två scanningslinjerna är lite olika, d.v.s. svängningen innehåller en torsionsmod.



Figur 9: De viktigaste utböjningsmoderna vid aktuella excitationsfrekvens. För varje mod visas utböjningen längs övre och undre scanningslinje. Överst till vänster visas den laterala böjmoden. Den övre högra grafen visar torsionsmoden och de två undre graferna de dominerande dämpade vågorna.



Figur 10: Uppmätt utböjning anpassad till en utböjning som innehåller lateral böjmod, torsionsmod och dämpade vågor. Till vänster anpassning enbart till böjmoden, till höger anpassning till samtliga moder.



Figur 11: Skattade krafter omräknade till spänningsfria temperaturer (röda punkter) med en linjär anpassning (heldragen röd linje). Den svarta linjen visar verkliga krafter omräknade till spänningsfria temperaturer. Den röda linjen har riktig lutning, men är knappt 5 grader lägre än verklig temperatur. Spridningen hos enskilda skattningar är något större.

Skattning		FE-beräkning
Mätning	Datorbearbetning	
Temperaturdrift hos givare, förstärkare, ...	Hittar inte rätt minimum i objektfunktionen	För grov mesh
Kvarvarande friktion räl – mellanlägg i lossade klämmor	Anpassning till felaktiga / otillräckligt antal vågor	Fel i geometrin (fel i antaget / varierande tvärsnitt)
Ritsfel, felpositionering av mätaccelerometern	Dåligt valda startvärden vid minimeringen	Fel i materialparametrar ( $E, \rho$ )

Tabell 2: En sammanställning över möjliga felkällor vid bestämningen av  $\Delta k$  och vår bedömning av hur dessa fel kan hanteras.

Grönmarkerade felkällor bedömer vi vara hanterbara.

Felkällor i geometrin hanteras genom att mäta räلتvårsnittet vid varje mättillfälle och utnyttja en databank av beräknade vågvektorer.

Felkällor i bestämning av materialparametrar är svårare. I värsta fall kan man göra mätningar vid två olika temperaturer för att kompensera för detta.

$$\hat{S} = 4\sqrt{EI\rho A\omega} \cdot \frac{\Delta k}{k_{\text{FE}}} \quad (4)$$

Här är  $E$  elasticitetsmodul,  $I$  yttröghetsmoment (för lateral utböjning),  $\rho$  densitet hos rälmaterialet,  $A$  rälsektionens area och  $\omega$ ,  $\Delta k$  och  $k_{\text{FE}}$  enligt ovan.

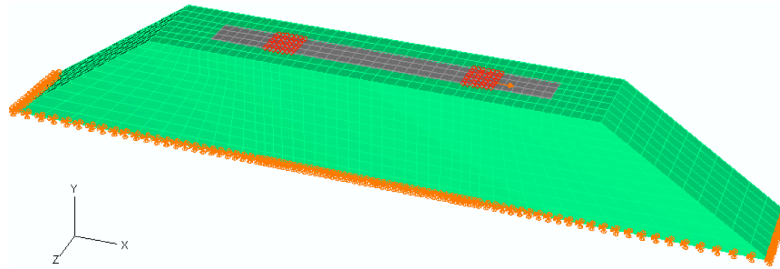
Offseten i figur 11 kan förklaras med ett litet fel i  $\Delta k$ . Skillnaden i vågtal,  $\Delta k$ , är liten varför det är ytterst viktigt att såväl mätningar som beräkningar har hög noggrannhet. Det relativa felet bör vara mindre än 0,1%. Vanligtvis ligger noggrannhetskravet i mätningar och beräkningar på någon eller några procent.

I tabell 2 har vi sammanställt tänkbara orsaker till en felaktig uppskattning av  $\Delta k$ . Där finns även en bedömning av hur dessa fel kan hanteras.

För att förbättra bestämningen av den spänningsfria temperaturen måste materialparametrarna ( $E$  och  $\rho$ ) vara kända med betydligt högre noggrannhet än vad som anges i ingenjörshandböcker. Dessa parametrar är dock stabila i tiden och varierar inte mycket mellan olika batcher av tillverkade räler, vilket innebär att detta bör vara hanterbart. Ytterligare ett problem är att normalt slitage på rälen ändrar geometrin hos tvärsnittet ( $I$  och  $A$ ) vilket måste beaktas vid beräkningarna. Detta kan hanteras genom att utvärdera  $k_{\text{FE}}$  för räler med olika grader av slitage och lagra dessa i en databas. Även om sådana beräkningar är tidsödande görs de endast en gång. Vid mättillfället mäts profilen hos det aktuella räلتvårsnittet och beräkningsresultat från räलprofiler med liknande grad av slitage används.

### 3.3.6 Slutsatser av metodens potential

Vi har med fullskalemätningar i vårt laboratorium visat att metoden fungerar. Resultaten visar en liten offset mellan skattad och simulerad spänningsfri temperatur. Denna offset anser vi vara möjlig att reducera genom att använda mer korrekta värden på rälen materialparametrar och räkna på verkliga i stället för nominella rälvärnsnitt. Den spridning i mätdata vi har kring medellinjen hoppas vi kunna minska genom att ytterligare förfinas mätning och analys.



Figur 12: Sliper (grå) inbäddad i ballast (grön). De orangea markeringarna representerar låsta förskjutningar på undersidan av sliper och föreskrivna förskjutningar i positioner motsvarande mellanlägg.

## 4 Vilket sidomotstånd har spåret?

Som nämnts ovan ges risken för solkurvor inte enbart av den axiella kraften i spåret utan även av laterala krafter och av spårets sidomotstånd. Sidomotståndet bestäms av ett antal faktorer såsom rälets böjmotstånd i sidled, befästningstyp, slipertyp och ballast. Motståndet påverkas även av belastningstyp och nivå. Till exempel leder en högre vertikal last till ett högre sidomotstånd.

En nyckelfaktor när det gäller att bestämma spårets totala sidomotstånd är att kvantifiera motståndet från sliper och ballast. Ballastmotståndet är erkänt svårt att uppskatta. I såväl fältförsök och laboratorieexperiment, som i numeriska simuleringar är man tvingad till att göra en hel del förenklingar. Detta motstånd är inte heller konstant utan sjunker till exempel dramatiskt efter spårarbeten.

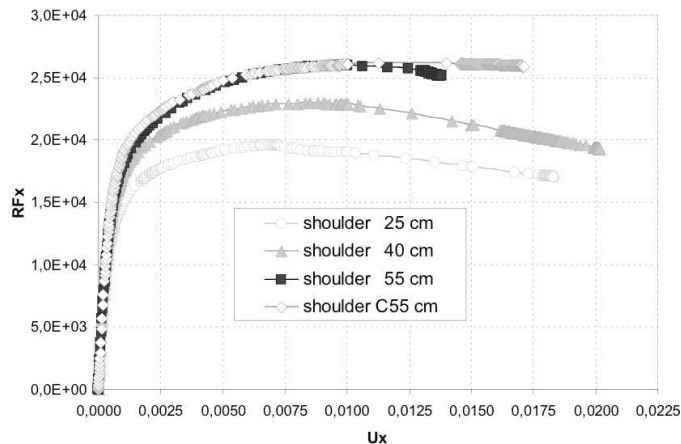
På grund av den relativt låga kunskapen om ballastmotståndet jämfört med den stora inverkan det har bestämdes att det skulle undersökas mer i detalj. Undersökningen inleddes med en sammanställning av tidigare forskning runt om i världen. Denna “state-of-the-art”-studie redovisas utförligt i referenserna [1, 2].

### 4.1 Numeriska simuleringar

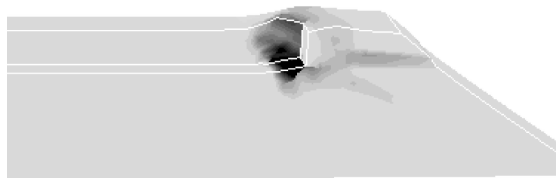
För att komplettera och förbättra kunskapen om olika parametrars inverkan på ballastens sidomotstånd genomfördes numeriska simuleringar. En finit element-modell av en sliper inbäddad i ballast byggdes upp. Initialt användes en två-dimensionell (2D) modell. Denna byttes senare ut till det mer realistiska fallet med en tre-dimensionell (3D) modell av sliper och ballast, se figur 12.

Slipern belastas så att den förskjuts lateralt, d.v.s. vinkelrät spåret. Belastningen har lagts på både som föreskriven last och förskjutning. Det förra har fördelen att mer likna den verkliga belastningen. Dock kan man bara belasta upp till det maximala motståndet, d.v.s. teoretiskt det motstånd som uppnås efter cirka 3 till 7 millimeter i figur 13. Därefter kommer den numeriska lösningen att divergera. I praktiken skedde detta dock redan innan en millimeters lateral förskjutning.





Figur 13: Exempel på samband mellan reaktionskraft ( $RF_x$ ) och förskjutning ( $u_x$ ) för sliper med styrd lateral förskjutning och varierande ballastskuldror. Vertikal last är  $F_y = 1$  kN och friktionskoefficient mellan sliper och ballast  $\mu = 0.8$ . Från [18].

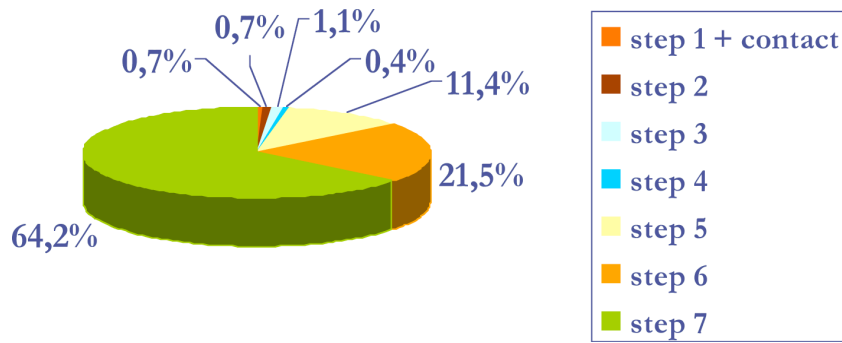


Figur 14: Exempel på lokaliseringzoner med höga deformationer vid slutbrott i ballastskuldran. Bilden visar deformationen i form av maximal logaritmisk huvudtöjning. Från [18].

För att studera förloppet efter de få millimetrars deformation som en kraftstyrd analys tillät gick vi över till förskjutningsstyrd analys. Den laterala förskjutningen vid det högra mellanlägget i figur 12 ökades då successivt och den resulterande kraften från ballasten analyserades. Resultatet blir en förskjutningskurva enligt figur 13. Som synes kan man i en förskjutningsstyrd analys studera förloppet upp till cirka 20 mm lateral förskjutning.

En stor utmaning med att numeriskt modellera ballastmotståndet är att hitta en lämplig materialmodell för ballasten. Ballast är ett så kallat granulärt material med speciella egenskaper. Till exempel ökar dess hållfasthet med ökande tryck. För simuleringarna användes en modell framtagen av LARS JACOBSSON i ett tidigare CHARMEC-projekt. Modellen representerar det bästa som finns inom området och beskrivs mycket översiktligt (men med referenser till mer detaljerade beskrivningar) i APPENDIX I i [18].

De numeriska problemen som generellt finns med att modellera ballastdeformation förstärks i det studerade problemet av att banvallen (numeriskt) belastas till brott. Detta leder fysiskt till lokaliserade zoner med mycket höga deformationer, se figur 14. Numeriskt leder de lokaliserade zonerna till problem med att få lösningarna att konvergera.



Figur 15: En sammanställning av beräkningstiden för en analys av sliperförskjutning. De olika beräkningsstegen är etablering av kontakt mellan sliper och ballast följt av

1. gravitationslast,
2. konsolideringslast  $F_y = 150$  kN,
3. avlastning  $F_y = 0$  kN,
4. vertikal belastning,
5. lateral förskjutning  $u_x = 1$  till 10 mm,
6. lateral förskjutning  $u_x = 10$  till 15 mm,
7. lateral förskjutning  $u_x = 15$  till 20 mm.

Totala beräkningstiden för denna analys är cirka 80 timmar.

Att motverka detta kräver ett omfattande jobb med att ställa in finita element-kodens lösningsparametrar.

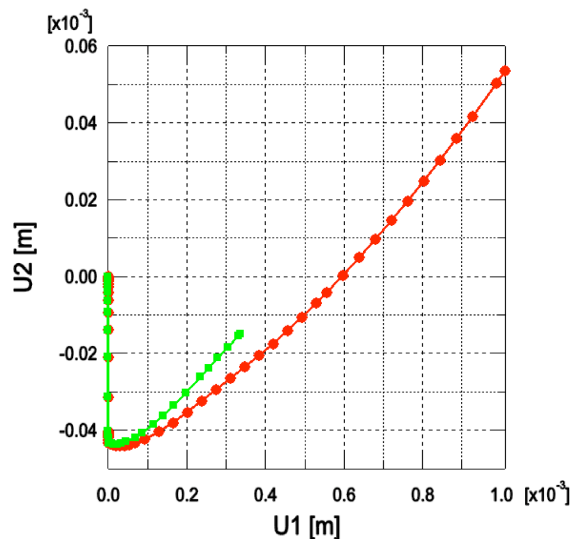
Beräkningstiderna för de finita element-analyser som beskrivs ovan är mycket långa. Speciellt analysen av det avslutande skedet då brottzonerna formas kräver långa beräkningstider. I figur 15 visas hur beräkningstiden fördelar sig mellan de olika beräkningsstegen. Den totala beräkningstiden för hela parameterstudien ligger omkring ett CPU-år på Chalmers centrala beräkningskluster.

## 4.2 Resultat från parameterstudier

### 4.2.1 Reaktionskrafter och förskjutningar

Kraft-förskjutningssambandet i figur 13 är representativt för samtliga simuleringar. I princip ökar kraften linjärt med förskjutningen upp till ett gränsvärde. Detta föregås av en viss inledande styvhetsminskning. Vid relativt stora deformationer kan man se tendenser till mjuknande (den resulterande kraften minskar). Notera i detta sammanhang att materialmodellen i sig inte inkluderar mjuknande utan detta är en struktureffekt.

Under en lateral last eller påtvingad förskjutning förskjuts slipern i stort sett lateralt. Det finns en liten lyftande effekt. Som synes i figur 16 är denna aningen mer uttalad för kraftstyrda förlopp, men fortfarande väldigt liten.



Figur 16: Förskjutning i vertikal ( $U_2$ ) och lateral ( $U_1$ ). Den kortare gröna kurvan representerar ett kraftstyrt förlopp, medan den längre röda kurvan redovisar ett deformationsstyrt förlopp. Notera de olika skalorna.

#### 4.2.2 Parameterinflytande

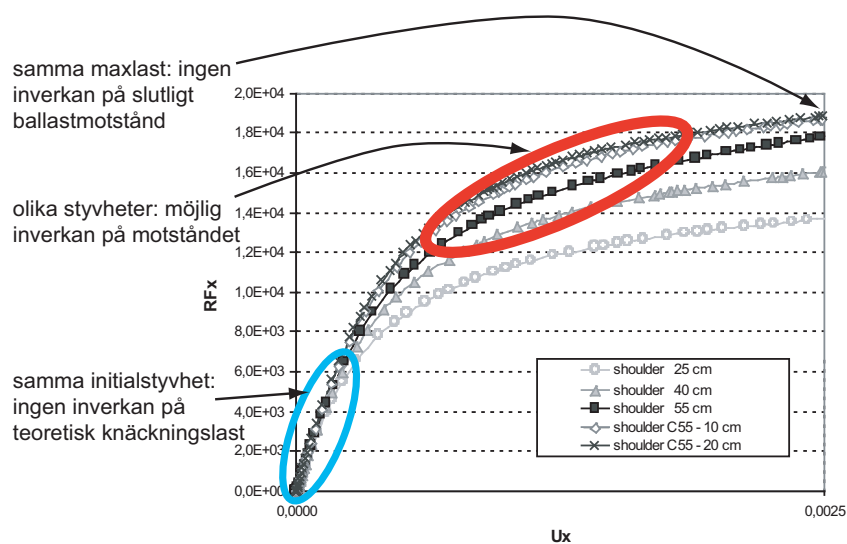
I den parameterstudie som genomfördes och redovisas i [18] varierades ballastgeometri, friktion mellan sliper och ballast, samt vertikal lastnivå. I det senare fallet togs även lyftande last med då solkurvor tenderar att initieras mellan hjulen i en boggie där lyftande krafter kan förekomma.

Simuleringarna kvantifierade det positiva inflytandet av bredare ballastskuldror (se figur 13), ökad friktion och högre vertikala lastnivåer. Några nyckelresultat sammanfattas i tabell 3.

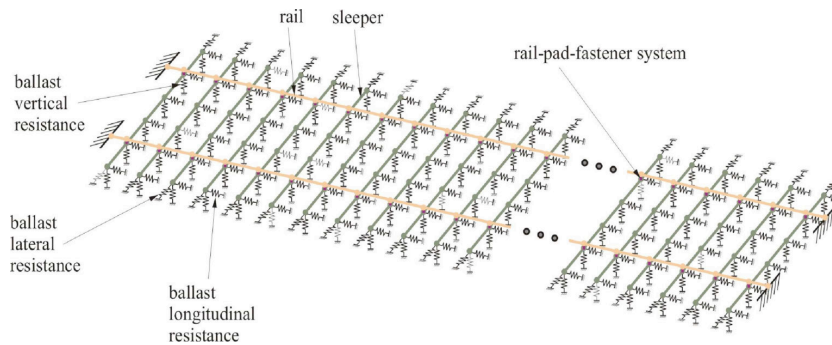
Vad som var mer oväntat var inverkan (eller snarare bristen av inverkan) av en ballastförhöjning. I skarpa kurvor (radie mindre än 400 meter) används en ballastprofil där skuldran har en bredd av 55 cm och en överhöjning av 10 cm. I figur 13 betecknas denna skuldra med "C55 cm". Man ser att skillnaden mot en 55 cm bred skuldra utan överhöjning är mycket liten. Detta stämmer inte med de (i och för sig få och svårtydda) resultat som finns i litteraturen. För att undersöka saken närmare gjordes ytterligare en simulering med 20 cm överhöjning. I figur 17 redovisas kraft-förskjutningssambandet för de första 2,5 millimetrarnas lateraldeformation. Man ser att en överhöjning av skuldran inte påverkar den initiala styvheten och därmed inte heller den teoretiska knäcklasten (som relateras till upplagsstyvheten). Inte heller det maximala sidomotståndet förändrades. Den effekt som en överhöjning ger är att styvheten ökar något i ett avsnitt med mellan 1 och 3 millimeters deformation.

		Maximal lateral reaktionskraft				Skillnad i maximal reaktionskraft (%)	
Vertikal last (kN)	Friktion	25 cm skuldra	40 cm skuldra	55 cm skuldra	55 cm överhöjd skuldra	40-25 cm	40-55 cm
-15	0,1	16.2	18.7	22.5	22.0	-13.4	16.9
-15	0,8	20.6	23.9	28.5	27.9	-13.8	16.1
1	0,1	15.1	17.7	21.8	20.9	-14.7	18.8
1	0,8	19.6	22.9	25.9	26.1	-14.4	11.6

Tabell 3: Sammanställning av några nyckelresultat från studie av olika parametrars inverkan på spårets sidomotstånd.



Figur 17: Inverkan av överhöjning av ballastskuldran på ballastens laterala motstånd. Notera att förskjutningsskalan enbart täcker de första 2,5 millimetrarna.



Figur 18: Principiell skiss över finita element-modellen av spårstrukturen för solkurveanalys.

## 5 Kan man förutsäga när solkurvor uppkommer?

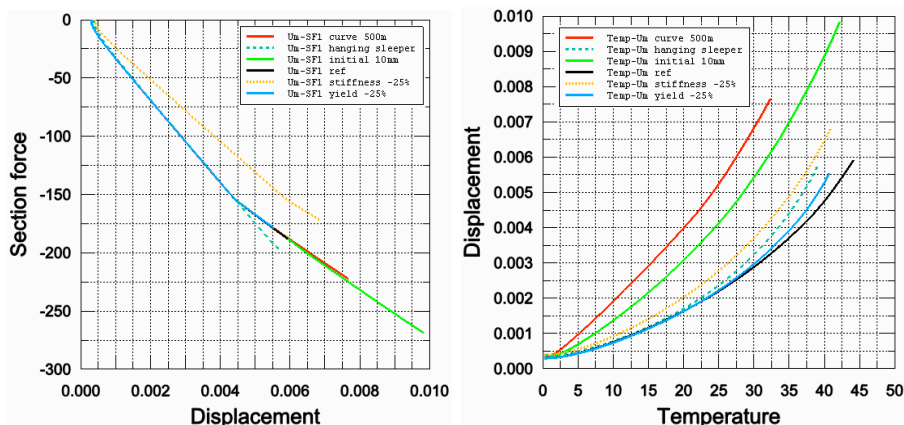
Den parameterstudie som redovisas ovan är naturligtvis intressant för att förstå hur banvallens sidomotstånd fungerar och vilka parametrar som påverkar detta. Däremot är nyttan mindre när det gäller att förutsäga under vilka förhållanden man kan förvänta sig solkurvor och hur olika åtgärder minskar risken för dessa.

För att råda bot på detta har en finita element-modell av en hel spårstruktur tagits fram inom projektet. En schematisk översikt över spårmodellen ges i figur 18. Här modelleras räler och sliplar som balkar, medan befästningar och mellanlägg modelleras som fjädrar. För ballasten har en modell tagits fram (se referenserna [7, 8]) vilken kan imitera den respons som simulerats fram i de tre-dimensionella finita element-simuleringar som beskrivs i avsnitt 4. Då generering av en finita elementmodell av spårstrukturen för solkurveanalys är arbetsam har ett Python<sup>1</sup>-skript skapats för att underlätta denna process. Skriptet är döpt till PRESOL. En manual är framtagen, se referens [20].

Då finita element-modellen är framtagen är nästa fråga hur man numeriskt analyserar uppkomsten av solkurvor. Svaret visar sig vara långt ifrån självklart. Traditionellt ser man uppkomsten av solkurvor som ett stabilitetsfenomen. Spåret kan ses som en balkstruktur som vilar på fjädrande upplag och solkurvan uppkommer då axiallasten uppgår till den kritiska knäcklasten. Problemet med detta angreppssätt är att det förutsätter en ideal struktur (med t.ex. helt raka räler), samt linjära fjäderstyvheter (de kan vara icke-linjära, men detta kommer normalt inte in i knäckningsanalysen). Med denna typ av linjär analys predikteras även den kritiska temperaturen då spåret knäcker (d.v.s. en solkurva uppkommer) till mer än 100 °C över spänningsfri temperatur.

Vill man ta hänsyn till initialkrokigheter, icke-linjära styvheter och andra laster än axialkraften i rälen, måste man istället göra en gränslastanalys. Detta innebär att man gradvis ökar på lasten och analyserar responsen. Eftersom strukturen kan "mjukna" (d.v.s. den last den kan ta upp minskar) vid ökande belastning krävs speciella beräkningstekniker. I detta projekt har s.k. Riks-analys använts. För att definiera initialkrokighet utförs

<sup>1</sup>Programmeringsspråk med öppen källkod som kan laddas ned gratis t.ex. från [www.python.org](http://www.python.org)



Figur 19: Sammanfattning av simuleringar av uppkomst av solkurvor. De fall som studerats är referensfall (initialdeformation med amplituden 5 mm), ballaststyvhet -25%, flytgräns hos ballast -25%, hängande sliper, initialdeformation med amplituden 10 mm, kurvradie 500 m. Resultaten redovisas i sektionkrafter [N] (till vänster) och förskjutningar [m] (till höger). Detaljer om simuleringarna ges i referens [19].

en linjär knäckningsanalys. Den beräknade knäckmoden läses in i PRESOL, utböjningen skalas och läggs på som initialkrokighet i Riks-analysen. Detta förfarande beskrivs i [19].

Gränslasten bör i en icke-linjär sättas som den lastnivå där “oacceptabla” deformationer uppkommer. Det ligger i sakens natur att denna gränslast inte är lika väldefinierad som knäcklasten. De simuleringar som gjorts tyder på att definitionen av gränslast i solkurveanalyser kräver en hel del eftertanke. Baserat på de simuleringar som redovisas i [19] föreslås att man skall ta hänsyn till två kriterier för utvärdering av kritiska laster vid numerisk simulering av uppkomst av solkurvor: Dels kan förskjutningarna överstiga ett fastställt “tillåtet” värde. Även om detta tillstånd inte definitionsmässigt motsvarar en gränslast kommer spårläget att bli så dåligt att trafikering av spåret kommer att orsaka höga lateralkrafter vilka i sin tur ökar deformationerna. Det andra kriteriet är när strukturen uppvisar ett mjuknande. Ett sådant kriterium motsvarar bättre ett klassiskt gränslastkriterium.

Resultaten från den inledande parameterstudie som redovisas i [19] sammanfattas i figur 19. Detaljer och analyser finns redovisade i referens [19].

## 6 Sammanfattning av resultat och slutsatser

### 6.1 Mätning av spänningsfri temperatur i räl

I projektet har inledningsvis flera olika mätmetoder för spänningsfri temperatur studerats. Fördjupade studier har därefter gjorts på vågledarmetoden, spårresonansmetoden och rälresonansmetoden.

Vågledarmetoden har studerats genom fullskaleförsök i laboratorium. Rälen exciteras och svängningsrörelsen i lateral led mäts och kan relateras till axialkraft genom optimerings- och vågutbredningsanalys. Beräkningsprogram för detta har tagits fram. De olika källorna som påverkar mätosäkerhet har identifierats och kvantifierats. Metoden har därefter testats i fullskaleförsök i laboratorium och visat sig fungera.

I spårresonansmetoden studeras svängningar i hela spårsystemet, inkluderande räl, slipers och ballast. Svängningsfrekvensen beror både av axialkraften i rälen och sidostyvheten i ballasten. Båda dessa faktorer påverkar risken för en solkurva och spårresonansfrekvensens värde blir därmed ett totalt riskmått för solkurvor. Metoden har undersökts genom fältmätningar och FE-beräkningar. Dessa visar att tågpassager inte kan användas som exciteringskälla utan excitering måste ske på annat sätt, t ex med en hydraulcylinder.

I rälresonansmetoden utnyttjar man att rälen svänger med en frekvens som bl a beror av axialkraften i rälen. Metoden har studerats både genom FE-simuleringar och genom fullskaleförsök i laboratorium. Den visade sig inte vara lämplig vid tryckkrafter i rälen då okontrollerbar inverkan från inspänningen i slipers inträffar. Däremot kan den vara användbar vid dragkrafter då fler klämmor kan lossas från rälen.

### 6.2 Bedömning av spårets sidomotstånd

Projektet har givit en bra överblick över hur olika parametrar påverkar spårets sidomotstånd. Speciellt har simuleringar kunnat visa på att några av de metoder som idag används för att öka sidomotståndet är motiverade (t.ex. breddning av ballastskuldra, tyngre slipers), medan andra är mer tveksamma och bör undersökas ytterligare (överhöjning av ballastskuldra).

Kompetens, rutiner, modeller och metoder för finita element-analyser av sidomotståndet har byggts upp. Detta innebär att man enklare kan göra framtida studier. För att ytterligare förenkla har ett skript som genererar indata-filer till finita elementsimuleringarna tagits fram. Detta, samt det faktum att själva beräkningen är mycket snabb att genomföra (ett par minuter) innebär att ett nytt scenario enkelt och snabbt kan analyseras. Det utvecklade programpaketet har använts till en inledande parameterstudie genomförts. Förutom att visa användbarheten hos programpaketet visar studien på hur spårets sidomotstånd sänks av kurvor, initialkrokighet, sänkt ballastmotstånd och hängande sliprar.

### 6.3 Prediktering av risk för solkurva

En numerisk modell för prediktering av solkurvor har tagits fram. I denna modell inkluderas räls, sliper, mellanlägg och ballast på ett fysikaliskt riktigt sätt.

Ett skript som förenklar genereringen av indata-filer till solkurveanalysen har utvecklats. Detta skript inkluderar rutiner för att ta hänsyn till initialkrokighet hos rälen och kurvor. Egenutvecklade ballastelement som reflekterar ballastens verkliga sidomotstånd kan användas i de icke-linjära gränslastanalyserna. Analyserna inkluderar knäckningsanalys, gränsvärdesanalys där lasten stegas upp, samt RIKS-analys.

En inledande studie har gjorts för att undersöka hur gränslaster kan definieras. Två kompletterande kriterier har föreslagits.



## 7 Rekommendationer

Vad gäller mätning av spänningsfri temperatur i räl är rekommendationen att gå vidare och fältanpassa både vägledarmetoden och spårresonansmetoden. Vägledarmetoden kan bli ett alternativ till dagens metoder för mätning av spänningsfri temperatur medan spårresonansmetoden skulle kunna bli ett snabbt instrument för att identifiera solkurverisk.

Vad gäller prediktering av risk för solkurva har simuleringar klassificerat inverkan av olika parametrar på såväl ballastens sidomotstånd som spårets laterala deformationer på grund av temperaturlast. Redan de resultat som denna studie gett kan användas i en genomgång av dagens regelverk för att undvika solkurvor. För att ytterligare förbättra kunskapen rekommenderas en fördjupad studie av parameterinverkan på risken för uppkomsten av solkurvor. En sådan studie bör även innefatta en utvidgning av indatagenererings-skriptet PRESOL så att t.ex. laterala krafter kan tas med i analysen. Därutöver bör en fördjupad studie genomföras för att undersöka hur slipersunderlägg, ballastmattor och slipers utformning påverkar spårets sidomotstånd. Detta är i dagsläget områden där kunskapen är otillfredsställande, något som ger osäkerhet såväl i dagens normer som i vilka konsekvenser förändringar av spårets uppbyggnad ger.

## Referenser

- [1] ELENA KABO, ANDERS EKBERG & LARS JACOBSSON: **Railway track stability – a state-of-the-art survey**, Chalmers Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden, Report 2004:2, 2004, 94 pp
- [2] ELENA KABO, ANDERS EKBERG & LARS JACOBSSON: **Spårstabilitet – en introduktion för bantekniker** (Track stability – an introduction for track engineers, in Swedish), Chalmers Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden, Report 2004:3, 2004, 20 pp
- [3] ERLAND JOHNSON: **Att förebygga solkurvor – mätning av axialkrafter i järnvägsräls** (To prevent sun-kinks - measurement of axial forces in rails, in Swedish), Working Report 2004:11, SP Building Technology and Mechanics, Borås, Sweden, 2004, 11 pp
- [4] ERLAND JOHNSON: **Measurement of forces and neutral temperatures in railway rails – an introductory study**, Report 2004:11, SP Building Technology and Mechanics, Borås, Sweden, 2004, 69 pp
- [5] ERLAND JOHNSON: **Vibrationsmetoder för mätning av axialkraft i järnvägsräil** (Vibrational methods for measuring axial rail force, in Swedish), SP Technical Note 2005:8, Building Technology and Mechanics, SP Swedish National and Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2005, 20 pp
- [6] ERLAND JOHNSON: **Vibrational methods for measuring axial rail force**, SP Technical Note 2005:11, Building Technology and Mechanics, SP Swedish National and Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2005, 47 pp
- [7] LARS JACOBSSON: **A plasticity model for ballast resistance**, SP Report 2005:27, Building Technology and Mechanics, SP Swedish National and Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2005, 35 pp
- [8] LARS JACOBSSON: **User element for ABAQUS designed to represent ballast resistance**, SP Technical Note 2005:12, Building Technology and Mechanics, SP Swedish National and Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2005, 12 pp
- [9] ERLAND JOHNSON: **The mathematics behind a guided wave technique for rail force determination**, SP Technical Note 2005:10, Building Technology and Mechanics, SP Swedish National and Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2005, 24 pp
- [10] ELENA KABO: **Ballastgeometrins inverkan på spårets sidomotstånd: en parameterstudie** (Influence of ballast geometry on the lateral resistance of the track: a parametric study, in Swedish), Research Report 2005:09, Chalmers Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden, 2005, 29 pp

- [11] HENRIK SNYGG: **Resonansstudie av spårssystem – räl, pads, slipers och ballast** (Resonance study of track systems – rail, pads, sleepers and ballast, in Swedish), SP Technical Note 2006:10, Building Technology and Mechanics, SP Swedish National and Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2006, 34 pp
- [12] ROBERT LILLBACKA: **A Finite Element program for solving dispersion relation in long beams with arbitrary cross section**, SP Arbetsrapport 2006:27, Bygg och Mekanik, Borås, Sweden, 2006, 11 pp
- [13] GUNNAR KJELL: **An investigation of the uncertainties in the estimated load levels when using the guided wave technique**, SP Progress report 2006:17, Building Technology and Mechanics, Borås, Sweden, 2006, 22 pp
- [14] GUNNAR KJELL: **Using the guided wave technique for determination of an axial rail force**, SP Progress report 2006:18, Building Technology and Mechanics, Borås, Sweden, 2006, 30 pp
- [15] GUNNAR KJELL: **Resonance frequency measurement in an axially loaded rail**, SP Progress report 2006:19, Building Technology and Mechanics, Borås, Sweden, 2006, 21pp
- [16] GUNNAR KJELL: **Measurement of axial rail force – experimental set-up for a full scale laboratory experiment**, SP Progress report 2006:20, Building Technology and Mechanics, Borås, Sweden, 2006, 20 pp
- [17] ERLAND JOHNSON & GUNNAR KJELL: **Resonance frequency modelling and measurement in a railway system including rail, pads, sleepers and ballast**, SP Arbetsrapport 2006:21, Bygg och Mekanik, Borås, Sweden, 2006, 12 pp
- [18] ELENA KABO: **A numerical study of the lateral ballast resistance in railway tracks**, Proceedings of the IMECHE Part F Journal of Rail and Rapid Transit, Volume 220, Number 4, 2006, pp. 425–433
- [19] ELENA KABO & ANDERS EKBERG: **Numerisk prediktering av uppkomst av solkurvor – modellering, analys, inledande parameterstudie, samt indatagenerering** (Numerical prediction of the formation of sun-kinks – modelling, analysis, preliminary parametric study and indata generation, in Swedish), Chalmers Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden, Research report 2007:02, 2007, 16 pp
- [20] ANDERS EKBERG & ELENA KABO: **PRESOL – pre-processor för solkurve-analys** (PRESOL – a pre-processor for sun-kink analysis, in Swedish), Chalmers Applied Mechanics, Gothenburg, Sweden, Research report 2007:03, 2007, 11 pp