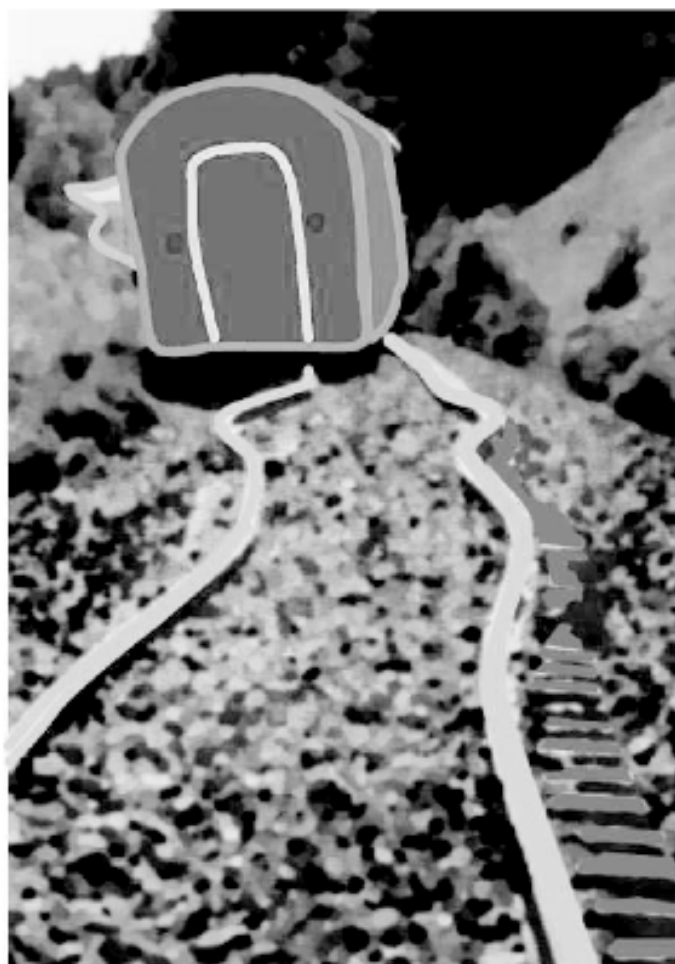


CHALMERS



Spårstabilitet en introduktion för bantekniker



Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson

Department of Applied Mechanics
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, SWEDEN 2004

Research report 2004:3
ISSN 1651-0208

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 2 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

Inledning

Denna rapport är en kortfattad svensk sammanfattning av innehållet i Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson, **Railway track stability – a state-of-the-art survey**, *Chalmers Applied Mechanics*, Report 2004:2, 94 pp, 2004. Hänvisningar i denna sammanfattning syftar till denna rapport. Ursprunget till använda bilder anges i den fullständiga rapporten. I den finns även samtliga referenser.

Till skillnad från den populärvetenskapliga sammanfattningen i den fullständiga rapporten, så riktar sig denna sammanfattning till personer med en viss teknisk bakgrund, typiskt en bantekniker.

Rapporten fokuserar på solkurvor. Syftet med rapporten är att ge en översikt av litteratur inom området, att beskriva metoder för att prediktera när solkurvor uppkommer, beskriva vilka parametrar som är viktiga för uppkomsten av solkurvor, samt att identifiera områden där det krävs mer forskning. Rapporten inleds dock med en introduktion till spårstabilitet.

Kontaktinformation

Elena Kabo
Chalmers
Teknisk Mekanik/CHARMEC
412 96 Göteborg
tel +46 31 772 3825
fax +46 31 772 3827

Caran
Valdemar Noréns Gata 3
SE 417 55 Göteborg
tel +46 31 761 11 86
fax +46 31 335 9602

Anders Ekberg
Chalmers
Teknisk Mekanik/CHARMEC
412 96 Göteborg
tel +46 31 772 3480
fax +46 31 772 3827

Lars Jacobsson
SP Sveriges Provnings och Forskningsinstitut
Box 857
501 15 Borås
tel +46 33 16 56 19

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 3 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

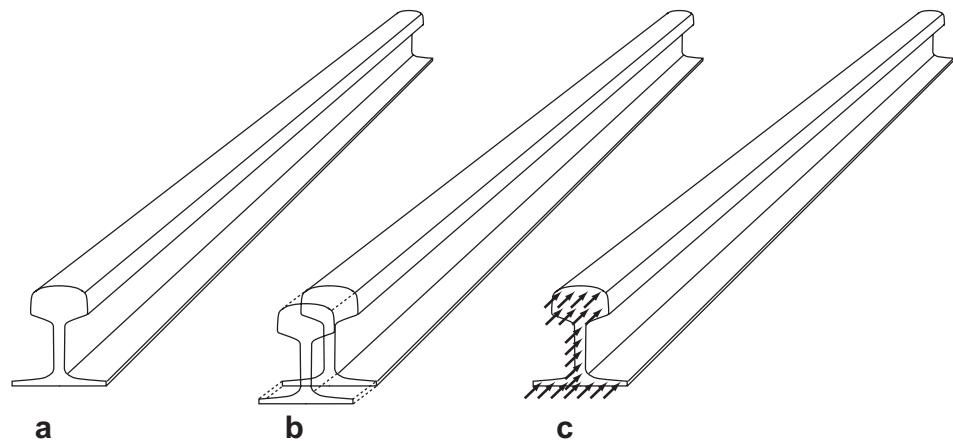
1 Introduktion

1.1 En introduktion till spårstabilitet

I kapitel 2.1 sammanfattas statistik om solkurvor. Där beskrivs även mekanismerna bakom solkurvor. Sammanfattningsvis kan dessa mekanismer beskrivas enligt följande:

- Upphettning av rälsen leder till termisk utvidgning, se Figur 1b.
- Om utvidgningen förhindras byggs det upp ett längsgående tryck, se Figur 1c.
- Om sidostabiliteten inte är tillräcklig kommer rälen att knäcka ut och en solkurva uppstå.
- Stora sidodeformationer uppkommer när rälsen i en zon 100–300 meter runt solkurvan matas in i deformationszonen.

Solkurvor innebär hastiga och stora deformationer av spåret och kan orsaka urspårningar.



Figur 1 När en räl (a) utsätts för en temperaturhöjning vill den expandera (b). Om utvidgningen förhindras (som i en helsvetsad räl) kommer kompression att uppstå i rälen (c).

Viktiga spårparametrar som inverkar på uppkomsten av solkurvor är:

- ballastmotstånd i lateralled, longitudinell led och vertikal led
- rälsgeometri, inklusive initiella imperfektioner
- spårgeometri, inklusive initiella imperfektioner

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 4 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

- räl- och sliperstyvhet
- befästningsstyvhet

1.2 Spårkrafter

En upphettning av rälsen kommer, om utvidgningen är förhindrad, att ge en kompressiv, längsgående spänning i rälsen. I Exempel 1 i rapporten visas hur varje grads upphettning ger en spänning på 2.4 MPa, vilket motsvarar en kraft på 18.6 kN för en UIC60-räls. I kapitel 2.2.1 beskrivs detta noggrannare och begreppet neutraltemperatur förklaras. I Exempel 2 beskrivs hur mycket höga dragspänningar uppstår i helsvetsad räls under vintern och hur dessa kan orsaka rälsbrott. En korrekt neutraltemperatur är en avvägning mellan risken för solkurvor och risken för rälsbrott.

Bromsning, acceleration och kurvtagning är andra faktorer som ger upphov till längsgående krafter i spåret. Vad gäller sidokrafter, så kan dessa orsakas av fordon, främst vid kurvtagning. Ett kriterium för att definiera godtagbara sidokrafter är Prud'homme's kriterium från 60-talet, där den tillåtna laterala kraften, L_p , ges av

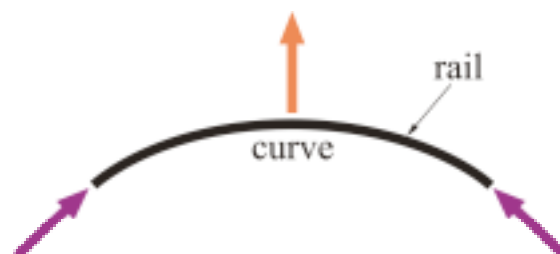
$$L_p = 10 + V/3 \quad (1)$$

V är här den vertikala lasten i kN. För att hantera kurvor och termiska effekter, kan kriteriet reduceras till

$$L_{p,red} = 0.85 \cdot (10 + V/3) \quad (2)$$

Numeriska simuleringar indikerar att detta kriterium är konservativt.

I kurvor kommer normalkrafterna att tendera att skjuta ut rälsen. Denna effekt visas i Figur 2.



Figur 2 Principiell inverkan av en kurva på spårstabiliteten.

Mer information om spårkrafter finns i kapitel 2.2.

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 5 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

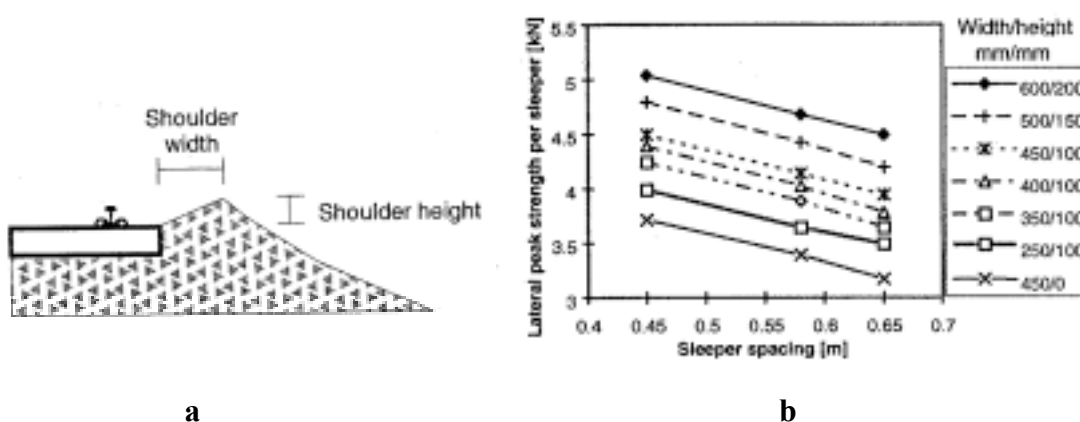
1.3 Spårets sidomotstånd

Spårets sidomotstånd är en av de viktigaste faktorerna vad gäller spårstabilitet. Detta påverkas av ett antal faktorer såsom:

- vertikal last (troligen via ett linjärt förhållande)
- ballast- och sliper-material
- ballast- och sliper-geometri

Sidomotståndet kan mätas i fält. Ett antal sådana studier finns redovisade i litteraturen. Det finns olika modeller för att numeriskt beskriva spårets sidomotstånd. Detaljer om detta beskrivs i kapitel 2.3.1.

En faktor som kan påverka spårets sidomotstånd är ballastskuldrans geometri. En redovisning av denna effekt ges i Figur 3. Här ser man hur en bredare och högre skuldra ökar sidomotståndet. Man skall dock minnas att resultaten i Figur 3 representerar sliperens deformation under en viss last. Om solkurvor orsakar en annan belastning kan man inte direkt dra slutsatser av sidomotståndet från Figur 3.

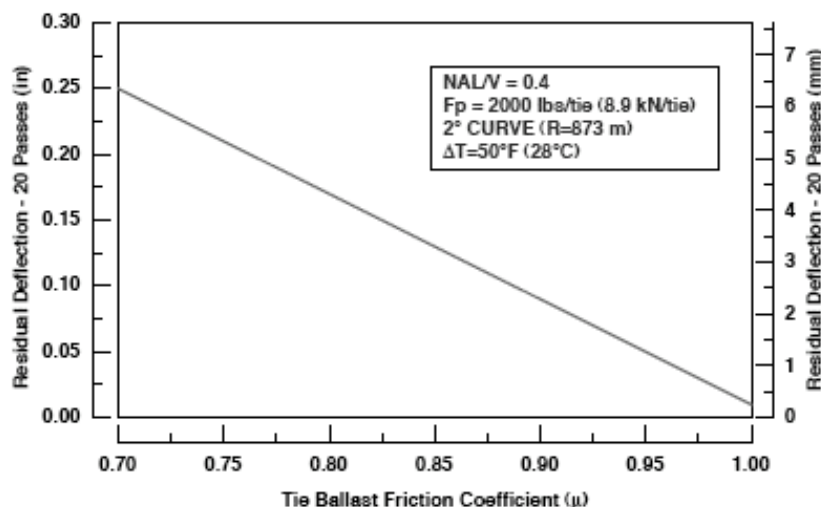


Figur 3 **a)** Ballastskuldrans geometri
b) Lateralt motstånd som funktion av sliperavstånd för olika ballastgeometrier.

Ett motstånd mot sidoförskjutning kommer även från friktionen mellan sliper och ballast. Enligt experiment svarar sliperens underkant, sidokanter och kortsidor för en tredjedel var av detta motstånd när slipern är obelastad. Man uppskattar att sliper och ballast tillsammans står för 60% - 70% av spårets totala sidomotstånd.

Inverkan av friktionen mellan sliper och ballast har studerats numeriskt, se Figur 4.

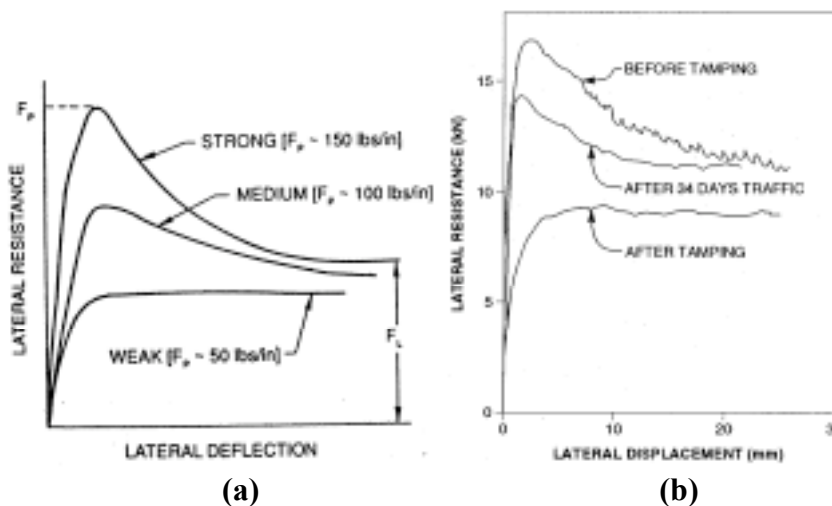
Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 6 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



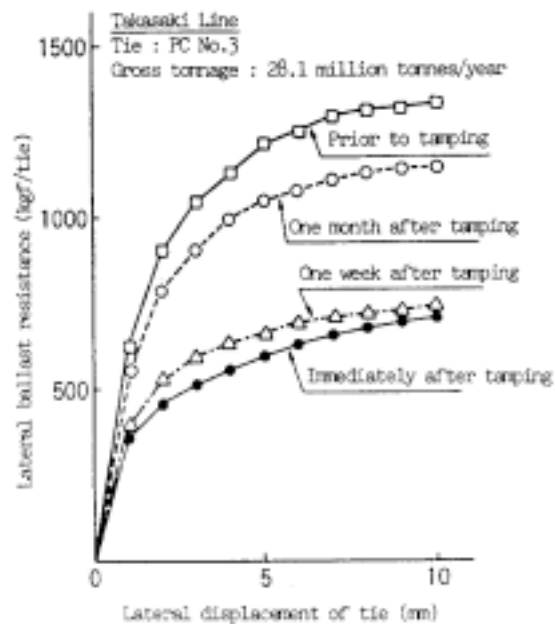
Figur 4 Predikterad inverkan av ballast–sliper-friktion på kvarvarande deformation efter sidobelastning

Spårarbeten och underhåll kommer att påverka spårets sidostabilitet. Detta kan bero på att spårbaxning förändrar spårgeometrin, men även på att ballasten tas bort och/eller störs. Resultat från mätningar av denna effekt redovisas i Figur 5.

När spåret belastas med trafik efter spårarbete kommer det att återhämta sig, vilket redovisas i Figur 6.

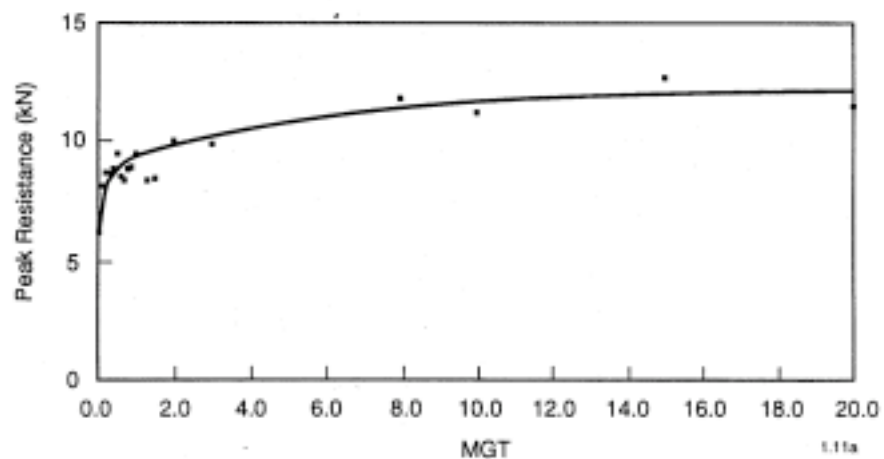


Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 7 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



(c)

Figur 5 Sidomotstånd hos ballast:
a) karakteristiskt resultat från dragtest med enstaka sliper,
b) uppmätta resultat efter spårarbeten i USA,
c) uppmätta resultat efter spårarbeten i Japan.



Figur 6 Ballastens sidomotstånd som funktion av trafiklast.

När det gäller rälen kan ett större yttröghetsmoment att ge ett högre sidomotstånd. Ytterligare en viktig faktor är befästningen mellan räls och sliper. Befästningarna är även viktiga för att förhindra rälsvandring, vilken lokalt kan orsaka mycket höga kompressiva krafter.

Mer information om spårets knäckningsmotstånd finns i kapitel 2.3.

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 8 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

1.4 Knäckningsteori

En rak stång belastad med en normalkraft knäcker, enligt Euler, vid den kritiska lasten

$$P_{cr} = k \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

Här är P_{cr} den kritiska lasten, k en geometriparameter, L stångens längd och I yttröghetsmomentet. Några viktiga aspekter är:

- Stången knäcker normalt i den riktning för vilken I är lägst. För en räls är detta i sidled. Notera dock att även att inverkan av sliper och ballast kommer att påverka i vilken riktningen ett spår knäcker när en solkurva bildas.
- Den kritiska lasten är omvänt proportionell mot stångens längd i kvadrat. För ett spår innebär detta att den knäckta sektionens längd är kritisk, vilket visas i Exempel 3 i rapporten.

För en balk som vilar på en så kallad elastisk bädd (vilket man kan anta att ballasten är), se Figur 7a blir knäckningsanalysen mer komplicerad. Den kritiska lasten kan uttryckas som:

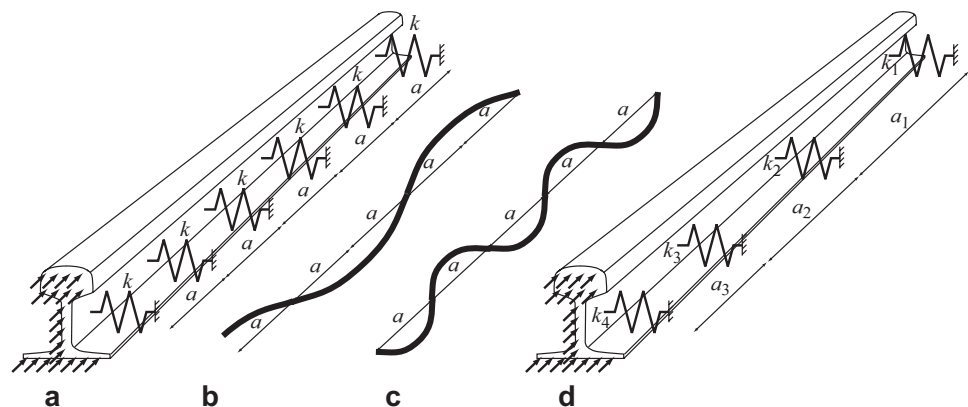
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \left(m^2 + \frac{\beta \cdot l^4}{m^2 \pi^4 EI} \right) \quad (4)$$

där l är balklängden, m är ett heltal och den elastiska bäddmodulen $\beta = k/a$ där k är stödets fjäderkonstant (lika för alla stöd) och a avståndet mellan stöden (lika för alla stöd).

Knäckmoden kommer att bero av bäddmodulen, se Figur 7b-c.

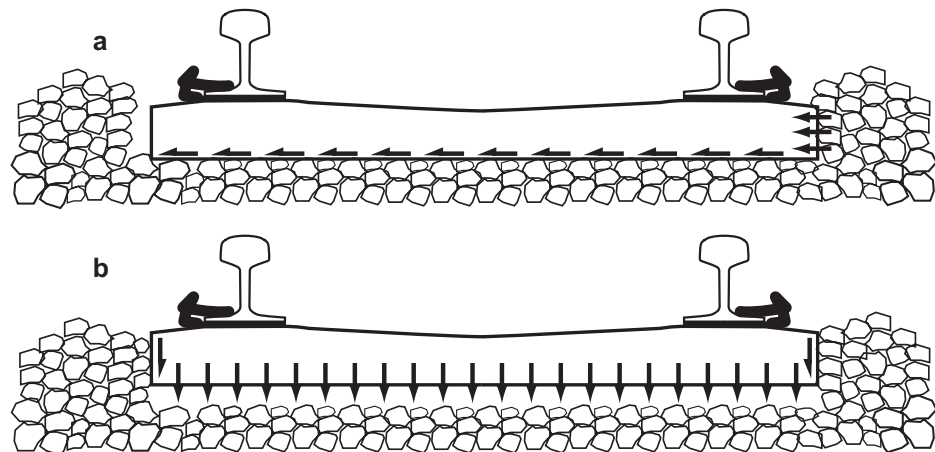
Knäckanalys baserad på bäddmoduler är väldigt restriktiva eftersom all information om upplagsförhållanden måste bakas in i bäddmodulen. Istället kan man göra en mer sofistikerad modellering där rälsen modelleras som en balk understödd av godtyckligt placerade stöd med godtycklig styvhet. En ytterligare förfinad spårmodell har implementerats inom ramen för förstudien.

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 9 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



Figur 7 a) Räl upplagd på en elastisk bädd,
b) exempel på knäckmod för relativt låg bäddmodul,
c) knäckmod vid hög bäddmodul motsvarande rälsens högsta kritiska temperatur
d) räls understödd av godtyckligt placerade stöd med godtycklig styvhet.

När det gäller solkurvor är en intressant fråga vilka knäckmoder som uppkommer. I Figur 8a visas en rent lateral knäckning. Notera att en ren sidodeformation kräver förflyttning av stora ballastmassor.

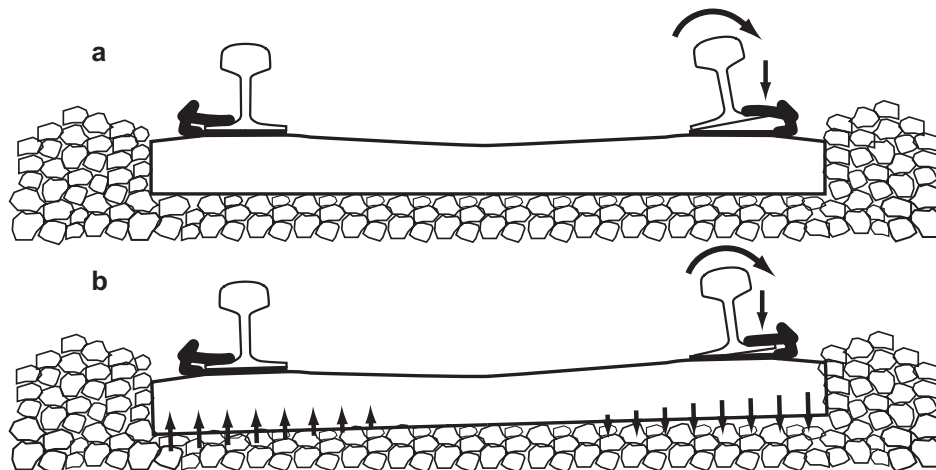


Figur 8 Möjlig lateral och vertikal knäckning av ett spår. Pilar indikerar reaktions- och tröghetskrafter
a) ren lateral knäckning,
b) ren vertikal knäckning.

I Figur 8b visas en rent vertikal knäckning. Här lyfts spåret upp och sliperns vikt tillsammans med friktion mellan sliper och ballast kommer att motverka knäckningen. I Figur 9 visas en vridknäckning av spåret. Här kommer befästningarna att motverka rotationen. Är styvheten mycket liten kan knäckningen enbart inkludera rälsen, see Figur 9a. För

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 10 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

styvare befästningar kommer ballaststyvheten och friktionen mellan ballast och sliper att ytterligare förhindra rotation, se Figur 9b.



Figur 9 Möjlig rotationsknäckning av spår, vilken inkluderar:

- a) enbart rälen,
- b) räl och sliper.

Pilar indikerar reaktionskrafter.

I praktiken kommer en solkurva att uppstå som en kombination av dessa knäckmoder. Den exakta moden bestäms av kombinationen av ballast, sliper, räls, befästningsegenskaper och belastning. Detta beskrivs mer ingående i kapitel 2.5.

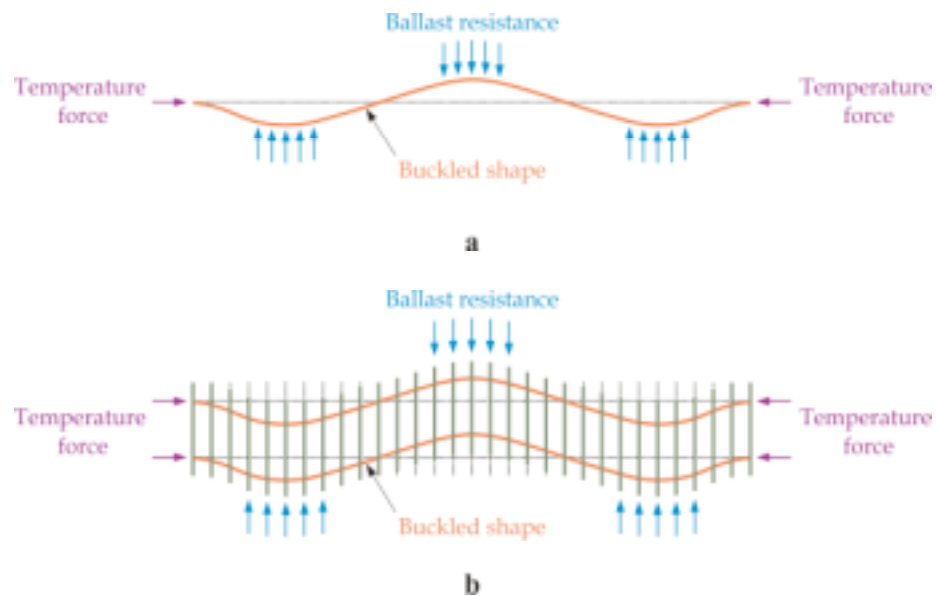
2 Numerisk prediktering av solkurvor

Beroende på hur spåret modelleras kan man skilja på balk- och rammodeller, se Figur 10.

När det gäller balkmodeller är Eulerteori utgångspunkten. Några principiella begränsningar med dessa modeller är:

- ballasten anses jämt fördelad längs balken
- imperfektioner som saknade sliprar och störd ballast kan ej inkluderas

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 11 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

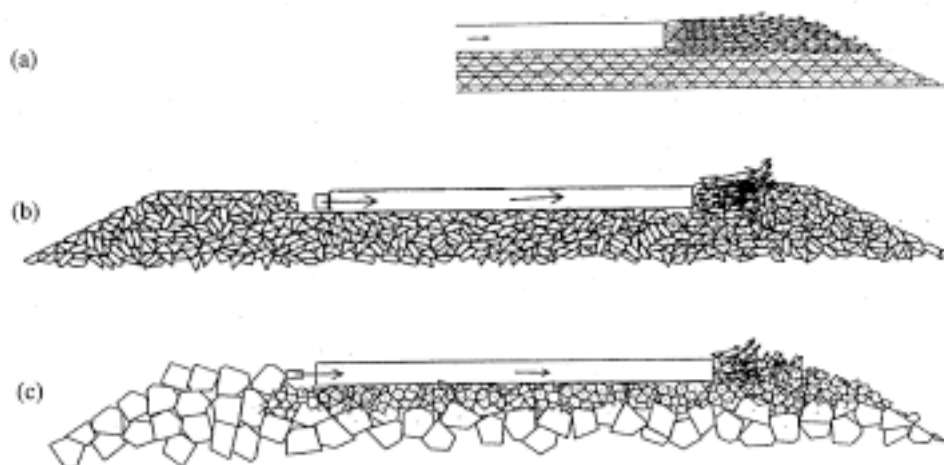


Figur 10 Idealiserade modeller för knäckningsanalys:
a) balkmodell,
b) ram-modell av räls och sliper.

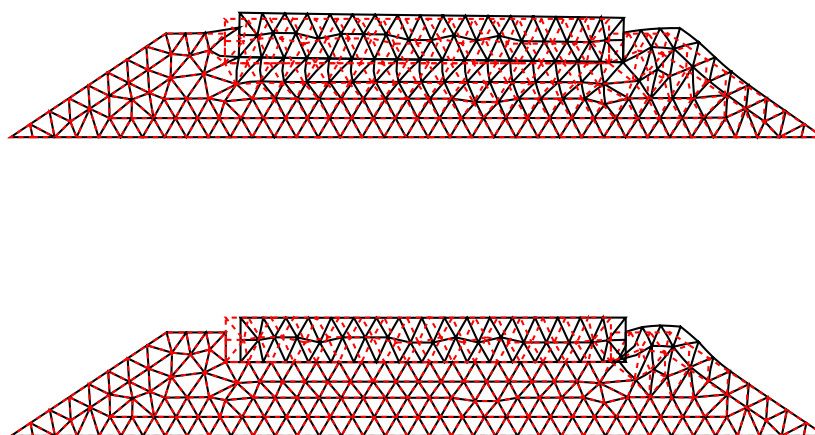
De flesta modeller behandlar s.k. statisk knäckning. I s.k. dynamisk knäckningsanalys tas inverkan av fordon med som en kvasi-statisk last för att inkludera uppbjörning av spåret mellan hjulen (teorin har alltså ingenting med dynamisk analys att göra trots namnet). Balkmodeller beskrivs ingående i kapitel 3.1.

När det gäller ram-modeller för solkurveanalys finns sådana implementerade i ett antal programpaket. Dessa beskrivs i kapitel 3.2. Speciellt har en 3D-modell av ett järnvägsspår där sliprar och räls är modellerade som balkar och ballast och befästningar som fjädrar implementerats i ABAQUS inom ramen för förstudien. I kapitel 4 behandlas ett antal överväganden man måste göra när man implementerar en numerisk modell för analys av uppkomsten av solkurvor. En nyckelfråga är hur man skall modellera ballastmotståndet. Genom en fjäderrepresentation kan man göra små och snabba modeller, men man tappar mycket av detaljerna i beskrivningen. Ett annat alternativ är en detaljmodellering av ballasten, se Figur 11, men en sådan modell är mycket beräkningskrävande. Ett mellanting är att modellera ballasten som ett kontinuerligt medium, se Figur 12. Dessa modeller är mer utförligt beskrivna i Kapitel 4.3.2.

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 12 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



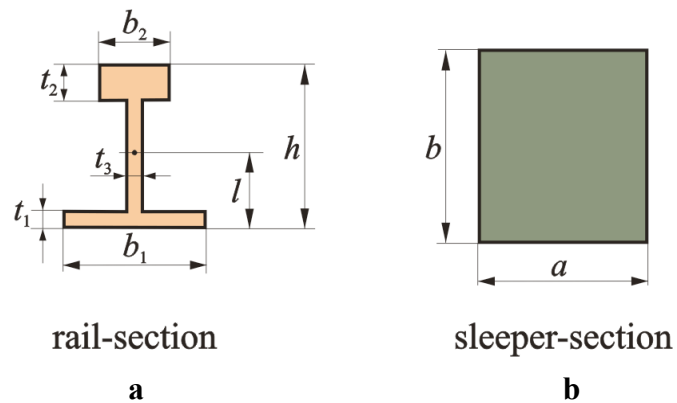
Figur 11 Simulering av sliperförskjutning med ballast modellerad som diskreta stenar då dessa
a) är likformiga,
b) är stokastiskt fördelade,
c) har varierande storlek och form.



Figur 12 Simulering av ballastdeformation med kontinuumsmodell.
Ett antal simuleringar har genomförts med den balk-fjädermodell som tagits fram i förstudien. Den principiella geometrin för räls- och slipersprofilerna beskrivs i Figur 13 och hela modellen beskrivs i Figur 14.

Beräkningar har gjorts både med en 130 meters spårsektion (10 078 frihetsgrader) och en liten 5.8 meters spårmodell (528 frihetsgrader). I bägge fallen gick beräkningarna mycket snabbt.

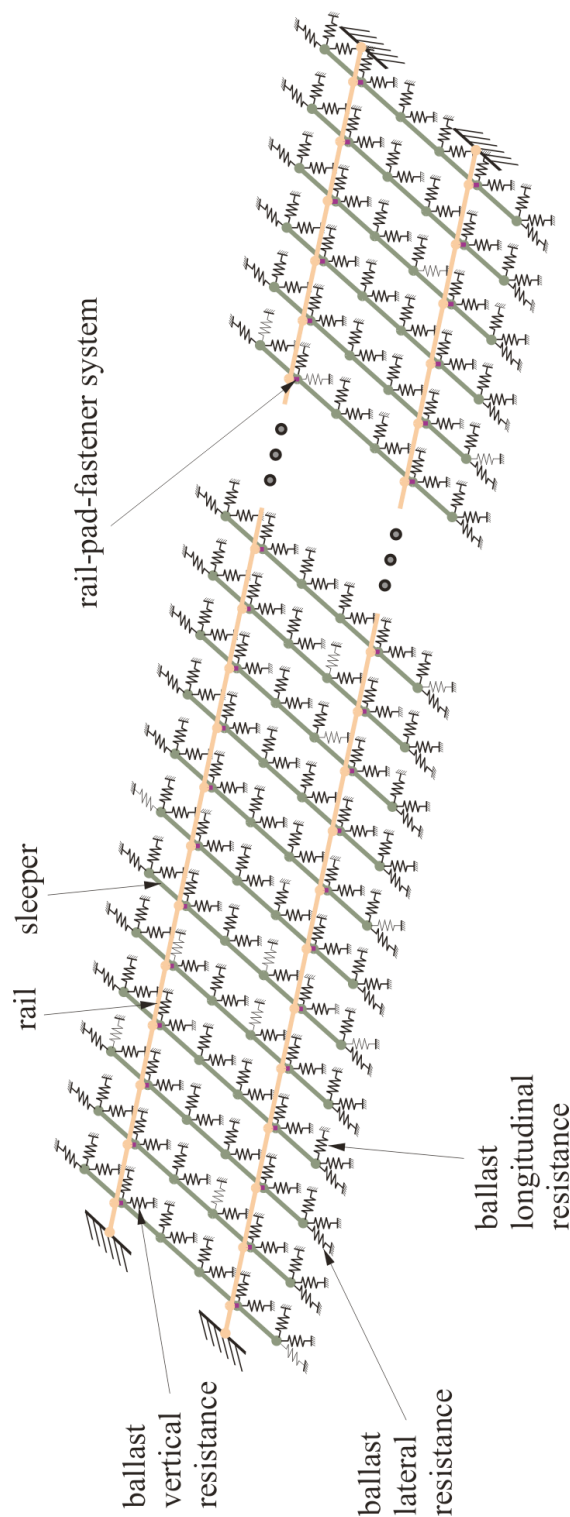
Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 13 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



Figur 13 Använt I-tvärsnitt hos rälen (**a**) och rektangulärt tvärsnitt hos slipern (**b**)

Detaljer om simuleringarna ges i Kapitel 5. Exempel på resultat ges i Tabell 1. Notera de höga kritiska temperaturerna. Dessa beror på ideella förhållanden (ingen lokal sänkning i ballastmotstånd, inga initiella imperfektioner, m.m.).

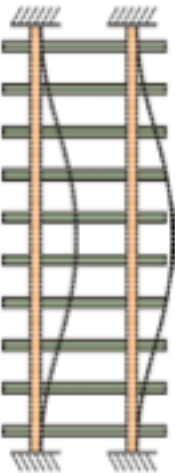
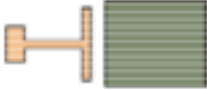
Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 14 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



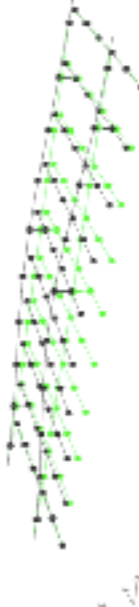
Figur 14 Tredimensionell FE-modell av spår uppbyggt av balk och fjäderelement.

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 15 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

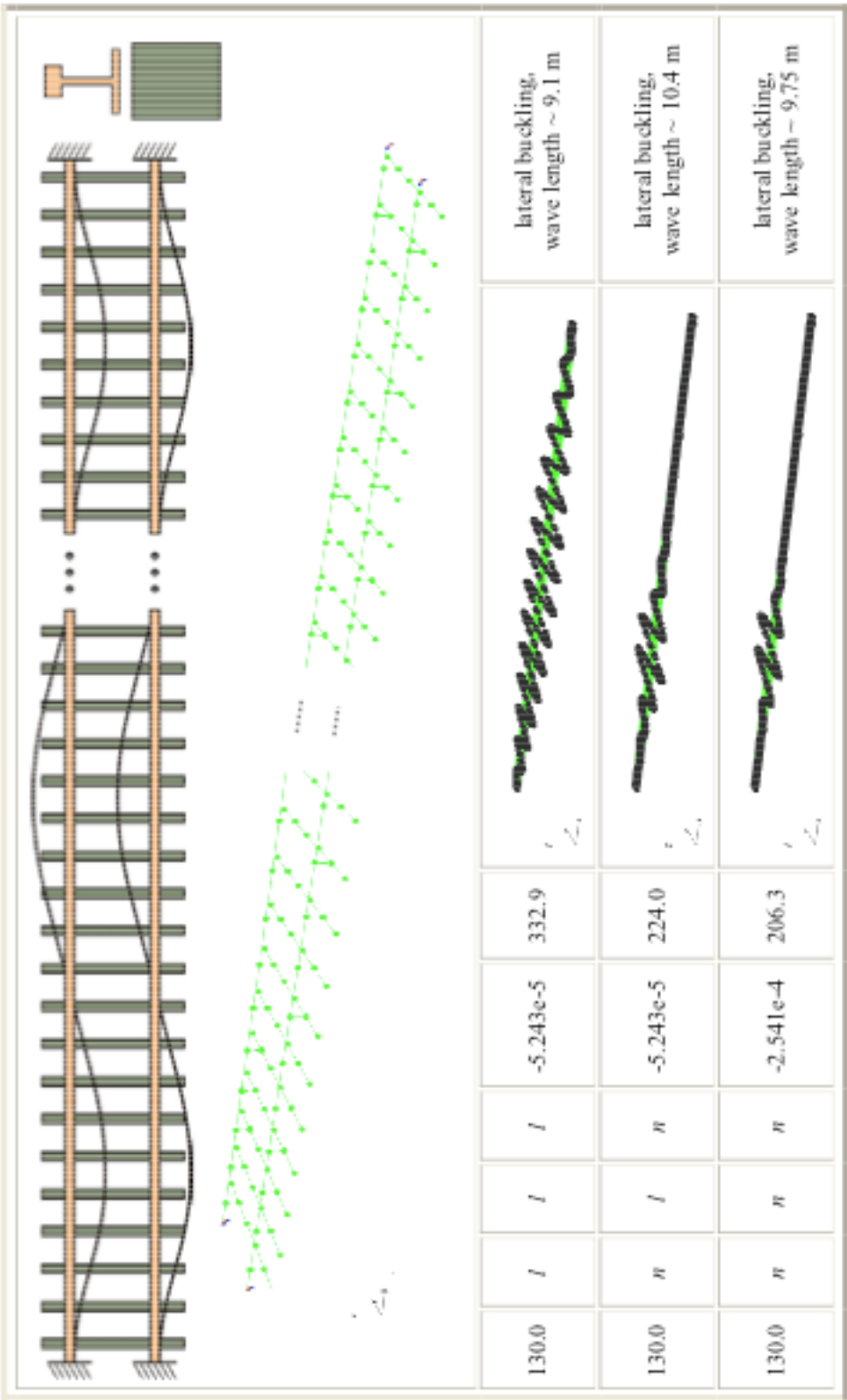
Tabell 1 Knäckningstemperatur och relaterad modform.

Track length, m			Ballast resistance			Vertical deflection w, m	Critical temperature, °C	Mode I	Comments
			lateral	longitudinal	vertical				
5.85			-	-	-	-2.113e-3	-		only gravitation load is applied
			-	-	-	-	66.5		only temperature load is applied
			-	-	-	-	66.5		both gravitation and temperature loads are applied
5.85			l	l	l	-5.239e-5	551.2		lateral buckling
			l	l	l	-	-		
			l	l	l	-	-		

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 16 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

lateral buckling	lateral buckling	no springs	springs in vertical (Z) direction	springs in lateral (Y) direction	springs in longitudinal (X) direction
					
305.2	305.7	67.5	305.1	67.5	67.5
-5.239e-5	-2.534e-4	-3.794e-3	-5.239e-5	-3.794e-3	-3.794e-3
<i>n</i>	<i>n</i>	-	<i>l</i>	-	-
<i>l</i>	<i>n</i>	-	-	<i>l</i>	-
<i>n</i>	<i>n</i>	-	-	-	<i>l</i>
5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 17 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7



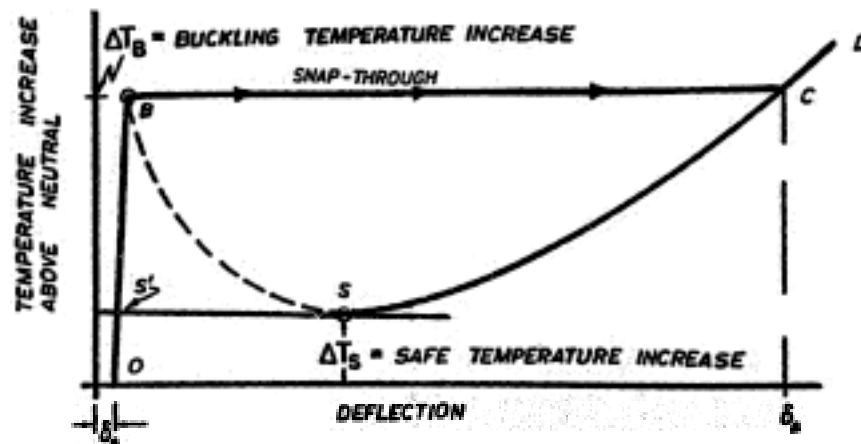
l — linear ballast resistance
 n — non-linear ballast resistance
 Vertical deflection w is presented for the deformed rail as a reaction on temperature and/or gravitation loading. l before the buckling analysis

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 18 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

3 Säkerhetskriterier

I Figur 15 visas hur spårets utböjning beror av en ökad temperatur. En tillåten temperaturökning (från neutraltemperaturen) kan baseras på:

- den övre kritiska temperaturen ΔT_B
- den undre kritiska temperaturen ΔT_S
- en temperatur baserad på knäckningsenergin



Figur 15 Kritisk temperatur för solkurvor. För ett idealt spår bildas solkurvan vid temperaturhöjningen ΔT_B . Under den säkra temperaturen ΔT_S bildas inte solkurvor ens i spår som innehåller oregelbundenheter.

Säkerhetskriterier behandlas ingående i Kapitel 6.

4 Avslutning

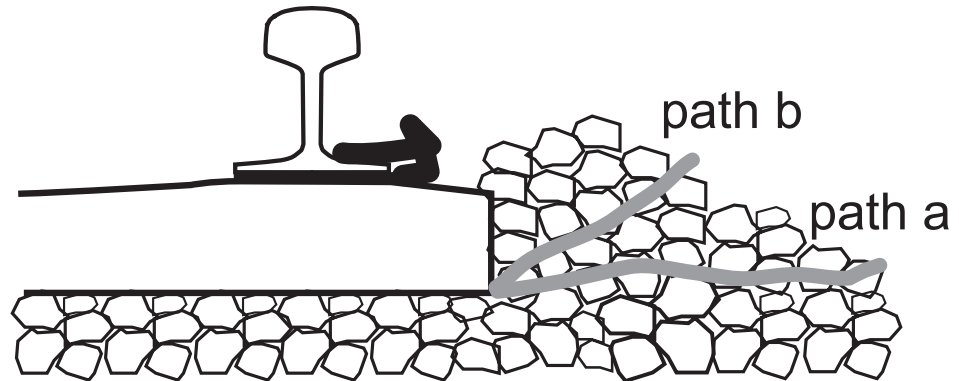
Det finns mycket skrivet om solkurvor. Dock är det så att det finns områden där den nuvarande kunskapen är långt ifrån tillfredställande.

När det gäller litteratur inom området är den ofta dålig på att klart och tydligt tala om vilka förutsättningar som gäller för ett visst resultat, hur tester gått till, hur de numeriska modellerna är uppbyggda, m.m.

När det gäller de avancerade numeriska modellerna, så är de som finns baserade på balk-fjädermodeller. Detta är inte tillräckligt sofistikerat om man skall studera inverkan av faktorer som t.ex. utformningen av ballastskuldran. Som exempel kan nämnas att ballastbrott kan ske både längs linje a och linje b i Figur 16. Vilken brottyta det blir i praktiken

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 19 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

beror på aktuell belastning, m.m. Dock skall bägge dessa brottytor täckas in av en och samma fjäderstyvhet.



Figur 16 Två möjliga brottlinjer genom en ballastskuldra.

Ytterligare diskussioner om statusen hos den nuvarande kunskapen finns i kapitel 7.1.

Baserat på den framtagna rapporten kan man identifiera ett antal sätt att begränsa risken för solkurvor:

- säkerställa rätt neutraltemperaturer
- begränsa sidkrafter
- kontrollera de vertikala krafterna
- säkerställa fungerande befästningar
- säkerställa rätt ballastering
- förändra slipergeometrin
- förändra rälsmaterial och profiler

Dessa åtgärder diskuteras i Kapitel 7.2.

I rapporten diskuteras även ett antal områden där mer forskning behövs. Några av dessa är:

- representera ballasten med en kontinuummodell
- en bättre modell av verkande tåglaster
- utreda inverkan av ökad friktion mellan sliper och ballast

Chalmers Applied Mechanics	<i>Title</i> Spårstabilitet - en introduktion för bantekniker	<i>Page</i> 20 (20)	<i>Name of document</i> TrackStability_SE.doc
<i>Date</i> 2004-05-09	<i>Author(s)</i> Elena Kabo, Anders Ekberg & Lars Jacobsson	<i>Revision</i> 1.0	<i>Reference / Project</i> CHARMEC - SP7

- utreda ballastkonsolidering under svenska förhållanden
- strukturera vilken fältdata som skall samlas in vid solkurvor

Om projektet och rapporten

Detta projekt har bedrivits inom CHARMEC (SP7) som ett samarbetsprojekt mellan SP och Chalmers. Författarna vill tacka kollegorna på Banverket – Banteknik i Borlänge för allt stöd, Per Svensson på Banverket – Västra Regionen för hans bidrag, biblioteken hos Banverket och Chalmers för hjälp med att införskaffa litteratur, till Anders Johansson, Chalmers för hans bidrag om fordonskrafter, samt till Ann-Gerd Melin för hjälp med att formulera en begriplig svenska.