

CHALMERS



A-måttet

- En slitageanalys på spårvägsrälsen i Göteborg

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Byggingenjör

PETER BOBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2006
Examensarbete 2006:42

Examensarbete 2006:42

A-måttet

- En slitageanalys på spårvägsrälsen i Göteborg

PETER BOBERG

The wheel back distance
- A wear analysis of the tramway rails in Gothenburg
PETER BOBERG, 1983 (FÖR CPL)

© PETER BOBERG

Diploma thesis 2006:42
Department of Civil and Environmental Engineering
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
{Ett spårvagnshjul ståendes på en räl}

Tryckeri: Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sweden 2006

Sammandrag

Trafikkontoret Göteborg har under lång tid funderat över valet av spårvagnarnas så kallade A-mått, och dess inverkan på rälsslitage. A-måttet är avståndet mellan insidorna på hjulen.

Examensarbetets syfte är att utreda om det nuvarande A-måttet verkligen är det mest lämpliga. Ett annat syfte har varit att få en klarläggning av nuvarande slitage av räl, samt se vilka konsekvenser en förändring av A-måttet ger.

Arbetet är baserat på fakta från litteratur och intervjuer. Dessutom har en kvasistatisk ritningssimulering gjorts i datorprogrammet AutoCAD 2006. Simuleringen beskriver en spårvagnsboggi som åker rakt in i en kurva uppbyggd av gaturäler. I ett antal försök har kurvradien, spårvidden, A-måttet, och hjulflänsarnas tjocklek ändrats. Simuleringarna visar kontaktförhållanden mellan hjul och räl i form av acceptabel kontakt, respektive oacceptabel kontakt. Acceptabel kontakt är kontakt mellan hjulfläns och ytterrälens farkant, och oacceptabel kontakt är kontakt mellan hjulets fläns och innerrälens fläns.

Ritningssimuleringen visade att det inte finns några fördelar med att ändra A-måttet. Ett minskat A-mått resulterade i större sannolikhet att få oacceptabla kontakter, medan en ökning kan medföra problem på rakspår eftersom den effektiva koniciteten då blir större (minskat spårspel).

Däremot skulle en noggrannare kontroll av hjulens kondition med hjälp av lasermätningstrustning och höghastighetskameror kunna resultera i reducerat rälsslitage. Dessutom skulle en minskning av slitagetoleransen på hjulflänsarna, och en ökad konicitet på hjulen kunna ge fördelar.

Abstract

Wear on railway rails has been methodically investigated through the years. Rail wear may cause derailment and decreased passenger comfort. It is also cost full, and much finance has been spent on finding measures to reduce the wear.

The Traffic Department of the City of Göteborg wants to reduce its rail wear on the city's tramway. The department is therefore looking for possible solutions. This thesis is an investigation about the wheel back distance* on tram cars, and its influence on rail wear.

In the early stages of the investigation, literature studies and interviews were carried out. These were followed up by a "drawing simulation", using the software program AutoCAD 2006.

The (quasi-static) drawing simulation featured a tram bogie entering a curve built up by grooved rails. The bogie's wheel back distance, flange thickness and the track gauge were varied in a number of subsequent simulations. The curve radius was also varied in the tests. In every simulation, the contact between wheel/rail and the angle of attack is evaluated. Contact on the rail head on the outer rail is here considered to be "acceptable" contact. Contact on the inner rails check side is considered to be "unacceptable" contact.

The results showed that an adjusted wheel back distance with the now existing wheel profile has no advantages compared to today's settings. A decreased wheel back distance resulted in higher probability of unacceptable contact, and an increase would lead to problems with the running behaviour on straight track.

An appropriate measure for reducing the rail wear could be to improve the wheel condition monitoring, e.g., using laser measuring equipment and high velocity cameras. A change towards a tighter wear tolerance on the flange thickness, and an increased conicity may lead to positive effects.

* Wheel back distance = the distance between the backs of the wheels

Keywords: wheel back distance, rail wear, and drawing simulation

Förord

Mitt intresse för spårvagnar och spårväg väcktes till liv sommaren 2005, då jag praktiserade på Göteborgs Spårvägar. Tidigare hade jag aldrig funderat på hur spårvagnar fungerar. Mycket kan bero på att jag är uppvuxen i Kungsbacka, där det främsta transportmedlet är bilen. Av en ren slump lyckades jag få ett examensarbete som handlade om spårvägsteknik på Trafikkontoret Göteborg. Redan under mötet med min uppdragsgivare Mats Larsson insåg jag att spårfordon var något mycket avancerat. När jag påbörjade arbetet, visade det sig att det inte bara var avancerat. Mitt lilla arbetsområde var ju en hel vetenskap!

Jag skulle vilja tacka Dipl. Ing. Heribert Lehna från Tyskland, för den goda handledningen jag har fått på distans. De goda tips och synpunkter jag har fått från docent Anders Ekberg och växelkonstruktör Anders Ahlquist har också varit till stor hjälp.

Speciellt tack skulle jag vilja ge till spårprojektörerna Stig Hammarson och Per-Anders Martinsson, som alltid har ställt upp med hjälp och intressanta diskussioner.

Ett stort tack även till Er som inte står med men ändå hjälpt till under arbetets gång!

Göteborg 2006-06-05

Peter Boberg, byggingenjörsstudent

Innehållsförteckning

Sammandrag	I
Abstract	II
Förord	III
1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsning	1
1.4 Metod	1
2. Förutsättningar	2
2.1 Spårvagnar.....	2
2.1.1 Spårvagnsmodeller	2
2.1.2 Hjulringen.....	4
2.1.3 Löpverkets delar	5
2.1.4 A-mått.....	7
2.2 Räls.....	7
2.2.2 Rälsp profiler	7
2.2.3 Spårgeometri.....	9
2.3 Slitagebild	12
2.3.1 Hjulslitage.....	12
2.3.2 Rälsslitage.....	14
2.3.3 Slitageåtgärder	17
3. Hjulets samverkan med rälen	18
3.1 Teoretiska grunder.....	18
3.1.1 Det fria hjulparets styrning	18
3.1.2 Boggins kurvgång - Flänsstyrning	22
3.1.3 Konicitet och effektiv konicitet	23
3.1.4 Hjulparets sinusgång.....	25
3.1.5 Individuella hjuls egenskaper	27
3.2. Slitage.....	27
3.2.1 Kontaktpunktsgeometri	27
3.2.2 Kryp och spinn	28
3.2.3 Adhesivt slitage	31
3.2.4 Abrasivt slitage.....	32
3.2.5 Smörjningens inverkan.....	34
3.2.6 Sprickbildning – En utmattningsfaktor.....	34
4. Ritningssimulering	36
4.1 Ingångsvärden	36
4.1.1 Fältundersökning av spårvagnens kurvgång.....	37
4.1.2 Individuella hjul.....	37
4.2 Genomförande.....	37
4.2.1 Resultat	38
5. Diskussion	40
6. Slutsatser	42
Källor	43

Bilaga 1 Figurförklaring för ritningssimuleringen

Bilaga 2 Resultat av ritningssimuleringen

Bilaga 3 Konicitetsbegränsning

Bilaga 4 Fältundersökning av spårvagnens kurvgång

1. Inledning

Göteborg har det största spårvägsnätet i Sverige. Nätet består av cirka 16 mil räls som dygnet runt trafikeras av 12 spårvagnslinjer. Spårvägsnätet utgör huvuddelen av Göteborgs stomsystem i kollektivtrafiken, och är således en viktig komponent i denna.

Under årens lopp slits dock både rälerna och spårvagnens hjul. Eftersom drift och underhåll av hjul och räler är kostnadskrävande, så är det önskbart att ha så litet slitage som möjligt.

1.1 Bakgrund

Trafikkontoret i Göteborg har under lång tid funderat över valet av A-måttet på spårvagnarna. A-måttet är avståndet mellan insidorna på spårvagnens hjul, och en minskning eller en ökning av denna tros påverka slitaget av rälsen.

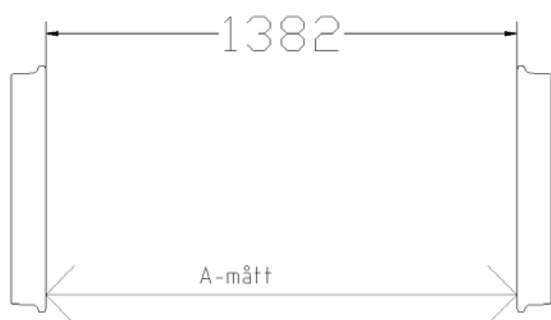


Fig 1-1 A-måttets omfattning

1.2 Syfte

Examensarbetets syfte är att utreda om det nuvarande A-måttet verkligen är det mest lämpliga. Ett annat syfte är att få en klarläggning av nuvarande slitage av räl, samt konsekvenserna av en förändring av A-måttet.

1.3 Avgränsning

Arbetet behandlar endast utredningen av A-måttet i Göteborg, och dess inverkan på rässlitage. Utredningen behandlar endast en undersökning av spårvagnarna M28/29 och M31, och deras inverkan på slitage i kurvor uppbyggda av gaturäler.

1.4 Metod

Arbetet bygger på muntliga och litterära källor. En ritningssimulering i datorprogrammet AutoCAD 2006 har gjorts, för att kunna åskådliggöra möjligt slitage.

2. Förutsättningar

I det här kapitlet redovisas både förutsättningarna för spårvagnarna och spårvägen i Göteborg. Här kan läsas bland annat om vilka delar som ingår i spårvagnarnas löpverk, och vilka typer av räler som används. Även förekommande slitagebild på både spårvagnshjul och räler är medskrivet.

2.1 Spårvagnar

Göteborg har haft spårvagnstrafik ända sedan år 1879. Staden har därför trafikerats av ett antal olika spårvagnsmodeller. Den första spårvagnen drogs av hästar. Numera drivs spårvagnarna av elmotorer, som får sin energi genom kontaktledningar i luften. Göteborgs stomlinjer i kollektivtrafiken är till största delen baserad på just spårvagnar. De spelar därför en stor roll i stadens transportsystem.

2.1.1 Spårvagnsmodeller

Göteborgs spårvägsnät trafikeras av fyra olika spårvagnsmodeller. Dessa är M28, M29, M31, och M32. Det finns även så kallade veteranspårvagnar som körs av sällskapet ”Ringlinien”. Dessa utgör en så liten del av vagnsparken, att de inte kommer att presenteras något noggrannare i denna rapport.



Fig 2-1 Veteranspårvagn M1 (www.ringlinien.org)

M28

Dessa vagnar införskaffades mellan 1965 och 1967. Själva vagnskorgen byggdes av ASJL, medan den elektriska utrustningen tillverkades av ASEA. Det levererades 70 stycken av dem till staden, med nummerserien 701-770. Idag är 64 av dem i drift. Spårvagn M28 ska successivt tas ur tjänst och ersättas med spårvagn M32.

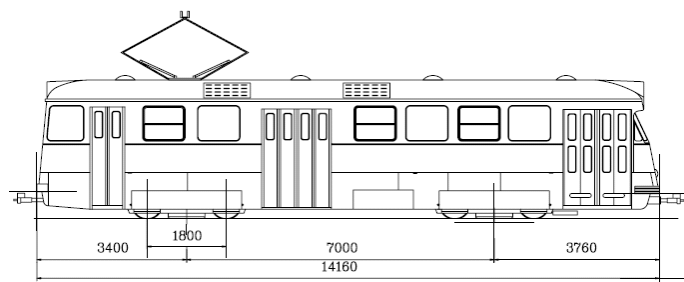


Fig 2-2 Spårvagn M28 (Trafikkontoret Göteborg)

M29

Denna modell är mycket lik spårvagn M28. Tillverkaren är Hägglunds och söner. De levererades mellan 1969 och 1972. Hela 60 stycken införskaffades, och 58 stycken är nu i tjänst. Nummerserien är 801-860.

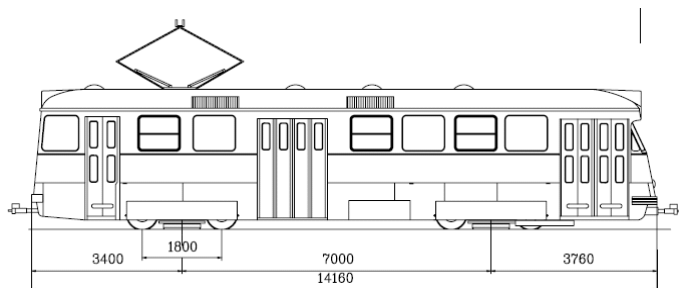


Fig 2-3 Spårvagn M29 (Trafikkontoret Göteborg)

M31

Spårvagn M31 är en ombyggnation av spårvagn M21. M21 tillverkades av ASEA och levererades mellan 1984-1991. Det producerades 81 st av dessa. År 1998 påbörjades ombyggnationen av spårvagn M21. En mellanvagn med lågt golv byggdes till på spårvagnarna, och därmed blev det enklare för bland annat funktionshindrade att åka med. M21 fick efter ombyggnation heta M31. Det finns nu 80 spårvagnar av modell M31. Nummerserien är 300-380.

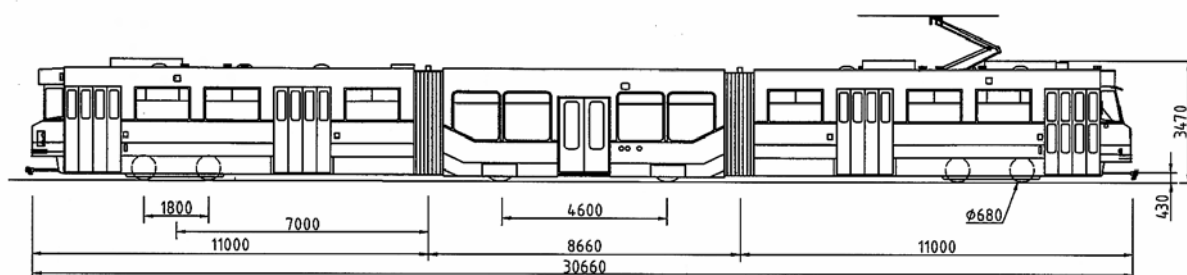


Fig 2-4 Spårvagn M31 (Mittenwalder Gerätebau)

M32

Detta är den nyaste modellen. Den har ännu inte börjat gå i reguljär trafik, men väntas vara det år 2006. Tillverkaren är AnsaldoBreda i Italien. Hela spårvagnen har lågt golv, och är därför väldigt anpassad för alla resenärer. 40 vagnar ska levereras enligt kontrakt (Engberg P, 2006). Nummerserien börjar på 401.

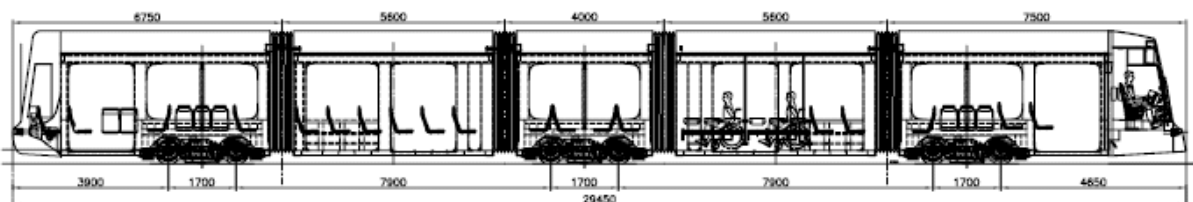


Fig 2-5 Spårvagn M32 (Trafikkontoret Göteborg)

2.1.3 Löpverkets delar

Alla delar som direkt påverkar spårvagnens gång i spåret är delar av löpverket. En liknelse kan göras mellan en bils chassi, och en spårvagns löpverk.

Boggi

En boggi är en konstruktion där två eller fler hjulpar är satta på ett och samma ramverk. På spårvagnarna i Göteborg är det två hjulpar per ramverk. Ramverket är vridbart i förhållande till vagnskorgen för att underlätta styrning i kurvor. Detta är den vanligaste typen av ramverk för spårvagnar och tåg. Boggier gör fordonet mer lasttåligt, och den medger också god åkkomfort. Det är samverkan mellan fjädningen och ramverket i boggin, som gör att den goda komforten och kapaciteten kan uppnås. Fjädningen fångar upp vagnens massa, men för att minska de svängningar som uppstår då spårfordonet är i rörelse, kompletteras fjädningen med dämpare. Ramverket fungerar även som ett filter mot högfrekventa störningar (Andersson, Berg & Stichel 2000, s. 3:8-3:10).

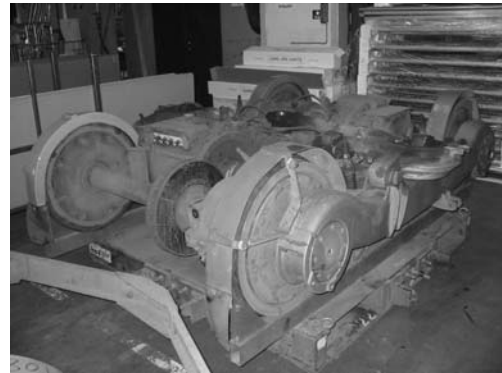
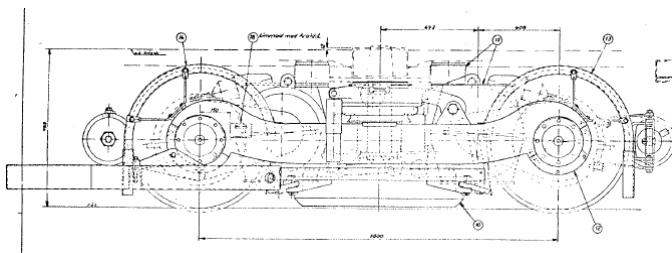


Fig 2-8 Boggin till spårvagn M29

Truck

Ett ramverk där vridpunkt saknas men ändå har likartade funktioner som en boggi, kallas truck. Truckar har tidigare använts under lång tid på spårvagnar i Göteborg². De har dock inte använts på de senaste spårvagnmodellerna, där boggier har använts istället. Däremot har den senast införskaffade spårvagnen M32 truckar.



Fig 2-9 Veteranspårvagn M4 med truck (www.ringlinien.org)

² Tony Martinsson, signalprojektör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Gårdahallen 06-03

Hjulparsstyrning – hjulens inspänning i boggin

Förmågan för hjulen att följa spåret exempelvis i en kurva kallas hjulparsstyrning. Hjulparet kan antingen vara mjukt eller styvt inspänt i boggin. Spårvagnarna M28 och M31 har boggier som är mjukt inspända. Det är gummibussningarna som omger hjulparen som gör så att hjulen kan följa spåret. M29 däremot har styv inspänning på sina boggier³.

Stel axel

Ett hjulpar där det ena hjulet är beroende av det andra hjulet innehar en stel axel. Detta innebär att båda hjulen kommer alltid att ha samma rotationshastighet. Stel axel används på spårvagnsmodellerna: M28, M29, M31. Detta är även den vanligaste hjulparstypen som används på järnvägståg.

Individuella hjul

Varje hjul rullar eller framdrivs för sig själv, och är inte beroende av hjulet som sitter på andra sidan av ramverket. De individuella hjulen gör så att låggolv kan användas på spårvagnar. Detta är väldigt attraktivt, eftersom det underlättar för bland annat funktionshindrade och folk med barnvagnar. En vanlig boggi är en ganska hög konstruktion, och kräver då att även golvet hamnar högt upp ifrån marken. Det krävs då en trappa för att komma in i vagnen. Individuella hjul finns på spårvagnsmodellerna M31 (mellanvagnen) och M32. Det bör dock tilläggas att hjulen som sitter på spårvagn M32s truckar, ändå är sammanlänkade eftersom de är framdrivna av samma motor. De saknar dock en gemensam axel, så de räknas ändå som individuella hjul⁴. Mer om individuella hjul och dess kurvtagningsegenskaper kan läsas i avsnitt 3.1.5.

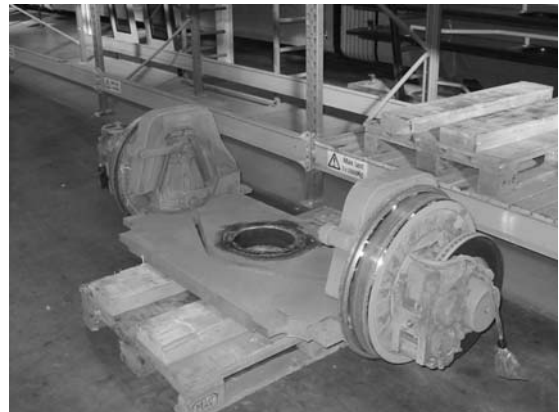
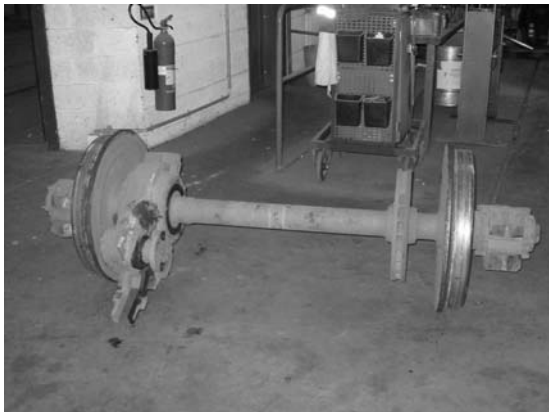


Fig 2-10 En stel axel resp. ett hjulpar med två individuella hjul (tillhörande mellanvagnen på en spårvagn M31)

Radiell styrning

På spårvagn M31 finns det en mellanvagn som är av låggolvskonstruktion. Mellanvagnen som är en tillbyggnation, innehar fyra individuella hjul, fördelade på två ramverk. De här hjulen styrs genom kurvor med hjälp av mekanisk verkan. Hjulen styrs av en så kallad radialstång, som i främre ramverket är kopplad till spårvagnens framvagn, och i bakre ramverket kopplad till spårvagnens bakre vagn.

³ Jan Wikand, maskiningenjör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Rantorget 06-03-07

⁴ Florencio Garcia, maskiningenjör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Rantorget 2005-12-19

2.1.4 A-mått

A-måttet är avståndet mellan insidorna på hjulen. I nuläget är måttet på de spårvagnarna i reguljär linjetrafik satt till 1382 mm, med toleransen +2 mm/-0 mm. Vid justering av A-måttet förlängs eller förkortas hjulparets axel⁴, alternativt kan hjulringarna breddas eller göras smalare⁵. A-måttet har en betydande funktion då spårvagnen bland annat ska köra igenom en spärkorsning⁶.

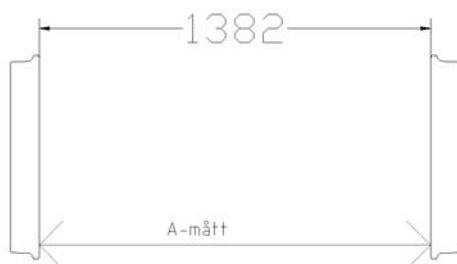


Fig 2-11 A-måttets omfattning

”Ringlinien”, en ideell förening som kör veteranspårvagnar, har däremot varierande A-mått på sina vagnar. Eftersom dessa spårvagnar i stort sett är i ursprungligt skick från den tiden då de var i reguljär trafik, så har inte A-måttet på dessa ändrats. Måtten som används är 1384 mm och 1374 mm, där det förstnämnda är det ursprungliga måttet som användes i Göteborg².

Det är i nuläget ingen som riktigt vet varför A-måttet har ändrats genom tiderna. En hypotes är att A-måttet förminskades till 1374 mm då spårvagnarna delade spår med Säröbanan². Säröbanan hade sina egna växlar och korsningar anpassade för tåg, och där skulle då även spårvagnar passera. Säröbanan var en 24 km lång järnväg som sträckte sig från Göteborg till Särö i norra Halland. Verksamheten upphörde år 1965 (Hammarson M, 2005).

2.2 Räls

Rälsen är det som spårvagnar och tåg färdas på. Den har många olika utseenden i världen, då bland annat olika spårvidder och rälsprofiler används.

Det kan verka väldigt enkelt att lägga ut nytt spår eller justera befintlig räls, men det är faktiskt ett väldigt precisionsarbete som krävs. Det handlar oftast om noggrann millimeterprecision då banarbete görs.

2.2.2 Rälsprofiler

Gaturäl och *vignolräls* är de profiler som används inom Göteborgs spårvägsnät.

Gaturäl

Rälen används där både spårbunden och vanlig trafik samspelar. Den ”grävs ner” i marken, och möjliggör på så sätt interaktion med bland annat bussar. Rälen har en rilla vars uppgift är att hålla undan markbeläggningar från hjulflänsen.

⁵ Heribert Lehna, Dipl. Ing. Bahntechnik, e-postbrev 2006-04-20

⁶ Anders Ahlquist, konstruktionschef, Vossloh Nordic Switch Systems AB, e-postbrev 2006-03-22

² Tony Martinsson, signalprojektör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Gårdahallen 06-03

Gaturäler används även i korta och samtidigt snäva kurvor där övrigt spår kan bestå av vignolräler. Sådana kurvor är nämligen känsliga för så kallade solkurvor, som lätt uppstår under soliga och varma väderförhållanden. Rälernas rillor minskar risken för urspårning ifall otillåten spårvidd eller ramplutning skulle uppkomma ⁷.

Några exempel på områden där gaturäler används är bland annat Brunnsparcken och Korsvägen. Den används i mycket stor omfattning i Göteborg innerstad. De gaturälprofiler som används i Göteborg är bland annat: Ri 60N, Ri 60 (siffran 60 menar att rälen väger 60 kg/m).

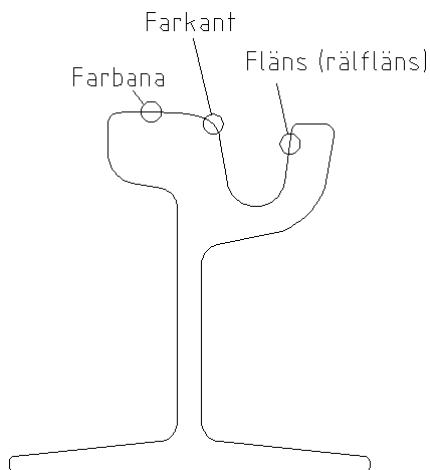


Fig 2-12 Gaturäl Ri 60N

Vignolräl

Den här rälen uppfanns av Charles B Vignoles redan år 1837 (Andersson, Berg, Stichel 2000 s. 2:1-2:3). I Göteborgs spårvägsnät används vignolräler främst där spårvagnarna inte interagerar med annan trafik. Exempel på en sträcka med vignolräler i Göteborg är Angeredsbanan.

De vignolprofiler som används i Göteborg är bland annat: Bv 50, Bv 34.

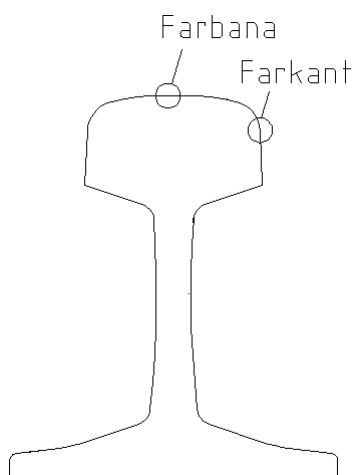


Fig 2-13 Vignolräl Bv 50

⁷ Stig Hammarson, spårprojektör Göteborgs Spårvägar, intervju 2005-12-21

2.2.3 Spårgeometri

Spårvidd

Använd nominell spårvidd är 1435 mm med toleransen ± 2 mm, mätt 14 mm under rärens överkant (även kallad R.Ö.K).

Ingen räslutning

Inom järnvägstekniken står all räl i en lutande ställning inåt spåret. Detta för att få en bättre passform mellan hjul och räl. Även ”Tvärbanan” som är en typ av spårväg i Stockholm, använder denna teknik (Orvnäs 2005, s. 22). Järnvägen i Sverige använder en lutning på 1:30, medan Tvärbanan har 1:40. I utlandet används oftast 1:20 och 1:40. I Göteborgs spårvägsnät används ingen lutning (Eriksson 1997, s. 1-4).

Kurvradier

I Göteborgs spårvägsnät finns det många horisontella kurvor med små radier. Dessa förekommer framförallt i de vändslingor som bland annat finns på ändhållplatser. Minst tillåtna radie i vändslingor är enligt Trafikkontorets Banstandard 20 m. Vid projektering av gatuspår eftersträvas kurvradier som överstiger 100 m, men det finns undantag. Kurvradier som är mindre än 40 m existerar i Göteborgs innerstad. Detta kan jämföras med järnvägarnas kurvradier som sällan understiger 300 m.

Övergångskurvor

För att undvika de obehagliga momentana sidokrafter som uppstår då en raklinje direkt tangerar med en cirkelbågformad kurva, används övergångskurvor. I Göteborgs spårvägsnät används korgbågar till gatuspår, och klotoider på vignolspår. En korgbåge är dock ganska lik en klotoid i formen. Det som försvårar användandet av klotoider på gaturäl, är bockningsmaskinens begränsade bockningslängd. En båglängd får ej understiga 2,35 m, då dessa inte kan bearbetas av maskinen. Spårvägarna är ensamma i byggbranschen med att använda sig av korgbågar i övergångskurvor⁷.

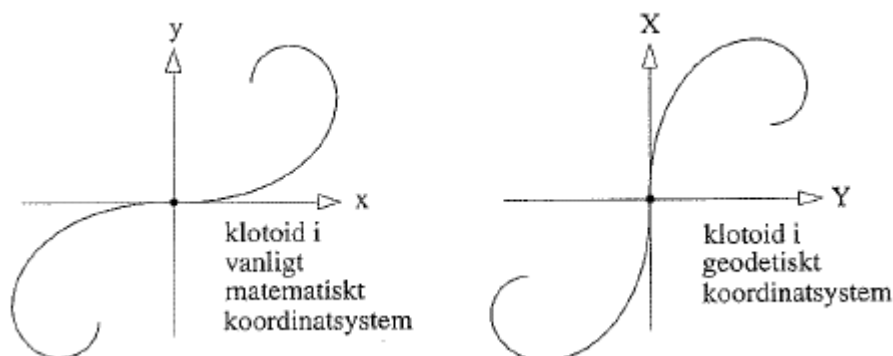


Fig 2-14 Klotoiden i det geodetiska systemet är det som vanligen används vid datorstödd vägprojektering (Kurskompendium Väg och gatuutformning)

⁷ Stig Hammarson, spårprojektör Göteborgs Spårvägar, intervju 2005-12-21

Korgbågens matematiska definition: $Vinkeländringen \Delta v \cdot radien R = konstanten k$

Exempel: 1 gon • R 150
2 gon • R 75
3 gon • R 50
4 gon • R 37,5
5 gon • R 30
6 gon • R 25

➔ $k = 150$

Observera att båglängden på alla radierna ska vara densamma!

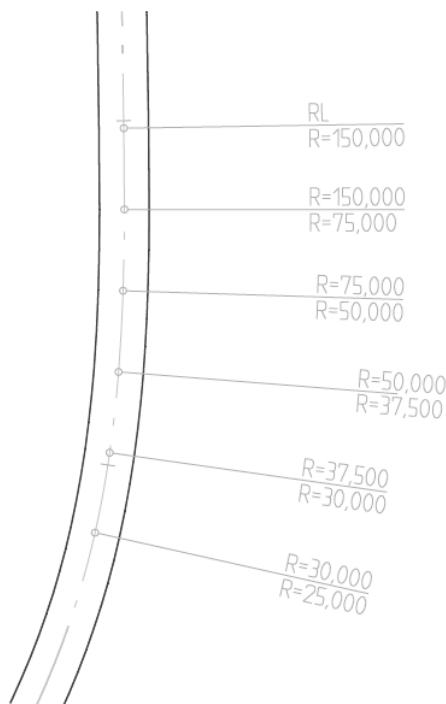


Fig 2-15 Exempel på en korgbåge

Rälsförhöjning

För att göra färden i kurvor mer komfortabel för passagerare och för att minska räls slitaget, används rälsförhöjning. Rälsförhöjningen innebär att rälerna ges en höjdskillnad i förhållande till varandra. Ytterrälen ligger då förhöjd i förhållande till innerrälen, och på så sätt får spåret en lutning i förhållande till omkringliggande mark (rälsförhöjningsvinkel). Vinkeln kommer att medföra att centrifugalkraften motverkas av fordonets normalkraft, och på så sätt blir färden i kurvor bekvämare för passagerarna. Rälsförhöjning är detsamma som skevning, vilket är en vanlig term i vägbyggnadssammanhang (Wengelin, Berntman & Lannér 2000, s. 57).

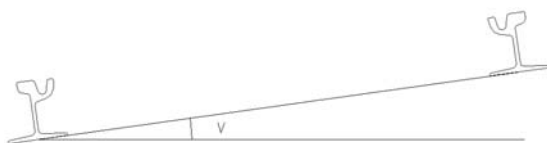


Fig 2-16 Rälsförhöjning

I Göteborgs innerstad är det inte alltid möjligt att göra rälsförhöjningar. Krav på att annan trafik såsom bussar ska kunna köra i samma område som spårvagnen, medför att farbanorna på rälsen måste ligga jäms med markytan. Om kurvgången ska bli bekväm för passagerare krävs då att spårvagnen inte kör i för hög hastighet.

Flänsbärande konstruktioner

Då gaturäler korsar varandra krävs det oftast att spårvagnen får köra på en flänsbärande konstruktion. Spårvagnens hjulflänsar är då den enda kontakten mellan fordon och mark. Övergången till flänsbärning sker genom att spårvagnen kör upp på en tillsvetsad ramp i gaturälens rilla. Korsningsvinkeln kan variera från $< 18 \text{ gon}^*$ till 100 gon . Vid fallen då vinkeln är $< 18 \text{ gon}$, kan djuprilla användas och då krävs ingen flänsbärande gång för spårvagnen⁷. Detta är önskvärt eftersom flänsbärande gång medför stora påfrestningar på hjulflänsarna³.



Fig 2-17 En flänsbärande spårkorsning och en djuprillekorsning

Växlar

För att spårvagnen ska kunna välja färdväg krävs det att växlar används. Växeltungorna styr spårvagnen i vald riktning.

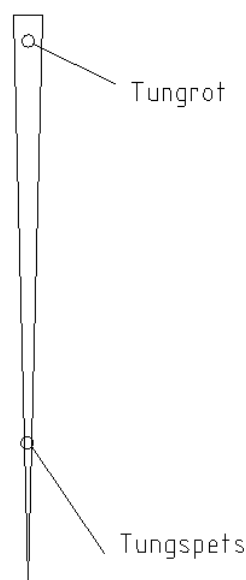
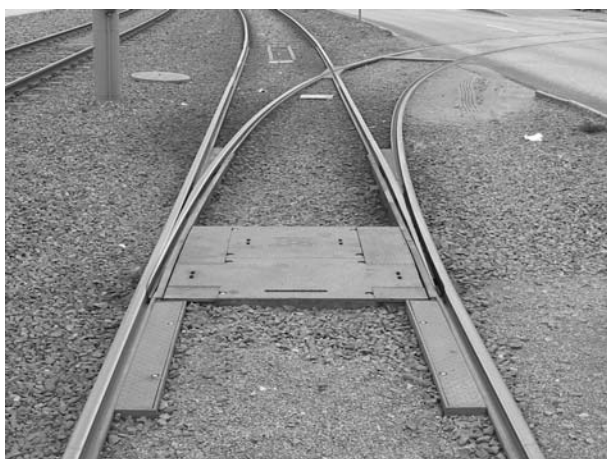


Fig 2-18 Spårväxlar och en schematisk bild över en växeltunga.

* Det går 400 gon på ett helt varv (360°)

⁷ Stig Hammarson, spårprojektör Göteborgs Spårvägar, intervju 2005-12-21

³ Jan Wikand, maskiningenjör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Rantorget 2006-03-07

2.3 Slitagebild

Då spårvagnarna kör på rälsen kommer de att slitas bort partiklar från både hjulen och rälsen. Det är detta som kallas slitage. I följande avsnitt kommer de vanligaste slitagebilderna på både hjul och räl att tas upp.

2.3.1 Hjulslitage

Hjulens slitagebild är helt beroende av vilken typ av vagn de sitter på, och vilken position på vagnen de har. Även styrningsinställningarna har betydelse. I allmänhet brukar hjulen i hjulpar nr 1, vara de mest slitna hjulen på alla spårvagnar. Detta på grund av att det är de som får ta emot den första och största dynamiska kraften, då spårvagnen exempelvis i hög hastighet kör in i en kurva.

M28/29

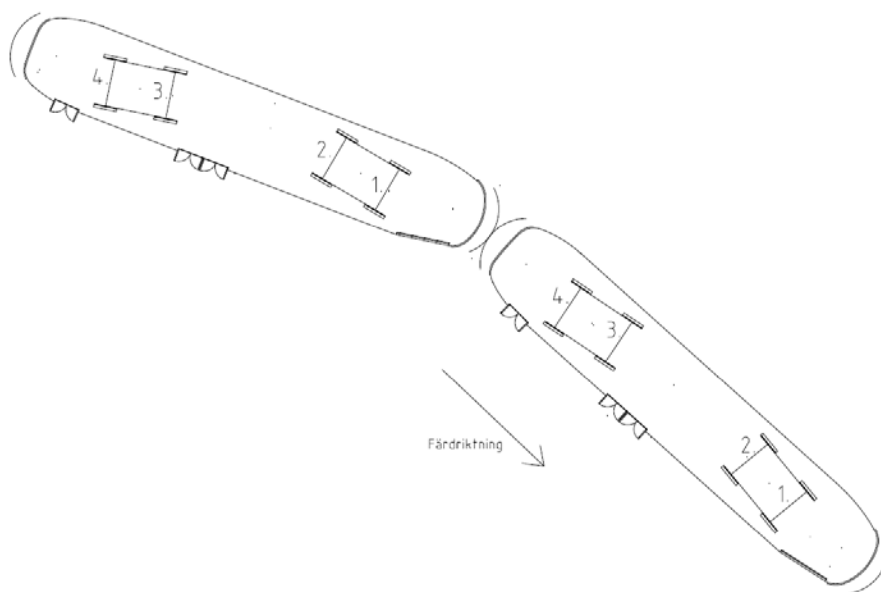


Fig 2-19 Hjulparens positioner på spårvagnarna M28 och M29

Hjulflänsarna i hjulparen 1 och 3, blir på de här vagnarna slitna, vilket medför att de blir tunnare. Ursprungstjockleken för dessa är 24 mm, och de får ej understiga 16 mm. De får inte heller bli tjockare än 24,5 mm.

I resterande hjulpar är slitningen av löpbanorna dominerande. Detta resulterar i att flänsbredden ökar, och att hjulens diameter minskar³.

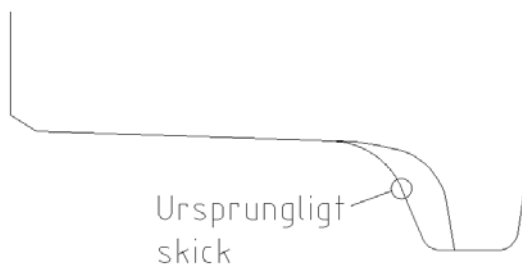


Fig 2-20 Sliten fläns

³ Jan Wikand, maskiningenjör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Rantorget 2006-03-07

M31

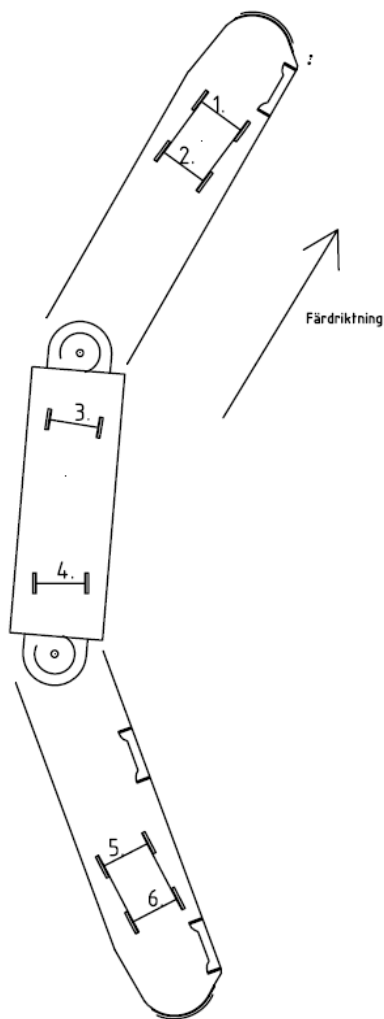


Fig 2-21 Hjulparens positioner på spårvagn M31

På den här spårvagnsmodellen slits flänsarna på hjulparen 1, 3, 4, och 5. Resultatet blir att hjulflänsarna blir tunnare. Hjulen i hjulparen 2 och 6, får däremot en dominant slitning på löpbanorna, vilket medför att hjulens flänsar blir bredare, och att hjuldiametern minskar på dessa hjul.

Specialfall på de individuella hjulen i vagnens mittsektion är dock inte ovanliga. Endast en mycket liten felinställning på den radiella styrningsmekanismen, kan orsaka en ojämn slitning på hjulen i hjulparet. Resultatet kan då bli att det ena hjulet får en tunnare fläns, medan det andra får en tjockare. Även en uppbyggnad av en "extra" fläns kan förekomma på något av hjulen (se fig 2-22 på följande sida). Förutom att hjulen slits ojämnt, kan även en felaktigt inställd styrmekanism resultera i felaktig slitning på rälsen ³.

³ Jan Wikand, maskiningenjör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Rantorget 2006-03-07



Fig 2-22 En hjulring med en ”extra” fläns

2.3.2 Rälsslitage

Vignol- och gaturäler slits på olika sätt, vilket bland annat beror på användandet av olika kurvradier, användandet av eller avsaknad av rälsförhöjning, och vilken hastighet som används. Rälens utformning har också betydelse.

Vignolräl

Rälens slits på farbana och farkant. Kraftigt så kallat sinusslitage kan uppstå där spårvagnar körs i hög hastighet, och där dålig samverkan mellan hjul och räl förekommer. Mer om spårvagnars sinusgång kan läsas i avsnitt 3.1.4.



Fig 2-23 Sliten farkant på en vignolräl

Gaturäl

Rälen slits främst på farkanten och flänsen. Detta sker framförallt i snäva kurvor exempelvis vändslingor. Det som sliter på rälen är flänsarna på spårvagnarnas hjul.



Fig 2-24 Sliten gaturäl. Strecken visar flänsens ursprungliga storlek!

Slitage orsakat av radiell styrning

Eftersom mellanvagnen på spårvagn M31 styrs mekaniskt, är det väldigt viktigt att korrekta inställningar görs i styrningsmekanismen. Inställningarna som levererades av tillverkaren Mittenwalder Gerätebau (numera Gleisbau Mechanik), visade sig vara felaktiga. De nuvarande inställningarna medför dock också slitageproblem. En allmän slitagebild över hela banan har upptäckts. 7-10 m innan och efter kurvor, förekommer kraftig slitning av rälerans farkant och fläns. Detta beror på att de individuella hjulen är i fel läge då de åker igenom kurvan. Liknande slitage har inte förekommit innan spårvagn M31 trädde i tjänst.

Händelseförloppet som sker är följande: Då spårvagnen åker in i kurvan kommer främre vagnen att börja svänga. Radialstången kommer då att tvinga främre ramverk i mellanvagnen, att även den svänga i samma riktning. Hjulen kommer då att vara inställda på att svänga, även fast de befinner sig i rakspår. Då främre vagnen kommit ut ur kurvan, kommer radialstången att tvinga främre ramverket att ställa sig i rakspårsläge, vilket är fel eftersom denna fortfarande är kvar i kurvan.

Det som händer med bakre ramverket i mellanvagnen är det motsatta, eftersom den styrs av den bakre vagnen. Så när spårvagnen åker in i en kurva, kommer hjulen att vara i rakspårsläge, och då bakre ramverket kommit ut ur kurvan kommer hjulen fortfarande att vara i kurvsläge⁴.

⁴ Florencio Garcia, maskiningenjör Göteborgs Spårvägar, studiebesök Rantorget 2005-12-19

Sinusslitage

På rakspår kan så kallat sinusslitage förekomma. På vissa ställen kan då farkanten på rälerna vara väldigt slitna, medan på andra ställen så har ingen form av nötning skett på farkanten. Slitaget följer ett vågaktigt mönster, och orsakas av att spårvagnarna inte åker helt rakt i färdriktningen, eftersom sinusgången oftast förhindrar detta¹. Mer om fenomenet sinusgång kan läsas i avsnittet 3.1.4.

Växlar

Beroende av från vilket håll trafiken kommer, så är det antingen tungspetsen eller tungroten som slits mest i en växel. Någon av dessa delar blir alltid påkörda av hjulen när spårvagnen åker in i växeln⁶.



Fig 2-25 Sliten tungspets

Flänsbärande konstruktioner

Rillbotten i spårkorsningarna är det som slits i de flänsbärande konstruktionerna. Eftersom spårvagnen styrs av en moträl eller rärläns i korsningen, så slits även denna. Där sker slitaget på farkanten och flänsen (Trafikkontoret Göteborg 2006).

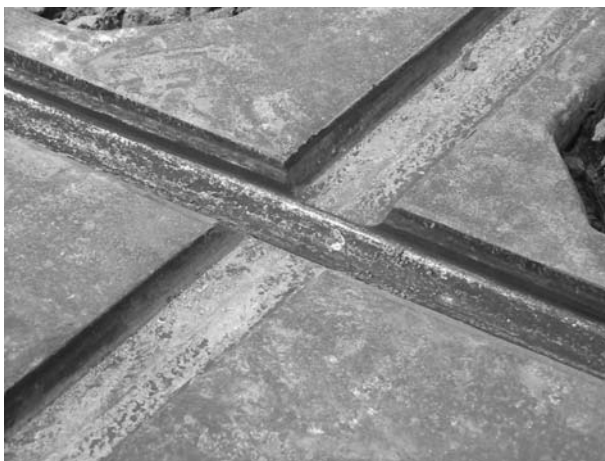


Fig 2-26 Nedsliten rillbotten i en spårkorsning

¹ Mats Larsson, chef Underhåll Väg och bana Trafikkontoret Göteborg, möte 2005-11

⁶ Anders Ahlquist, konstruktionschef Vossloh Nordic Switch Systems AB, e-postbrev 2006-03-22

2.3.3 Slitageåtgärder

Hjulringar

Då hjulringarna har slitits så reprofileras (svarvas) dessa. De kan även bytas ut när hjuldiametern har passerat tillåtna värden ³.



Fig 2-27 Hjulsvarning

Räls

Då slitaget överskridit tillåtna värden, kan antingen pålaggsvetsning eller spårbyte göras ¹.

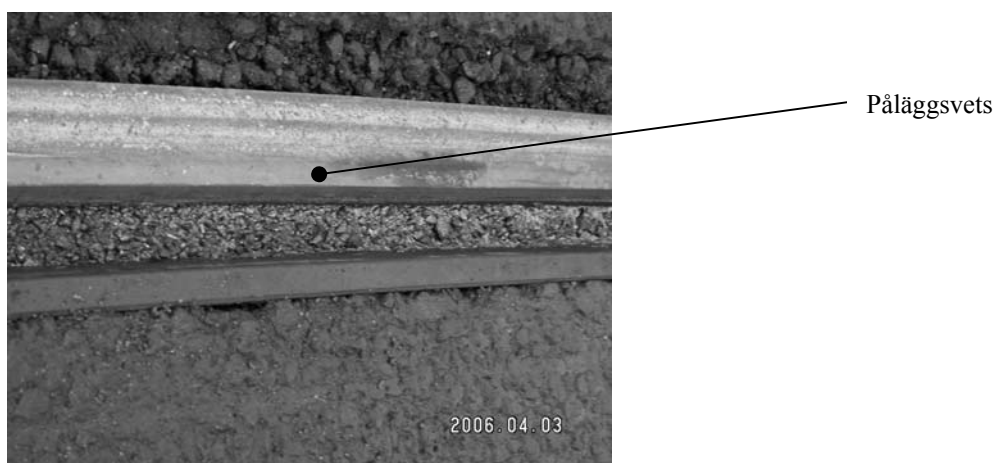


Fig 2-28 Pålaggsvetsad farkant på räl

3. Hjulets samverkan med rälen

I följande kapitel kommer samverkan mellan hjul och räl att belysas. Det är viktigt att kunna förstå sambandet mellan dessa komponenter, då en justering av den ena kommer att påverka den andra. Kapitlet är till stor del ett utdrag ur boken Spårfordons dynamik (2000), skriven av E Andersson, M Berg & S Stichel (förkortas härmed med Sd).

3.1 Teoretiska grunder

Det finns tre olika tillstånd som används för att kunna förklara fysikaliska fenomen inom spårtrafik:

Statiskt tillstånd, där spårfordonet antas vara stillastående på plant rakspår.

Kvasistatiskt tillstånd, där spårfordonet är i rörelse med konstant hastighet, på felfria räler och hjul, och i kurvor med perfekta radier. Friktionen är även konstant.

Dynamiskt tillstånd, där spårfordonet är i rörelse på slitna hjul och räler. Spårlägesfel är även medräknat. Instabil sinusgång och andra självgenererade rörelser är exempel på dynamiskt tillstånd.

I detta avsnitt kommer i huvudsak det kvasistatiska tillståndet att tillämpas. Även kontaktgeometrin mellan hjul och räl är förenklad, för att på så vis underlätta teorin. I avsnitt 3.2 Slitage, kommer viss hänsyn tas till det dynamiska tillståndet.

3.1.1 Det fria hjulparets styrning

Rullradieskillnad och kurvtagningsförmåga

På ett spårfordon finns det ingen ratt, så det är således inte föraren som styr fordonet genom kurvorna. Det som styr ett hjulpar i kurvor är *skillnaden i rullradie* mellan de två hjulen i hjulparet. Rullradieskillnaden fås genom att hjulen är koniskt formade, de har konlutningar och radier på löpytan (se fig 2-7 sid. 4). Då ett spårfordon sidoförskjuts i en kurva ändras hjulens rullradier.

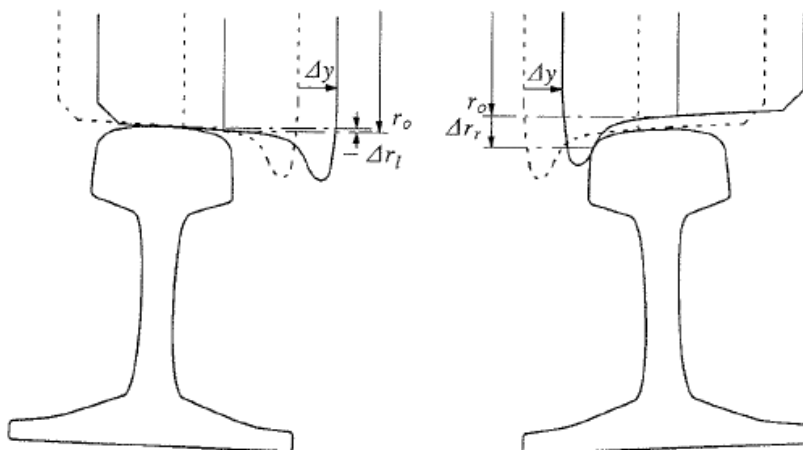


Fig 3-1 Rullradieskillnaden i ett hjulpar (Andersson, Berg & Stichel 2000)

Hjulet som har kontakt med ytterrälen i en kurva får större rullradie ($r_r = r_0 + \Delta r_r$), medan hjulet som är på innerrälen får en mindre rullradie ($r_l = r_0 - \Delta r_l$). Se fig 3-1 på föregående sida.

Rullradieskillnaden Δr_{r-l} , blir då $\Delta r_{r-l} = r_r - r_l$.

När det fria hjulparet rullar genom kurvan, så kommer den att förflyttas utåt, alltså från kurvcentrum. Då kommer principiellt rullradieskillnaden som hjulets konicitet ger, att vara proportionell mot skillnaden i väg mellan kurvans yttre och inre räl (Sd, s. 7:6-7:7, 7:24-7:26).

Då hjulparet får styra sig självt genom kurvan, kommer den att ställa in sig kvasistatiskt. Då kommer den även att ställa in sig radiellt, vilket innebär att hjulparets axel sammanfaller parallellt med en tänkt rak linje från kurvcentrum. Ju högre konicitet hjulet innehar, ju bättre självstyrningsförmåga genom kurvan. Det optimala fallet vore om hjulparet inte behövde använda flänsarna för att komma igenom kurvan. Hjulparet har då positiva styrkrafter. Däremot då hjulparet inte styr sig självt genom kurvan, och inte ställer in sig radiellt i kurvan, så har det negativa styrkrafter (Eric E Magel 1999).

Med några förenklingar kan sambandet mellan hjulparets rullradieskillnad och skillnaden i väg mellan kurvans inre och yttre räl förklaras:

- Centrifugalkraften försummas (genom låg hastighet eller skevning i kurvan)
- Ingen glidning sker
- Ingen flänskontakt förekommer
- Rakt koniska hjul används

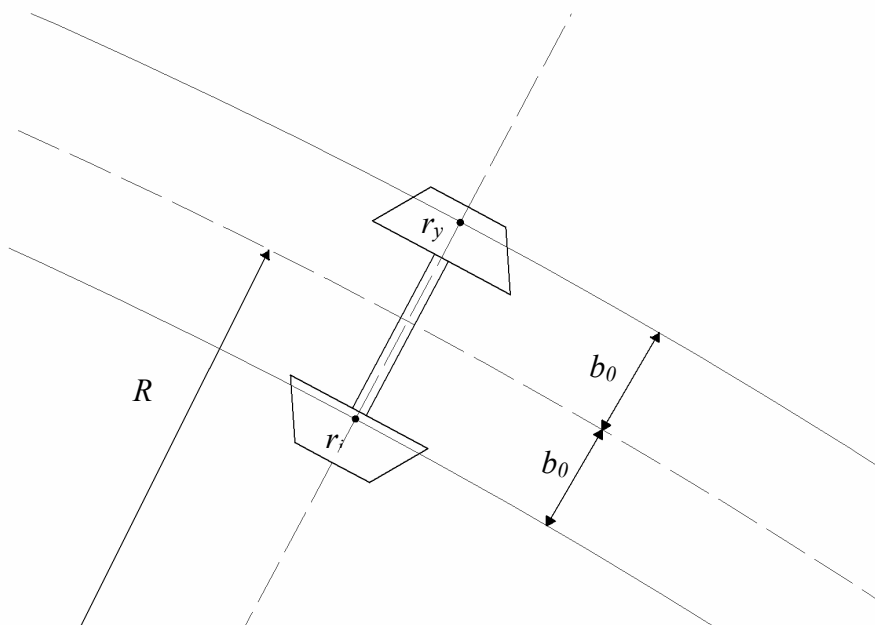


Fig 3-2 Ett fritt hjulpar med rakt koniska hjul i en kurva. Rullradie ytterhjul r_r och rullradie innerhjul r_l

Ren rullning ger:

$$\frac{r_y}{r_i} = \frac{R + b_0}{R - b_0}$$

Helt identiska och raka konor ger:

$$r_y = r_0 + \Delta r$$

$$r_i = r_0 - \Delta r$$

Efter bearbetning fås:

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{b_0}{R}$$

Då ingen flänskontakt sker erhålls:

$$\Delta r = r_0 \cdot \frac{b_0}{R}$$

Δr kan då raka konor och löpbanekontakt också förklaras som:

$$\Delta r = \gamma_0 \cdot \Delta y$$

γ_0 = konlutning

Δy = sidoförskjutning

Genom insättning av tidigare ekvationer fås:

$$\Delta y = \frac{r_0}{\gamma_0} \cdot \frac{b_0}{R}$$

Exempel:

Om spårvagnens hjulradie r_0 är 0,340 m och konlutningen är 1:35, vilken sidoförskjutning Δy kommer då att fås? Halva avståndet mellan löpcirklarna b_0 antas vara 0,75 m, och kurvans radie R är 24 m.

Lösning:

$$\gamma_0 = \frac{1}{35} \approx 0,029$$

Då ovanstående värden sätts in i formeln $\Delta y = \frac{r_0}{\gamma_0} \cdot \frac{b_0}{R}$ fås:

$$\Delta y = \frac{0,340}{0,029} \cdot \frac{0,75}{24} = 0,366 \text{ m...}$$

... vilket hade resulterat i en urspårning ifall inte flänsarna hade funnits på hjulen.

Att använda hjulparets självstyrningsförmåga är det optimala sättet att styra ett spårfordon genom kurvor. Däremot räcker inte alltid rullradieskillnaden till (såsom i ovanstående beräkningsexempel), och då tar flänsarna över styrningen.

Flänsstyrning

Då rullradieskillnaden är otillräcklig i förhållande till kurvradien, och på så sätt inte motsvarar den längre väg som ytterhjulet har att rulla, kommer hjulflänsarna att överta styrningen. Detta kallas flänsstyrning. Flänsstyrning kan även uppstå när rälsförhöjningen är otillräcklig i förhållande till fordons hastigheten i en kurva. Flänsstyrningen sker i form av enpunkts- eller tvåpunktskontakt.

Hjulparet kan ha tre olika inställningar i förhållande till spåret (se fig 3-3):

Underradial inställning, då flänskontaktpunkten ligger framför hjulaxelmitt (på vänster hjul i högerkurva). Här kommer krypkraften (friktionskraften, mer om detta i avsnitt 3.2.2) att vara riktad snett uppåt, vilket kan medföra urspårning i form av flänsklättring

Radial inställning, då kontaktpunkten ligger mitt under hjulaxelmitt

Överradial inställning, då flänskontaktpunkten ligger bakom hjulaxelmitt (på vänster hjul i högerkurva). Här kommer krypkraften att vara riktad snett neråt

I mycket snäva kurvor, och där hjul och räl samverkar dåligt kan tvåpunktskontakt uppstå. Vid små kurvradier kan anloppsvinklarna α bli stora. Då kan friktionen bli stor. Detta påverkar gångmotståndet som då också kan bli stort, och då kan slitaget på hjul och räl bli omfattande (Sd, s. 8:42-8:44).

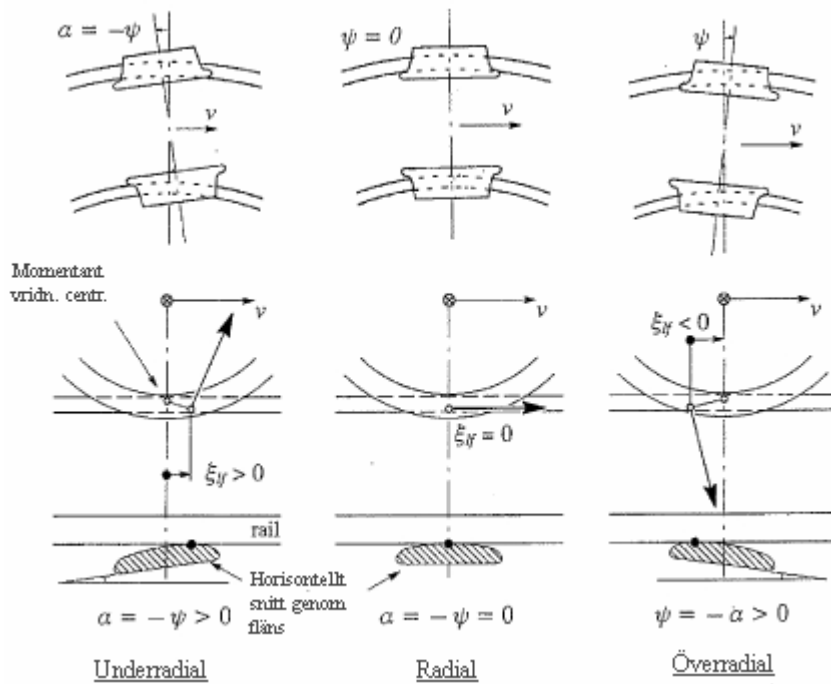


Fig 3-3 Underradial, radial, och överradial inställning i förhållande till spåret (Andersson, Berg & Stichel 2000)

3.1.2 Boggins kurvgång - Flänsstyrning

I tidigare avsnitt har hjulparets kurvgång beskrivits, men i de flesta fallen används boggier istället för enskilda hjulpar (se avsnitt 2.1.3).

Farkantskontakt menas i texten som kontakt mellan hjulets fläns och rälets farkant. Eftersom hjulen slits ner, så kan även kontakt mellan hjulets fläns och innerrälets fläns uppstå. Detta är en oönskad effekt, eftersom det ger slitage på rälets fläns.

Stor centrifugalkraft

Då centrifugalkraften är stor (på grund av hög hastighet) kan boggins båda hjulpar dra sig mot ytterrälen. Då flänsstyrning råder uppstår endast farkantskontakt på ytterrälen i kurvan⁵, se fig 3-4.

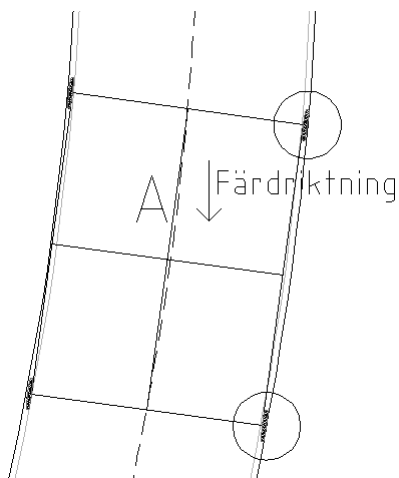


Fig 3-4 Boggins kurvgång vid stor centrifugalkraft

⁵ Heribert Lehna, Dipl. Ing., Bahntechnik, e-postbrev 06-04-20

Snedställd boggi

Vid låga hastigheter kan boggin snedställa sig. Farkantskontakt fås då på båda rälerna, se fig 3-5.

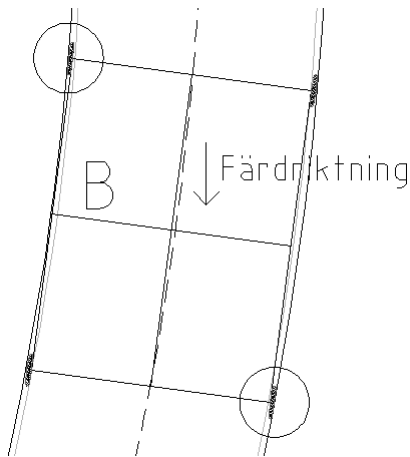


Fig 3-5 Snedställd boggi

Anloppsvinkeln α

Anloppsvinkeln α är den vinkeln som uppstår mellan hjulparets axel, och en tänkt linje dragen från kurvradiens centrum genom axelns mittpunkt (se fig 3-3 på föregående sida).

A för en boggi kan grovt framräknas genom:

$$\alpha \approx \frac{\arcsin a/2}{R}$$

a = Avståndet mellan axlarna

R = Kurvradien

Detta förutsätter dock att det är en boggi med styv inspänning, och att den har två hjulpar ⁵.

3.1.3 Konicitet och effektiv konicitet

Konicitet

Koniciteten λ definieras som kvoten mellan rullradieökningen Δr , och den relativa sidoförskjutningen Δy , alltså:

$$\lambda = \frac{\Delta r}{\Delta y}$$

Effektiv konicitet

Den effektiva koniciteten λ_{eff} (även kallad ekvivalenta koniciteten λ_{eq}) är av intresse då gången på rakspår undersöks. Mycket hög och låg λ_{eff} kan medföra problem, i form av högfrekvent och lågfrekvent instabilitet. Gången i spåret kan då bli obehagligt svängig, och på så vis kan flänskontakt eller i värsta fall urspårning ske. λ_{eff} inverkar med andra ord på den så kallade ”sinusgången” som behandlas närmare i nästa avsnitt (3.1.4).

⁵ Heribert Lehna, Dipl. Ing. Bahntechnik, e-postbrev 06-04-20

λ_{eff} är beroende av relativ sidoförskjutning, hjulvidd, flänstjocklek, spårvidd, spårspel och använd hjul/rälsprofil och deras skick. Den effektiva koniciteten kan matematiskt skrivas som:

$$\lambda_{eff} = \frac{\Delta r_r - \Delta r_l}{2\Delta y} \quad \text{den relativa sidoförskjutningen } \Delta y \text{ ökar då förskjutningen sker åt höger.}$$

I diagrammet i fig 3-6 visas tydligt sambandet mellan λ_{eff} , spårvidd, använda rälsprofiler och deras skick, inom en viss relativ sidoförskjutning (± 2 mm).

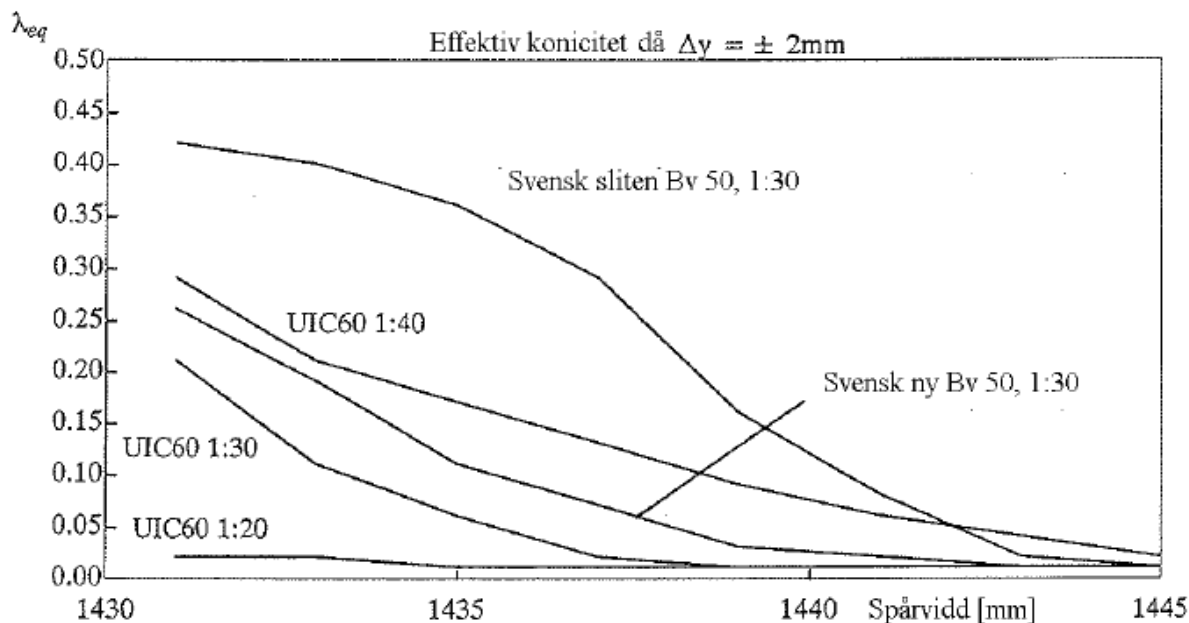


Fig 3-6 λ_{eff} för tåghjulet UIC/ORE S1002 på olika räls typer (Andersson, Berg & Stichel 2004)

Normala värden på λ_{eff} , som man försöker hålla när man konstruerar spårfordon är:

$$0,02 \leq \lambda_{eff} \leq 0,3$$

3.1.4 Hjulparets sinusgång

När ett spårfordon åker på ett rakspår kommer fordonet att fara fram och tillbaka i sidled under hela färden. Detta fenomen kallas *sinusgång*. Några förenklingar för att lättare kunna förklara fenomenet bör dock göras:

- Endast ett fritt hjulpar med konstant hastighet v_0 rör sig på ett rakspår
- *Glidning* mellan hjul och räl förekommer *ej*
- Hjulparets *massa* existerar inte
- Hjulen har *rakt koniska* löpbanor och *inga flänsar*
- *Stel axel* används

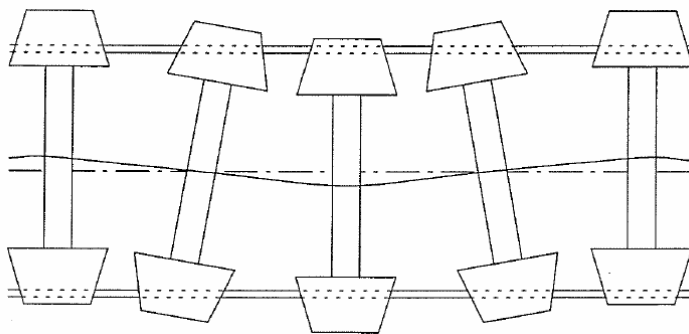


Fig 3-7 Det fria hjulparets sinusgång (Andersson, Berg & Stichel 2000)

Sinusgången uppstår genom att hjulparet under gång på rakspår, antas få en störning i sidled i förhållande till spårmitt. På så sätt blir rullradien på ena hjulet större än den andra. Den stela axeln möjliggör att rotationshastigheten är densamma på båda hjulen, och det ena hjulet med större rullradie, vill därför rulla en längre vägsträcka. Hjulparet snedställs, och rullar in mot spårmitt. Då kommer det andra hjulet att få en större rullradie, och hjulparet rullar tillbaka mot mitten igen. Denna fram och tillbaka rullning kommer att fortgå tills den antingen dämpas ut eller tills hjulparet stannar. Hjulparets gång i spåret påminner om en sinuskurva, och kallas därför sinusgång (Sd, s. 7:12-7:23).

Våglängden L_p på sinusgången kan genom Klingels formel framräknas genom:

$$L_p = 2\pi \sqrt{\left(\frac{b_0 \cdot r_0}{\lambda}\right)} \quad \text{där } b_0 \text{ är halva avståndet mellan löpcirklarna och } r_0 \text{ löpcirkelns radie}$$

Sinusgång för boggier med styv inspänning

Klingels formel kan omvandlas och tillämpas på ett spårfordon med två hjul och en boggi. Då antas dock att två *helt styvt inspända* hjulpar används. En rad andra förenklingar har också gjorts i detta fall. Båda formlerna som Klingel har arbetat fram skiljer sig en del från verkligheten. Om massan hade medräknats hade till exempel våglängden blivit längre, eftersom denna medför glidningsrörelser.

$$L_p = 2\pi \sqrt{\left(\frac{b_0 \cdot r_0}{\lambda}\right)} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b_0}\right)^2}$$

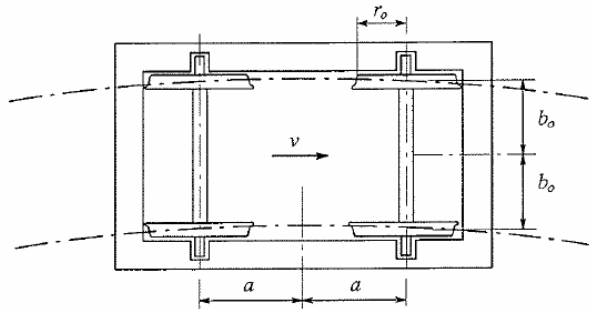


Fig 3-8 En boggi med styvt inspända hjulpar (Andersson, Berg & Stichel 2000). Styv inspänning menas då hjulen inte tillåts vara rörliga.

Sinusgångens frekvens

Sinusgångens *frekvens* f , alltså antalet svängningar fram och tillbaka över spåret under en viss tidsenhet, räknas fram genom:

$$f = \frac{v_0}{L_p}$$

Denna formel används även inom andra frekvensrelaterade arbetsområden såsom el- och teletekniken (Sd, s. 7:12-7:23). Även *vinkelhastigheten* ω kan framräknas:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{v_0}{L_p}$$

Sinusgångens frekvens påverkas mycket av vilken typ av inspänning som används i boggin, se fig 3-9.

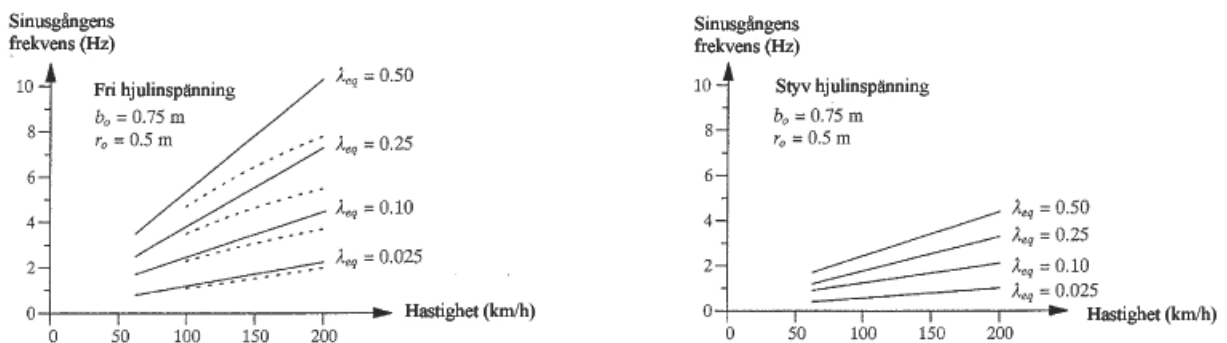


Fig 3-9 Sinusgångens frekvens i förhållande till hastighet, λ_{eff} och hjulens inspänning. De streckade linjerna visar den "verkliga" frekvensen, då bl. a masskrafter medräknas. (Andersson, Berg & Stichel 2000)

Gångstabilitet

Sinusgången och dess sidorörelser kan tänkas ha tre olika tillstånd:

- En sidostörning sker, och sidorörelserna dämpas och upphör så småningom, alltså *stabilt* tillstånd
- Sidostörning sker, men sidorörelserna varken dämpas eller ökas
- Sidostörningen sker och sidorörelserna ökar och blir allt större, *instabilt* tillstånd

Gångstabiliteten påverkas av följande faktorer:

- Hastigheten
- Effektiva koniciteten
- Fordonets massa
- Hjulparets inspanning i fordonet

Hålls hastigheten låg, så är även hjulparets sidorörelser stabila. Då den så kallade kritiska hastigheten nås kommer dämpningen att upphöra. Då kommer antingen det instabila tillståndet att ta vid, eller så kommer ingenting att hända.

Ju högre effektiv konicitet λ_{eff} som används, ju kortare våglängd L_p , följt av en högre frekvens f . Masskrafter spår på den instabila gången, därför har hjulparets massa en stor roll i gångstabiliteten.

3.1.5 Individuella hjuls egenskaper

För att kunna göra det möjligt att ha lågt golv på spårvagnar och tåg, kan individuella hjul användas. Fördelen är den att ett hjulpar då inte kräver en axel som sammanlänkar hjulen, och på så sätt kan utrymme skapas mellan dem. Nackdelen är att hjulparet inte har någon som helst självstyrningsförmåga. Det styrmoment som skapas hos hjulparen med stela axlar, existerar inte hos hjulparen med individuella hjul. Detta innebär att de individuella hjulen kommer att vilja åka framåt i en kurva. De kan därför behöva styras mekaniskt, så kallad radiell styrning (Roy E. Smith 2006).

3.2. Slitage

Hur uppstår slitage egentligen? I det här avsnittet förklaras de vanligaste och enklaste teorierna. Inledningsvis berättas det om kontaktgeometri och dess begrepp, för att därefter gå djupare in på de teorier som oftast används i slitagesammanhang.

3.2.1 Kontaktpunktsgeometri

Eftersom stål är ett elastiskt material, och både hjul och räler är tillverkade i detta material, så bildas det en kontaktyta. När kryp ska beräknas, så räcker det med att anta att kontakten mellan hjul och räl är en kontaktpunkt. Detta fås då massorna försummas.

Däremot då *kontaktrycket* σ_c ska beräknas, krävs det att hänsyn tas till båda kropparnas deformation. (Sd, s. 8:10-8:13). Kontaktytan antas då enligt Hertz kontaktteori vara formad som en ellips (Sd, s.7:3-7:4). För att detta ska gälla behöver dock krökningsradierna för hjul och räl vara konstanta över kontaktytan.

För att hålla nere beräkningstider vid simuleringar, och för att göra lösningen av normalkontaktproblemet enklare, gör man även här antaganden:

- Förskjutningar och töjningar är små
- Kontaktzonen är liten i förhållande till typiska dimensioner, t ex. hjulets rullradie
- Utseende och inspänning påverkar ej kontaktspänningarna i detta fall. Varje kropp anses vara semi-infinit begränsat av en plan yta. På så sätt kan spänningarna i det närmaste beräknas. Detta antagande kallas halvplanstagande.
- Kontaktytan beskrivs som konstanta krökningsradier i och i i närheten av ytan. Detta för att kunna beräkna kontaktzonens form och storlek.
- Ytorna är släta, alltså ytornas topografi försummas
- Inga plastiska deformationer förekommer, endast elastiska deformationer sker
- Kropparna består av homogena, isotropa material
- Kropparna är geometriskt och elastiskt lika (p g a halvplanstagandet), alltså kvasiidentiska. Då kan nämligen normal- och tangentialproblemet behandlas separat

Vanligtvis brukar normalkontaktproblem lösas med hjälp av Hertz kontaktteori. Teorin är inte alltid helt korrekt, men är än så länge den enda praktiskt tillämpningsbara teorin för att kunna göra en analys av kontaktförhållandet mellan hjul och räl. Kontaktytan är ungefär 1-2 cm² stor.

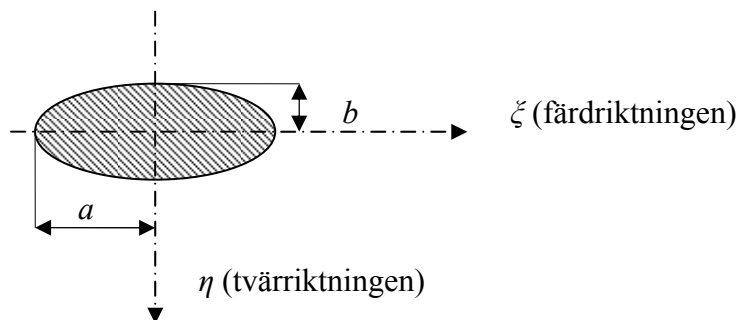


Fig 3-10 Ellipsen motsvarar kontaktytan enligt Hertz teori

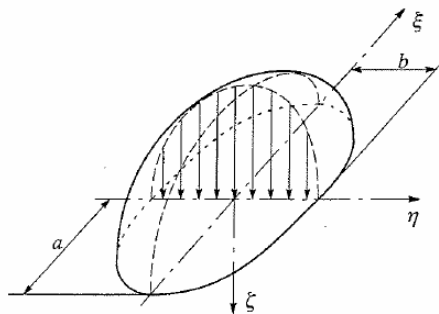


Fig 3-11 Kontaktrycket σ_c fördelning i kontaktytan (Andersson, Berg & Stichel 2000)

3.2.2 Kryp och spinn

Ifall hjulparet glider i kontaktytan istället för att utföra ren rullning, så uppkommer det krypkrafter. Detta förekommer alltid i fordon som är uppspända med fjädring, som förhindrar ren rullning. Glidning kallas i spårsammanhang för *kryp*. Kryp och spinn har en betydande inverkan på krypkrafternas storlek. Krypkrafter är detsamma som friktionskrafter (Sd, s. 8:3-8:4).

Rörelsen som uppstår på grund av glidning, kan delas in i komponenter i färdriktningen, tvärriktningen och rotation kring en axel vinkelrätt mot kontaktytan (spinn).

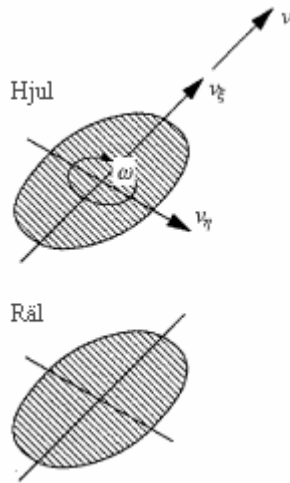


Fig 3-12 Krypets v och spinnets ω riktningar (Andersson, Berg & Stichel 2000)

Kryp i färdriktningen $v_\xi = \frac{v_\xi}{v}$

Kryp i tvärriktningen $v_\eta = \frac{v_\eta}{v}$

Spinn $\Phi = \frac{\omega}{v}$

Totalt kryp $v_{tot} = \sqrt{v_\xi^2 + v_\eta^2}$

där v_ξ och v_η är kryphastigheten i färd- respektive tvärriktningen. ω är rotationshastigheten och v färdhastigheten.

Krypkrafter och glid- och vidhäftningszoner i kontaktytan

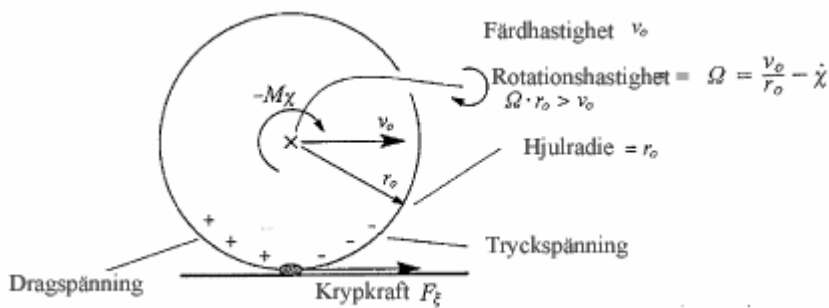


Fig 3-13 Tryckspänningar framför (-), och dragspänningar (+) bakom hjulet (Andersson, Berg & Stichel 2000)

Då hjulet rullar på rälen, kommer det att uppstå tryckspänningar på hjulet framför kontaktytan och dragspänningar bakom kontaktytan. Detta beror på den längsriktade krypkraften F_ξ .

Det finns ett samband mellan kryp och krypkrafter. När krypkraften görs som en funktion av kryptet, bildas ett diagram (fig 3-14).

Då $v > 0,010$, antas det att fullt utbildad friktion råder. Krypkraften F_v blir då lika stor som produkten av normalkraften N och friktionskoefficienten μ .

$$F_v = N \cdot \mu$$

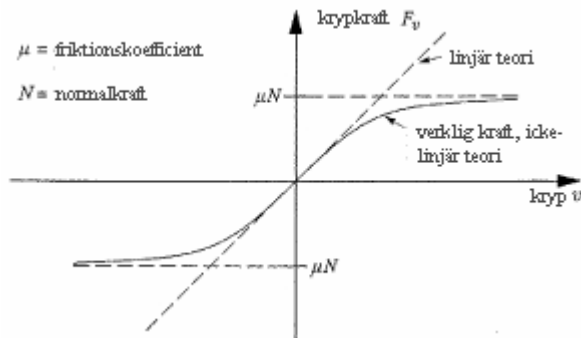


Fig 3-14 Krypkraften F_v som funktion av kryptet v (Andersson, Berg & Stichel 2000)

Framräkningen av kryp redovisas ej i denna skrift, men kan studeras i boken Spårfordons dynamik (E Andersson, M Berg, S Stichel 2000, s. 8:1-8:50). En översiktlig beskrivning av kryp och krypkrafter kan däremot läsas i avsnitt 3.2.2.

Glid- och vidhäftningsområden

På hjulet och rälen kommer även skjuvspänningen τ att uppträda. Framför kontaktytan kommer en vidhäftningszon (adhesionszon) att ske, och bakom kontaktytan kommer en glidzon att uppträda. Vid full vidhäftningszon existerar inga krypkrafter, och vid full glidningszon är krypkrafterna som störst (Sd, s. 8:16-8:18).

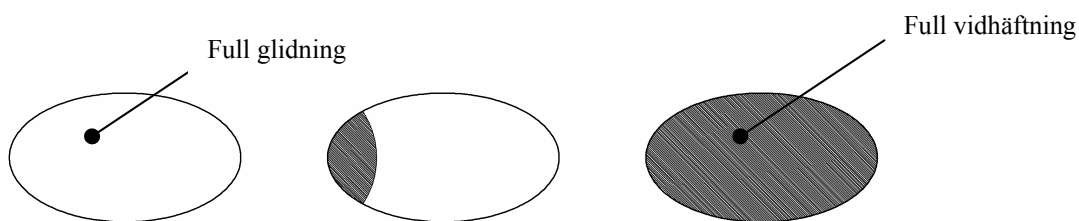


Fig 3-15 Glid- och vidhäftningsområden i kontaktytan

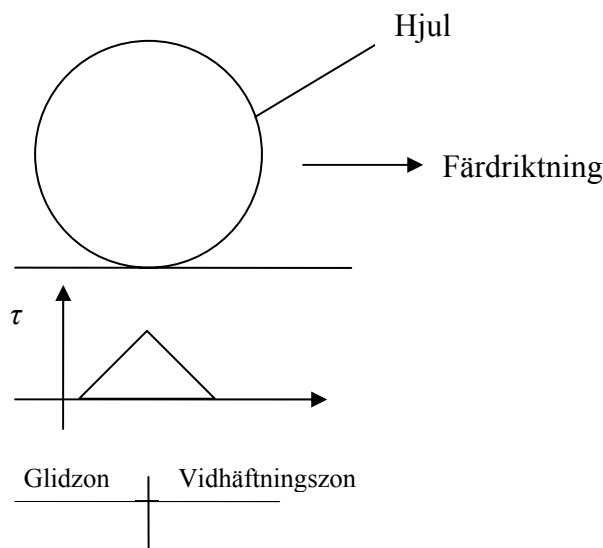


Fig 3-16 Skjuvkraften τ och dess fördelning i kontaktytan

3.2.3 Adhesivt slitage

Eftersom krypkrafterna (friktionen) är noll vid full vidhäftningszon, så kan adhesionen inte vara den egentliga orsaken till adhesivt slitage (Sd, s. 8:16-8:18). Däremot vid full glidzon är friktionen som störst. Alltså är det adhesiva slitaget helt beroende av glidningen.

Alla metaller är normalt sett täckta av filmer av oxider, absorberade gaser och hydrokarbonider (oljor). Filmerna är mycket tunna, endast cirka 10 nm tjocka. Filmerna är mycket viktiga, eftersom de har stor inverkan på bindningen och vidhäftningen mellan de olika materialen. En av huvudorsakerna till varierande friktionsvärden, är olika filmtjocklekar på materialen. De här lagren påverkar även slitaget (Ludema K. C, Blau J P 2002, Sliding and adhesive wear).

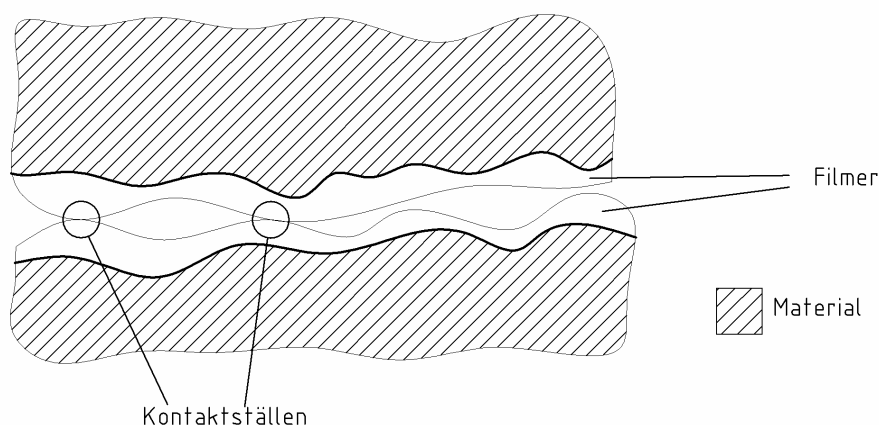


Fig 3-17 Två metaller med var sin film. Två metallytor som båda saknar film, kan vid kontakt med varandra bilda bindningar

När två materialytor glider mot varandra, kommer filmerna att få kontakt med varandra. Om dessutom kontakttrycket är högt, kan filmerna brytas upp för att sedan exponera metallen. Detta sker framförallt om någon av eller båda materialen deformerar plastiskt. Små områden av exponerade metaller kan på så sätt komma i kontakt med varandra, och därmed bilda bindningar.

Bindningarnas styrka beror helt på vilka metaller som glider mot varandra. Järn mot järn bindningar är nästan lika starka som själva metallen i sig. En bindning mellan två helt olika metaller är inte så stark i början, men blir efter hand starkare.

När glidning sker, tillkommer även skjuvspänningar vilket ökar sannolikheten för plastiskt flöde och uppbyggnader i kontaktytan. Efter att glidningen skett, kommer en film bestående av turbulent sammanblandande ämnen att bildas. En del av filmen kommer att försvinna från området, och betraktas som materialförlust, men det mesta kvarstannar.

Det finns många modeller för hur slitaget beter sig. Den enklaste och vanligaste som kan användas är dock *Archards ekvation*:

$$Y = k \cdot \frac{W \cdot V}{H}$$

där Y är slitagets omfattning [m^3], k slitagekonstanten, W lasten som används [N], V glidavståndet [m], och H hårdheten av det mjukaste materialet [N/m^2].

Ekvationen är inte helt pålitlig, då adhesions slitage är ett väldigt komplicerat fall. Ibland kan fler än 25 variabler vara inblandade, och olika material ger helt andra egenskaper än vad ekvationen är gjord för. Det har visat sig att bästa resultaten fås fram genom simuleringar och inte genom matematiska ekvationer (Ludema K. C, Blau J P 2002, Sliding and adhesive wear).

3.2.4 Abrasivt slitage

Då hårda partiklar eller utskjutande delar trycks mot, eller rör sig utefter en fast yta och materialförlust sker, uppkommer så kallat abrasivt slitage. Exempel på aktiviteter där abrasivt slitage uppstår är vid plogning, och stenkrossning. Det finns två olika kontaktformer vid abrasivt slitage: tvåkroppskontakt, och trekroppskontakt (se fig 3-18). Typisk tvåkroppskontakt är kontakten mellan en sko och ett plant golv. Exempel på trekroppskontakt är kontakten som sker mellan en sko, sand, och ett plant golv (Tylczak H. J, Oregon A, Blau J. P 2002, Abrasive wear).

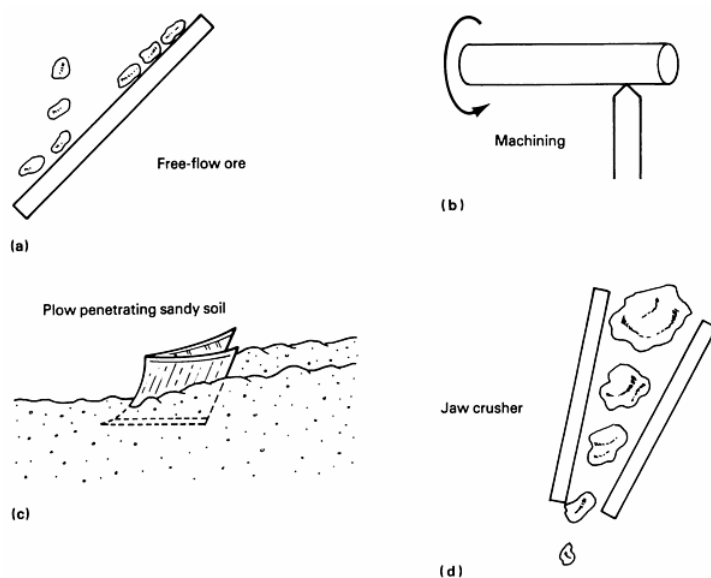


Fig 3-18 a) Öppen tvåkroppskontakt b) Sluten tvåkroppskontakt c) Öppen trekroppskontakt c) Sluten trekroppskontakt (Tylczak H. J, Oregon A, Blau J. P 2002, Abrasive wear)

Slitaget, alltså förlusten av material från en eller flera komponenter, kan uppstå genom plogning, mikroutmattning, kilning, mikrosprickning, och skärning.

Skärning som är den mest slitande formen, uppstår då en abrasiv spets sliter loss en flisa på materialets yta, liksom ett verktyg i en maskin (Tylczak H. J, Oregon A, Blau J. P 2002, Abrasive wear).

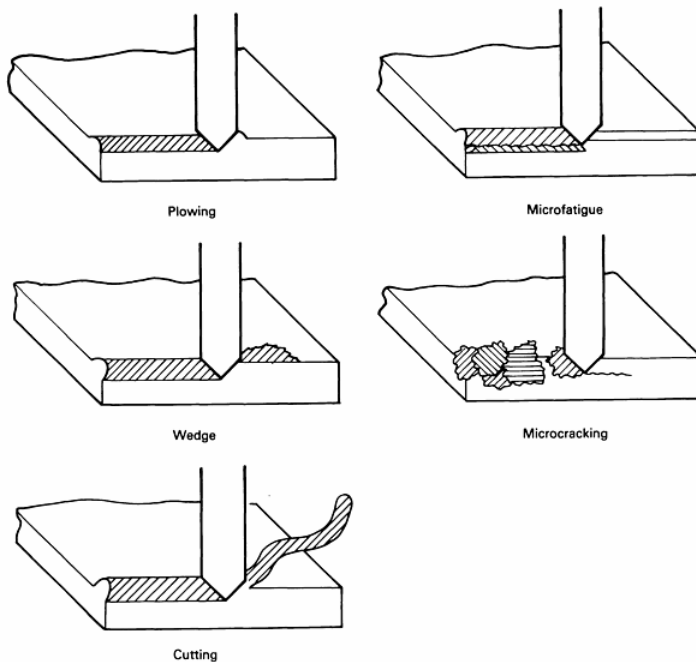


Fig 3-19 Plogning, mikroutmattning, kilning, mikrosprickning, och skärning (Tylczak H. J, Oregon A, Blau J. P 2002, Abrasive wear)

Maximala volymen material som skurits ut orsakat av abrasivt slitage, ges genom ekvationen:

$$W = A \cdot d$$

där W är det förlorade materialets volym, A är skårans area, d är skårans längd.

Skårans area A framräknas genom:

$$A = k_1 \cdot p$$

där k_1 är en konstant bestämd av skårans utseende, och där p är skårans djup.

Skårans djup p är i sin tur bunden av k_2 (en konstant beroende av bland annat möjligheten till plogning istället för skärning med mera), L som är lasten, och H materialets hårdhet:

$$p = k_2 \cdot \frac{L}{H}$$

Vid en sammanslagning av ekvationerna fås:

$$W = k_3 \cdot \frac{L \cdot d}{H}$$

eller igenkänt från vidhäftningsslitage $Y = k \cdot \frac{W \cdot V}{H}$

alltså *Archards ekvation*, som även här är tillämpningsbar (Tylczak H. J, Oregon A, Blau J. P 2002, Abrasive wear).

3.2.5 Smörjningens inverkan

Ju större friktion som fås desto mer slitage, är en ungefärlig grundregel. Friktionen på rälsen är som störst på torra och soliga dagar (Sd, s. 10:11-10:12).

För att minska slitaget på rälsen och skrik ljud kan smörjning göras. Smörjningen görs i kurvor, och appliceras antingen manuellt eller automatiskt. Den automatiska smörjningen kan göras genom fasta anordningar monterade på spåret (fig 3-20), eller genom apparater monterade på spårfordonen. Smörjningen sker främst på rälsens farkant-farbana, men även smörjning av hjulflänsen förekommer (Sd, s. 10:11-10:12).

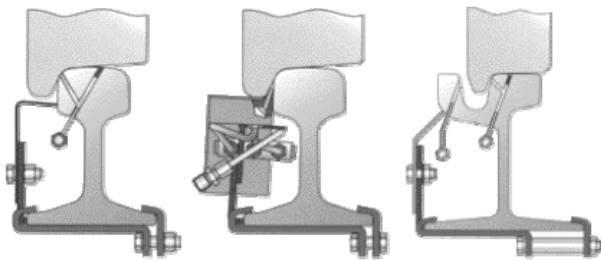


Fig 3-20 Exempel på fasta smörjanordningar., borrade smörjkanaler och smörjlist (www.schreck-mieves.se)

3.2.6 Sprickbildning – En utmattningsfaktor

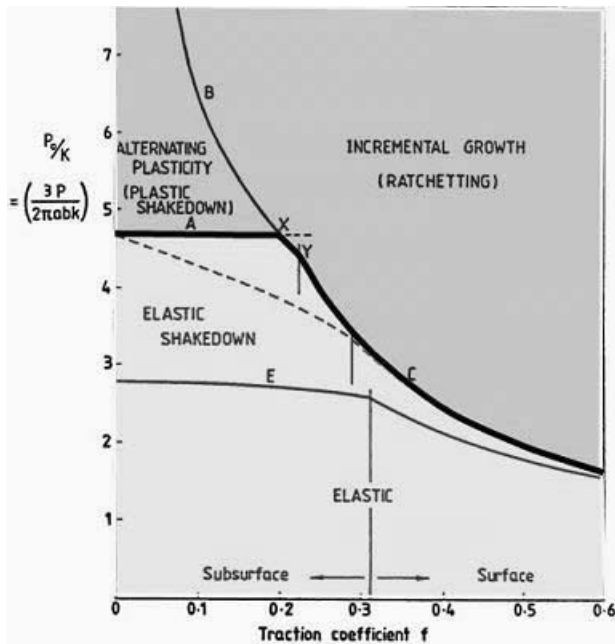
Vid dålig samverkan mellan hjul och räl kan spänningarna i kontaktytan bli stora. Sprickor kan då bildas på eller under ytan på rälsen och hjulet. Detta är inte slitage, utan faller under kategorin utmattning. Sprickorna växer till sig och blir med tiden större och till slut orkar stålet kring sprickorna inte med belastningen, och då lossnar en eller flera bitar av löpytan eller farbanan. Termiska faktorer spelar en viss roll, men spänningarna vid rullkontakten är den största anledningen till sprickbildning. Bitarna kan bli så stora som 5 mm, och är så pass väl synliga för ögat (Wheel shelling and spalling 1989 & Implementing an anti-shelling wheel profile 2005).



Fig 3-21 Sprickbildning på ett kanadensiskt tåg hjul (www.interfacejournal.com)

Vanliga orsaker till sprickbildning inom spårväg är orunda hjul, och så kallade *hjulplattor*. Hjulplattor innebär att en del av hjulet tillplattats, exempelvis genom en kraftig inbromsning (Hedström 2004, s. 27). Det är väldigt viktigt att kontrollera sprickbildningen och dess utbredning, framförallt inom järnvägstekniken, då en allt för utvecklad sprickbildning under ogynnsamma förhållanden kan resultera i rälsbrott.

Ytlig sprickbildning kan i förebyggande syfte uppskattas och undvikas med hjälp av ett så kallat shakedown-diagram (fig 3-23), men även datorsimuleringar kan användas. Framräknade värden som ger ett resultat som hamnar inom den ljusa sektorn (nedersta) kommer inte att medföra någon sprickbildning på ytan.



P_0/K = kvoten av kontakt- och skjuvspänningarna

f = kvoten av krypkrafterna och normalkrafterna

Figur 3-22 Shakedown-diagram. Då axelvärdena ger ett resultat som hamnar inom den ljusa sektorn, uppstår ingen sprickbildning på ytan (www.interfacejournal.com)

4. Ritningssimulering

För att på ett ganska enkelt sätt få fram en bild på hur löpverken och dess inställningar påverkar rälsslitaget, ritades olika scenarier med varierande måttsättningar på löpverken och rälen upp. Slitaget i sig betraktas i detta resonemang som delar av antingen hjulet eller rälen som lossnar, orsakat av kontakt mellan hjulet och rälen.

Ritningssimuleringen visar inte hur omfattande slitaget kan bli, ej heller på vilket sätt det uppstår. Simuleringen indikerar bara "acceptabel" och "oacceptabel" kontakt som uppstår under vissa förutsättningar. Acceptabel kontakt är när kontakt uppstår på ytterrälens farkant. Då kommer farkanten att slitas. Skulle kontakt uppstå på innerrälens fläns då har en oacceptabel kontakt uppstått. Ritningssimuleringen visar även *anloppsvinkeln* α mellan hjulet och rälen vid kontakt. Detta har betydelse för slitagets omfattning, en stor anloppsvinkel brukar resultera i omfattande slitage.

4.1 Ingångsvärden

Jämförelse mellan dagens och äldre hjulringar

För att få veta lite mer om hur hjulringarna och A-måttet var förr i tiden, gjordes en kort undersökning. Ritningar på äldre hjulringar hämtades från Region- och Stadsarkivet Göteborg, och jämfördes med dagens motsvarighet. Under jämförelsen upptäcktes det att det var stor skillnad på utseendet (se fig 4-1), den äldre hjulringen från år 1963 var 4 mm bredare in mot spårmit. Alltså hade hjulringen justerats för att ändra A-måttet. Andra lutningar som fanns på den äldre hjulringen har också försvunnit under tidens gång.

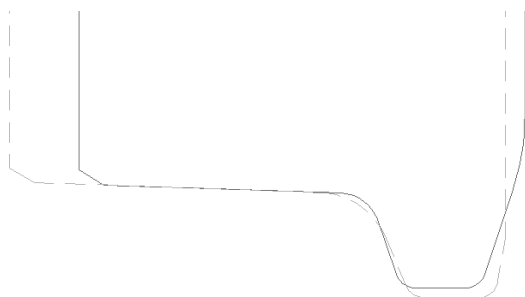


Fig 4-1 Gammal och dagens hjulring (streckad)

Konicitetsbegränsning

I det här arbetet beräknades minsta möjliga kurvradie för hjulparets självstyrningsförmåga (mer om självstyrning i avsnitt 3.1.1) fram. Syftet var då att få reda på vid vilken radie som flänsstyrningen tar vid. *Minsta kurvradie* R_{min} framräknades till 252,7 m. Beräkningarna kan betraktas i Bilaga 3 Konicitetsbegränsning.

Däremot hävdar Mats Larsson på Trafikkontoret Göteborg att R_{min} är 130 m enligt en tidigare utredning (Kombinationer av olika räl- och hjulprofiler, Lars Eriksson). I ritningssimuleringen användes därför R 130 m som R_{min} , eftersom utredaren antar att en mer vetenskaplig metod användes då detta värde räknades fram.

4.1.1 Fältundersökning av spårvagnens kurvgång

Det gjordes en fältundersökning för att ta reda på om flänsstyrning förekommer i kurvor med understigande radier som understiger R_{\min} . Syftet var dessutom att försöka ta reda på om spårvagnens boggi hackade sig genom kurvor eller om de rullar jämnt genom den.

Resultaten visade att flänsstyrning förekommer, och att boggin i vissa fall snedställer sig. Ingen tydlig indikation på att boggin hackade sig genom kurvan förekom dock. Fältundersökningens rapport kan läsas i Bilaga 4 Fältundersökning av spårvagnens kurvgång.

4.1.2 Individuella hjul

Det gjordes flera försök för att komma i kontakt med Gleisbau Mechanik, som har tillverkat mittsektionen till spårvagn M31. Försöken var resultatlösa, e-postbrev som skickades besvarades aldrig. Syftet med e-postbrev var att få information om hur den radiella styrningen till de individuella hjulen var tänkt att fungera.

4.2 Genomförande

Förutsättningar

För att ritningssimuleringen ska fungera har följande antaganden gjorts:

- Kvasistatiska förhållanden råder
Fjädring, dämpning och centrifugalkraft beaktas inte.

- Flänsstyrning råder
Hjulens konicitet (rullradiesskillnad) har ingen inverkan på styrningen.

- Sinusgången försummas
Boggin förutsätts då åka parallellt med rakspåret.

- Förenklade ritningssnitt över hjulflänsarna används
För att få exakta avbildningar av hjulets fläns i ett snitt, krävs 3-dimensionella ritningar. Dessa har ej kunnat framställas i denna utredning. Jämförelser mellan ett tidigare ritat ”verkligt” flänssnitt och en förenklad version har gjorts. Mindre avvikelser som inte påverkade slutresultatet konstaterades.

- Rälflänsen placering antas vara konstant
Endast farkanternas placering ändras, då spårvidden ändras.

- Gaturäl Ri 60N utan rälsförhöjning används

- Endast hjulaxelns längd justeras
Hjulens bredd ändras inte, utan hjulen förflyttas från eller mot spårmit

Ritningssimuleringen beskriver främre boggin på en spårvagn när den åker in i en kurva med gaturäler. Boggin har axelavståndet 1800 mm, vilket är detsamma som på spårvagn M28/29, och M31. Simuleringar på spårvagn M31s individuella hjul har inte gjorts, på grund av bristande ingångsvärden. Dock tas de individuella hjulen upp i den avslutande diskussionen.

Tillvägagångssätt

1. Inledningsvis ritades de förenklade hjulflänssnitten upp i datorprogrammet AutoCAD 2006. De ritades upp i tjocklekarna 24 mm (nyskick), 20 mm och 16 mm (maximalt nedslitet). I samma skede ritades även alla boggiar med tillhörande flänssnitt upp. Boggiernas A-mått varierades med måtten 1384 mm, 1382 mm, 1378 mm, och 1374 mm, och kombinerades med flänssnitt med skiftande tjocklek. I denna fas bestämdes även rillans bredd.

2. Alla rak-kurvspår ritades upp med olika radier och spårvidder. I simuleringen valdes radierna: R 130 m, R 65 m, R 40 m, och R 18 m. Kurvradien R 130 m valdes eftersom det är vid den radien som konicitetens styrningsförmåga upphör. Flänsstyrning tar då vid istället, enligt Mats Larsson på Trafikkontoret. R 18 m användes för att kurvradien är en av de minsta som används i Göteborg. Övriga radier valdes för att få några ungefärliga genomsnittskurvor. Valda spårvidder som användes var den nominella spårvidden 1435 mm, och 1445 mm som enligt Trafikkontorets Banstandard är lägsta planeringsnivån för en slitageåtgärd.

3. Simuleringarna kördes set-vis, där ett set motsvarar 3-4 körningar med samma boggiegenskaper testade på olika rak-kurvspår. I den här fasen söktes även maximal spårvidd fram för de olika A-mått och hjulkombinationerna. Detta gjordes genom att först göra en set-körning med acceptabel kontakt på alla körningar i setet. Därefter krymptes spårvidden ner tills en oacceptabel kontakt uppstod på någon av körningarna.

Körning

Då simulering kördes gjordes följande saker:

1. Den valda boggin placerades i ”rakspårsgården” i rak-kurvspåret. Den var centrerad, och bogginns långsidor löpte parallellt med rakspåret.

2. Med ritkommandot MOVE, och verktyget ORTHO, flyttades boggin in i kurvan. För bästa resultat gjordes verktyget OSNAP passivt.

3. Då något av hjulen i det främre hjulparet fick kontakt med antingen ytterrälens farkant, eller innerrälens fläns, stoppades bogginns förflyttning. När hjulet och rälen hade ett avstånd mellan varandra på < 10 µm, betraktades det som kontakt.

4. Därefter markerades kontakten med en cirkel. Cirkelns mitt visar då var kontakten hade skett, i ”utzoomat läge”.

4.2.1 Resultat

I simuleringen gjordes tester på varierande A-mått. Även olika nerslitna hjulflänssar och räler prövades, för att se inverkan på dessa faktorer. Det finns ett samband mellan A-mått, spårspel, och kurvradien, då anfallsvinkeln ska undersökas enligt Heribert Lehna. Simuleringarna kan skådas i ritningsform i Bilaga 2 Resultat av ritningssimuleringen.

Nuvarande A-mått 1382 +2 / -0 mm

Då A-måttet sätts som 1382 mm med nya hjul (A1382-SL24), fås acceptabel kontakt ända tills spårvidden blir 1443 mm.

Då främre hjulparets flänssar slits ner till 16 mm (A1382-SL16), fås oacceptabel kontakt vid alla spårvidder och kurvradier.

Då främre hjulparets flänsar slits ner till 20 mm (A1382-SL20), fås acceptabel kontakt ända tills spårvidden är <1437 mm. Ner till R 40 m går bra vid spårvidd 1437 mm, däremot fås oacceptabel kontakt vid R 18 m.

A-mått 1378 mm

A1378-SL24 ger acceptabel kontakt tills spårvidden blir <1437 mm. Vid R 40 m fås då acceptabel kontakt, men inte vid R 18 m.

A1378-SL16 ger oacceptabel kontakt på alla radier och spårvidder.

A1378-SL20 ger oacceptabel kontakt på alla radier och spårvidder.

A-mått 1374 mm

A1374-SL24 klarar inte någon radie eller spårvidd som ger acceptabel kontakt. Därmed är det inte nödvändigt att göra fler undersökningar på det måttet.

Andra observationer

Anloppsvinkeln visade sig vara beroende av A-måttet, spårspelet och kurvradien, precis som Heribert Lehna angav. Att tänka på är att stora anloppsvinklar normalt sätt medför större mängd slitage på både hjul och räler.

Hjulflänsarnas tjocklek visade sig ha stor inverkan i kontaktförhållandet. Även *spårvidden* spelade en betydande roll i sambandet.

5. Diskussion

Simuleringarna visade att nuvarande A-mått, alltså 1382 +2 / -0 mm är det bästa. Mest positiva effekter fick då den var satt till 1384 mm, som är det maximala måttet. Simuleringen utgår ifrån att flänstjockleken och spårvidden är givna storheter då hjulen monteras och har nominella mått.

En ökning av A-måttet är inte rekommenderbart, eftersom spårspelet mellan farkant och hjulfläns blir då för litet. Rekommenderat spårspel är 2,5 mm och det fås vid A1382-SL24. Däremot vid A1384-SL24, krymper spårspelet till endast 1,5 mm. Detta kan ha inverkan på nötningen på farkanterna i rakspår (sinusslitage), eftersom den effektiva koniciteten då blir hög. Åkkomforten kan också äventyras under dessa omständigheter.

Då A-måttet minskades, ökade sannolikheten för att få oacceptabla kontakter mellan hjul och räler. A1374-SL24 klarade inte ens en kurvradie på 130 m, och A1378-SL20 klarade heller inte denna. Det vore därför olämpligt att minska A-måttet.

För de individuella hjulen på spårvagn M31s mellanvagn saknas det tillräckliga ingångsvärden, för att göra en simulerad bedömning på hur justeringar av A-måttet skulle påverka rälsslitage. Ett antagande vore att även dessa skulle få likartade konsekvenser som de beprövade boggierna. Däremot skulle en ändring av hjulprofilen och hjulets storlek vara en åtgärd för att minska det slitage som uppstår på grund av den radiella styrningen. Något annat som skulle kunna göras är att ändra styrmekanismen, antingen genom att utveckla ett nytt system, eller att fortsätta att söka efter bättre styrintällningar. Dessutom kanske en utökad mjuk hjulparsstyrning kan ge positiva egenskaper. Detta är dock bara hypoteser.

En ändring av A-måttet skulle få stora konsekvenser i spårvägsnätet. Först och främst måste justeringar och investeringar göras på spårvagnarna. Eftersom många komponenter i spårvägsnätet är beroende av A-måttet, så måste även dessa justeras. Då detta inte kan göras samtidigt, måste det bli en övergångsperiod. Under denna period kommer justerade spårvagnar att trafikera ojusterade spår. Likaså kommer ojusterade spårvagnar att rulla på justerat spår. Detta borde resultera i omfattande slitage på både hjul och räler, alltså en motsatt effekt mot det som önskas.

Spårviddens inverkan på både kontaktförhållande och anloppsvinkel var betydande, men det enda som kan göras i detta fall är att påläggsvetisa eller byta räler. Detta är den åtgärd som normalt sett vidtas. Dock så skulle det kunna planeras större kurvradier i projekteringskedet, för att i förebyggande syfte få en lång livslängd på den utlagda rälsen. Detta är dock inte alltid möjligt, eftersom gatuutrymmet inte alltid tillåter detta.

Däremot skulle en noggrannare kontroll av hjulens skick vara en möjlighet. I nuläget görs en översyn av spårvagnarnas hjul var 6 000-9 000:e km. De hjulringar som inte klarar av toleranskraven, reprofileras eller byts ut. Dessutom görs regelbunden reprofileringsvar 55 000:e km. Detta är en god åtgärd, men kanske inte helt tillräcklig. Spårvagnarnas hjul slits antagligen väldigt olika, eftersom de inte åker samma rutt hela tiden. De sätts in där de behövs, och åker över hela stadens spårvägsnät. Det är alltså slumpen som avgör hur omfattande hjulens slitage blir. Exempelvis om en spårvagn skulle sättas in bara på de linjerna som har mest omfattande rälsslitage, så borde även hjulens slitage bli omfattande. En annan faktor som kan ha stor inverkan på slitaget, är hur föraren kör spårvagnen. En förare som har bråttom kanske inte tar hänsyn till att minska farten i kurvor. Även här avgör slumpen.

På tågunderhållsföretaget Euromaint testas *lasermätning* och *höghastighetsfotografering* på tåg hjul (Ny Teknik Nr 15-16/2006). Syftet med försöket är att på sikt få ett underhåll som är både verkningsfullt och kostnadseffektivt, speciellt inriktat på hjul och bromsbelägg. Om liknande utrustning skulle användas på spårvägsnätet i Göteborg, så kan ekonomiska besparingar göras, och dessutom kan kontrollen över alla hjulringars skick bli ännu bättre. Spårvagnarna skulle dessutom inte behöva tas in för service, förrän de verkligen behöver detta. Ett lämpligt tillfälle att göra hjulmätningarna, vore då spårvagnarna åker in i sina vagnhallar för nattförvaring.

En annan åtgärd skulle kunna vara att ändra de slitagetoleranser som används idag. Simuleringen visar att dagens toleranser på flänstjockleken ($24 +0,5 / -8$ mm), inte är acceptabla ur räls slitagesynpunkt. Dagens minimivå på 16 mm flänstjocklek ger oacceptabla kontakter på alla radier som understiger R 130 m, oavsett A-mått och spårvidd. Dessutom ger den förstorande värden på anloppsvinkeln α , vilket kan leda till utökad slitage på hjul och räler. Nackdelen med en minskad slitagetolerans, är att toleransen kan bli så pass liten att spårvagnen inte hinner köra så långt, förrän det är dags att reprofileras ännu en gång.

Ytterligare en åtgärd vore att öka koniciteten på hjulen. Detta för att på så vis undvika flänsstyrning, och istället utnyttja hjulparens självstyrningsförmåga. Detta kan göras genom att antingen öka konlutningen på befintliga hjul, eller möjligtvis byta ut nuvarande hjulringsprofil mot exempelvis IFS 330 – 15/66 som har högre konicitet.

6. Slutsatser

- Inga fördelar med en förändring av A-måttet kunde fastslås i utredningen. En ändring av A-måttet skulle även få kostsamma följder i hjul- och rälsslitage.
- En mindre slitagetolerans på hjulflänsen kan minska rälsslitage.
- En ökad konicitet genom antingen en större konlutning eller byte till en hjulringsprofil med högre konicitet, skulle kunna resultera i mindre flänsstyrning. På så vis kan slitaget på rälernas farkanter och flänsar bli mindre.
- En noggrannare kontroll av hjulens skick, i form av lasermätning och höghastighetsfotografering kan resultera i minskat rälsslitage.

Slutkommentar

I detta arbete har endast kvasistatistiska förhållanden använts. För att få en ännu mer noggrann och korrekt utredning, kan kommersiella datorprogram för analys av dynamisk samverkan mellan spårfordon och spår användas. Ett exempel på ett sådant datorprogram är Gensys.

Källor

Litteratur

Andersson E, Berg M, Stichel S (2004). Utdrag ur *Rail vehicle dynamics*. Borlänge: Specialuppl. Nordisk Banteknisk Ingenjörutbildning NBIU 2003-2004 vecka 1 Borlänge/Tällberg

Andersson E, Berg M, Stichel S (2000). *Spårfordons dynamik*. Stockholm: KTH Högskoletryckeri

Dahlquist Hans (2006). *Laser ser när tåget behöver underhåll*, Ny teknik Nr 15-16. Kista: JMS Tidningstryckarna

Eriksson Lars (1997). *Kombinationer av olika räl- och hjulprofiler* (förhandskopia). Göteborg: Göteborgs Spårvägar

Hammarson Martin (2005). *Lämningar från kollektivtrafiken – En cykeltur längs Säröbanan*, Ringlinien 4/2005. Vänersborg: CW Carlssons Tryckeri

Hammarson Stig (2002). *Spårgeometri*, Seminarium för spårvägsprojektörer 2002. Göteborg: Göteborgs Stad Trafikkontoret

Kallander Stefan (2005). *Hjulslitagestudie hos malmvagnar Vid LKAB:s spårnivå under jord – Orsaker och materialanalys*. Luleå: Luleå tekniska universitet (pdf)

Ludema K. C, Blau J P (2002). ASM Handbook Volume 18 (elektroniskt), *Sliding and adhesive wear* Tillgänglig: www.lib.chalmers.se

Tylczak H. J, Oregon A, Blau J. P (2002). ASM Handbook Volume 18 (elektroniskt), *Abrasive wear* Tillgänglig: www.lib.chalmers.se

Orvnäs Anneli (2005). *Simulation of Rail Wear on the Swedish Light Rail Line Tvärbanan*. Stockholm: Universitetsservice US AB

Wengelin A, Berntman M, Lannér G (2000). *Kurskompendium Väg- och Gatuutformning*. Göteborg: Reproservice

Internetkällor

Caldwell Bob (2005). *Implementing an Anti-Shelling Wheel Profile*
www.interfacejournal.com

Care Robert, Clark Steve, Dembosky Mark, Doherty Andy (2005). *Why rails crack*
www.arup.com (hämtat 06-01-30)

Engberg Patrik. *Kollektivtrafik i Göteborg*
web.telia.com/~u31724864/swestart/ (hämtat 06-02-24, hemsidan existerar ej numera)

Hedström Ragnar (2004). *Spårvägens Infrastruktur*
www.vti.se (hämtat 06-03-07)

Magel Eric E (1999). *Optimizing wheel, rail profiles*
www.rtands.com/jul99/optimizing.html (hämtat 06-03-16, hemsidan existerar ej numera)

Smith E. Roy (2006). *Introducing Low-Floor Vehicles into Older Transit Systems*
www.interfacejournal.com (hämtat 06-03-23)

Trafikkontoret Göteborg (2006). *Banstandard*
www.trafikkontoret.goteborg.se/bana (hämtat 06-02-23)

Wheel shelling and spalling research (1989).
www.highbeam.com (hämtat 06-01-30)

Bilagsförteckning

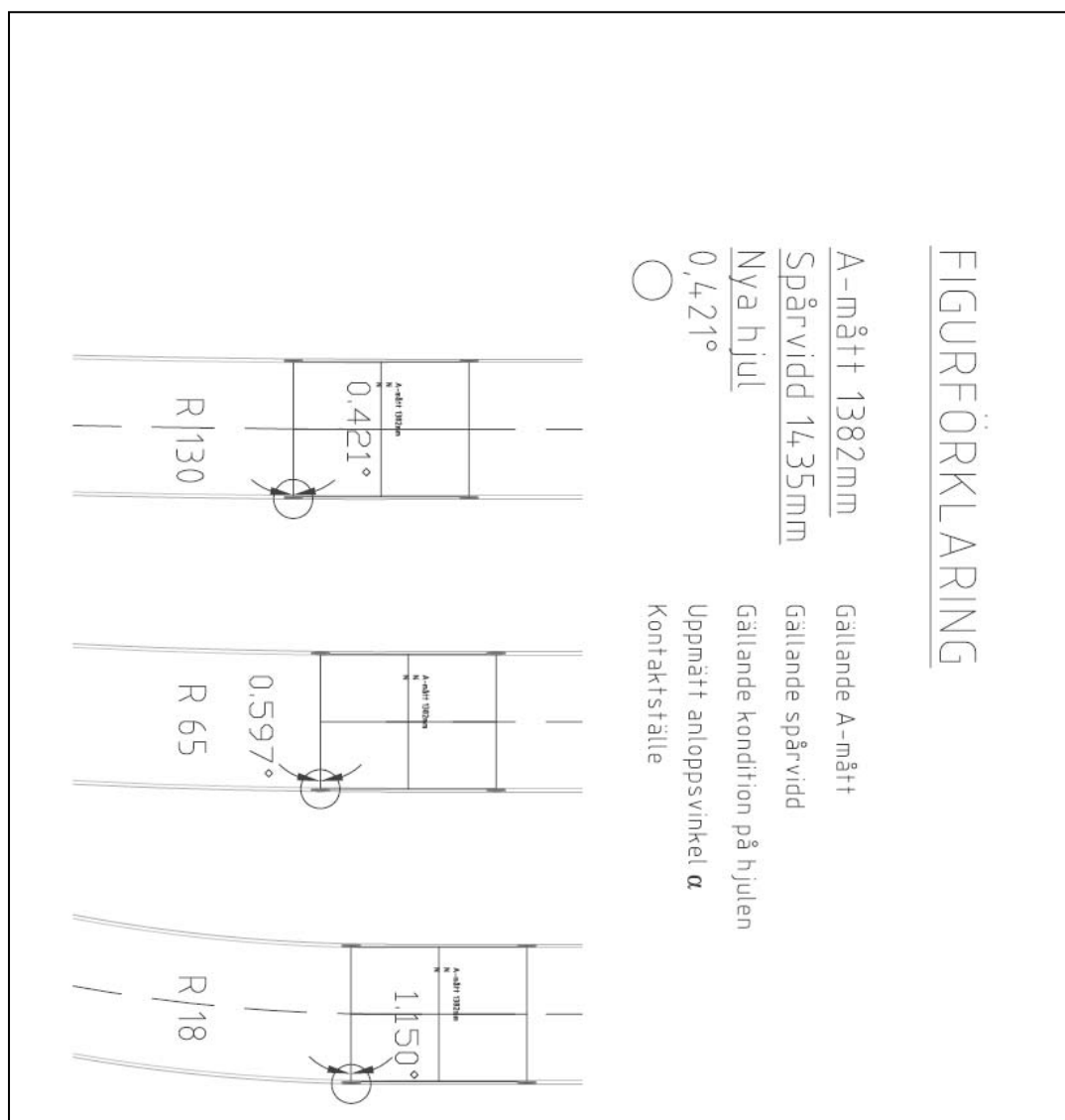
Bilaga 1 Figurförklaring för ritningssimuleringen

Bilaga 2 Resultat av ritningssimuleringen

Bilaga 3 Konicitetsbegränsning

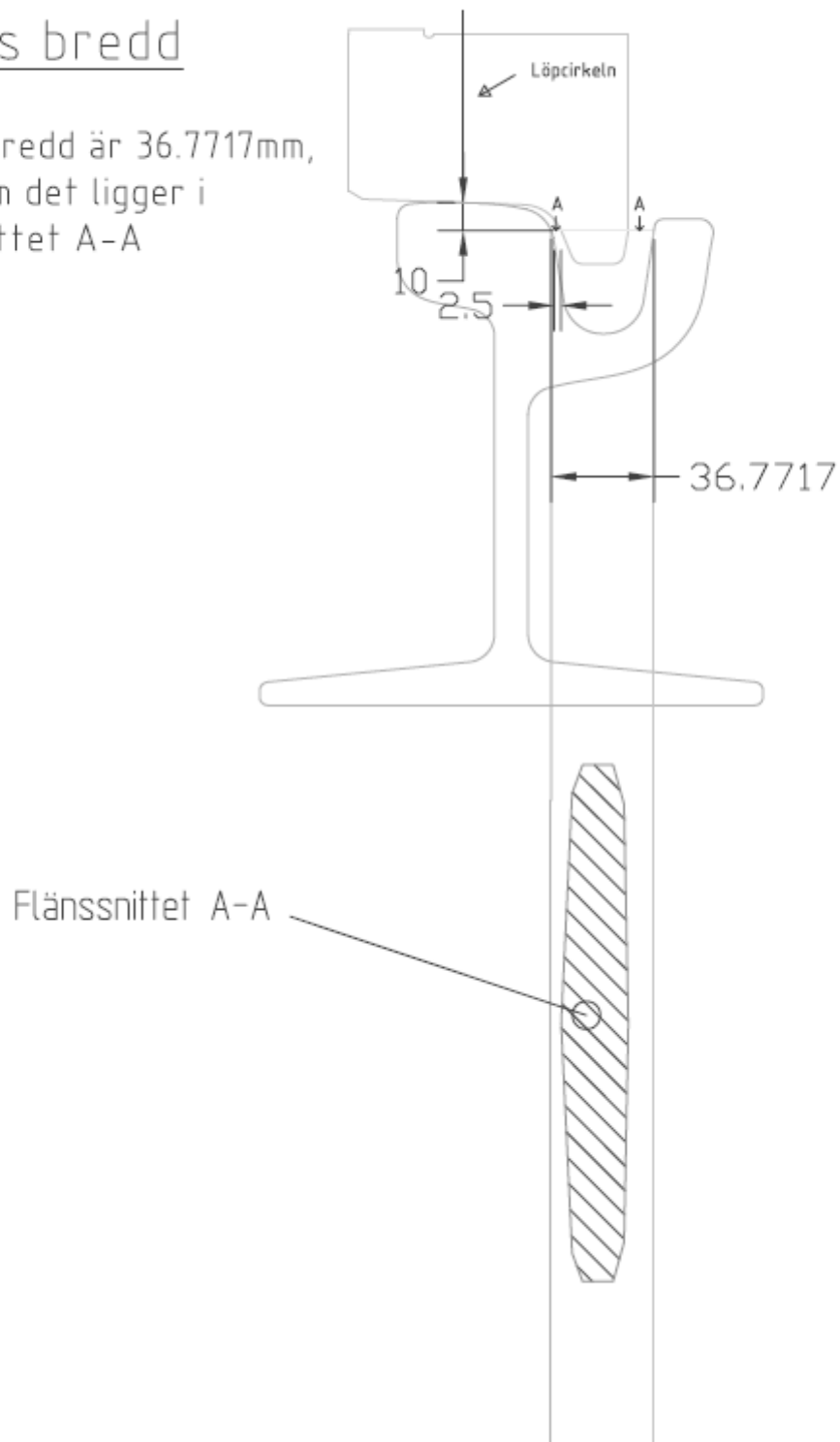
Bilaga 4 Fältundersökning av spårvagnens kurvgång

Figurförklaring för ritningssimuleringen



Rillans bredd

Rillans bredd är 36.7717mm,
eftersom det ligger i
flänssnittet A-A

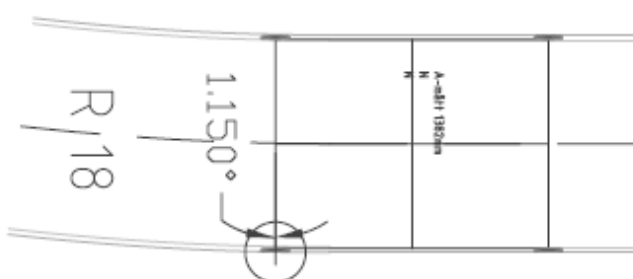
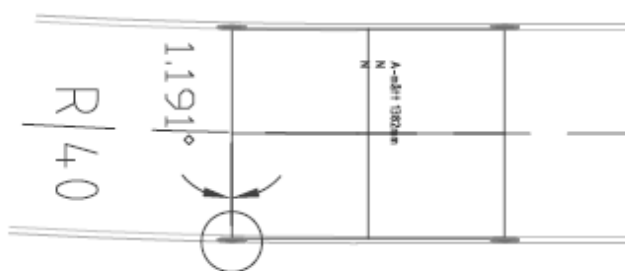
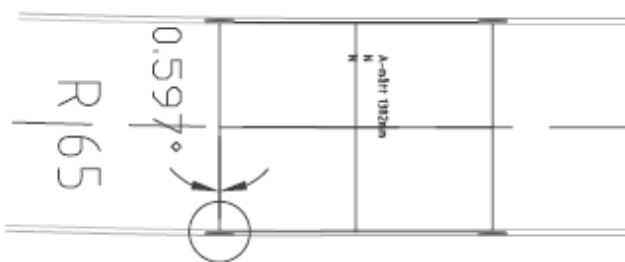
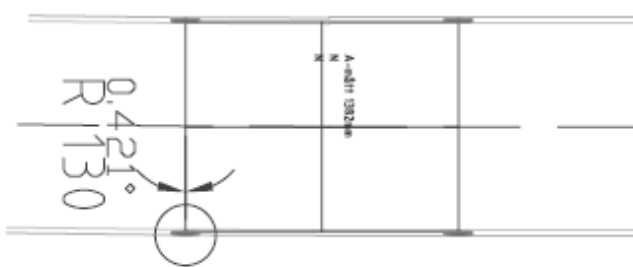


Resultat av ritningssimuleringen

A-mått 1382mm

Spårvidd 1435mm

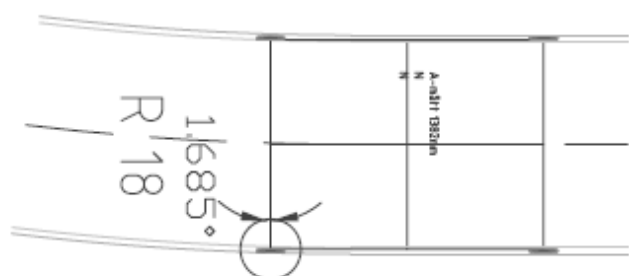
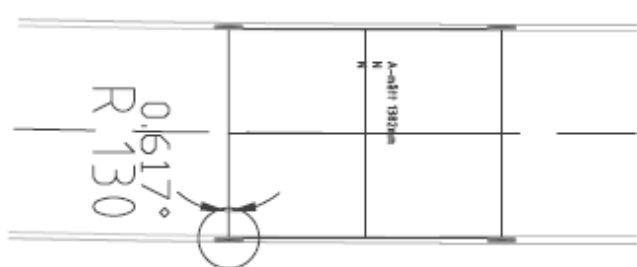
Nya hjul



A-mått 1382mm

Spårvidd 1443mm

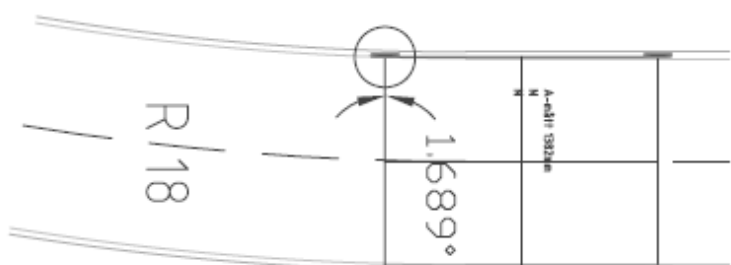
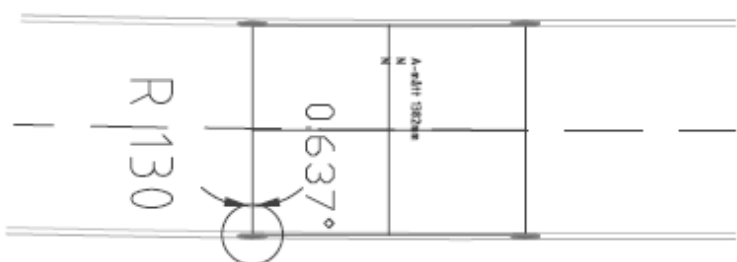
Nya hjul



A-mått 1382mm

Spårvidd 1444mm

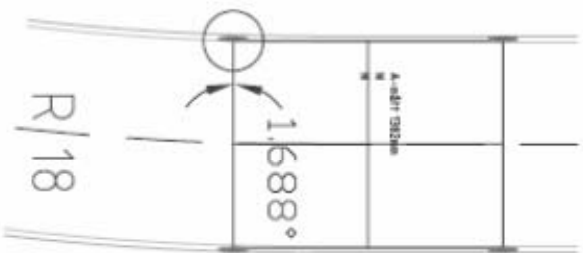
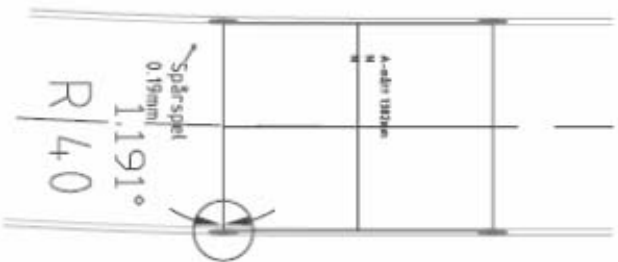
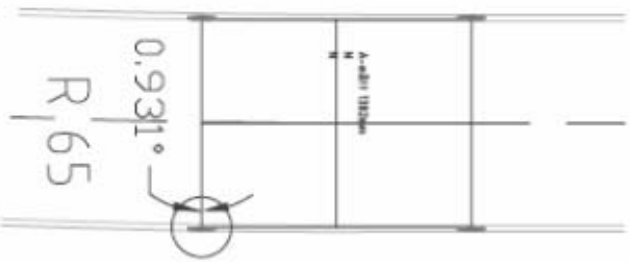
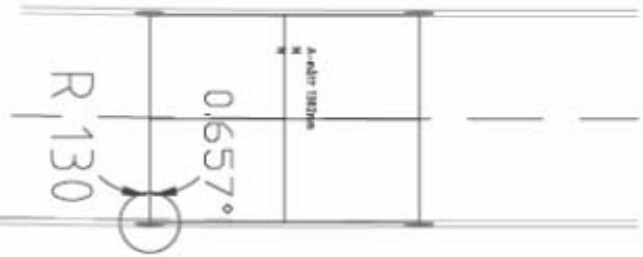
Nya hjul



A-mått 1382mm

Spårvidd 1445mm

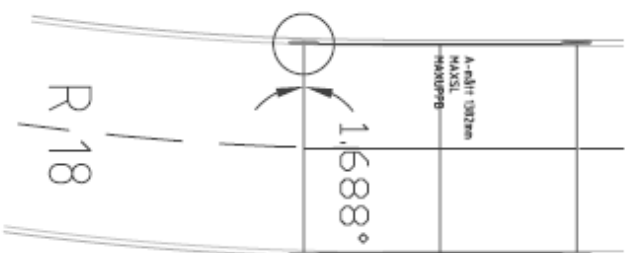
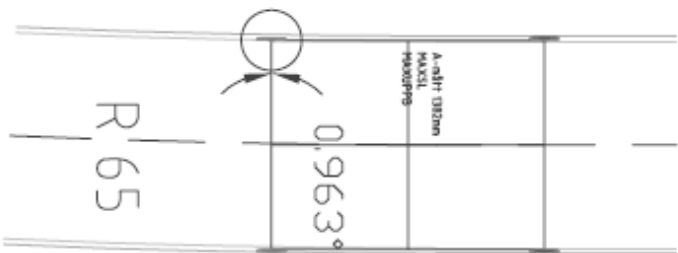
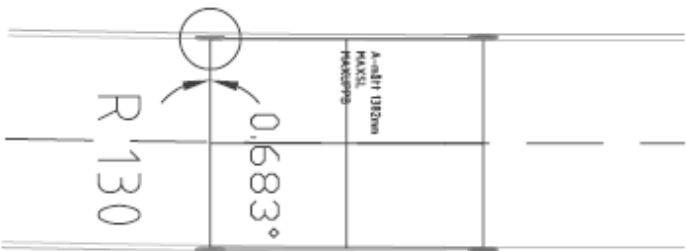
Nya hjul



A-mått 1382mm

Spårvidd 1435mm

Max slitna framhjul



A-mått 1382mm

Spårvidd 1445mm

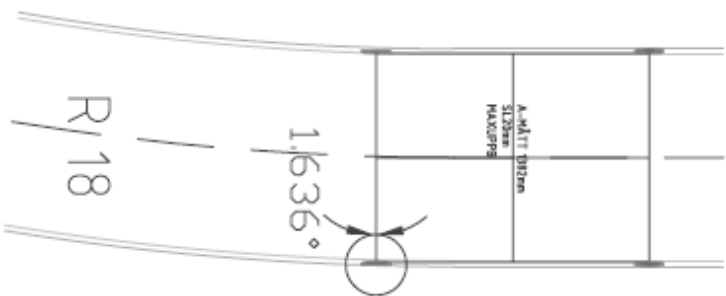
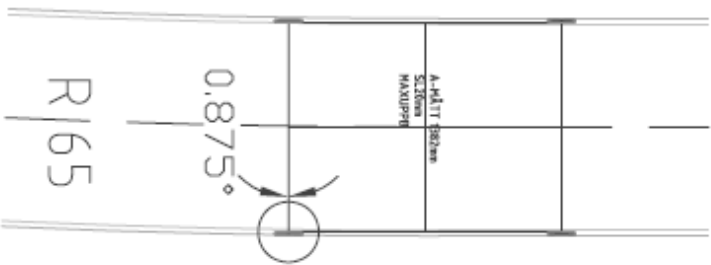
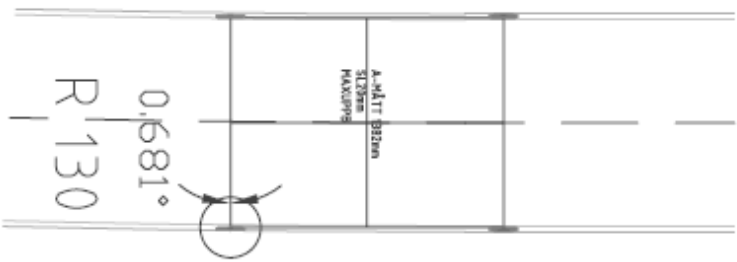
Max slitna framhjul



A-mått 1382mm

Spårvidd 1435mm

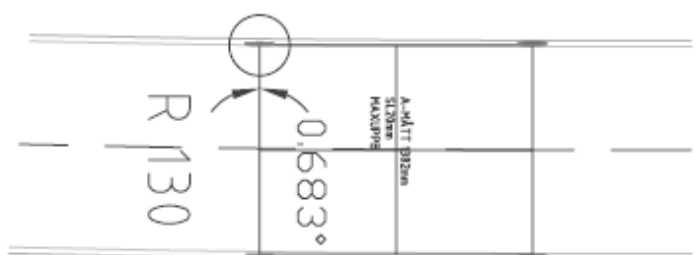
20mm fläns



A-mått 1382mm

Spårvidd 1445mm

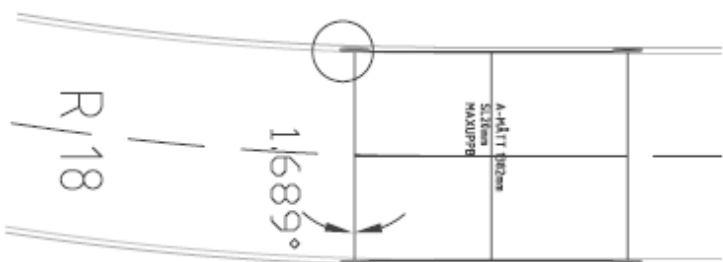
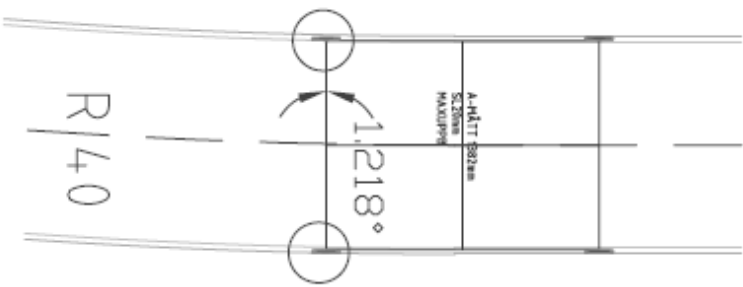
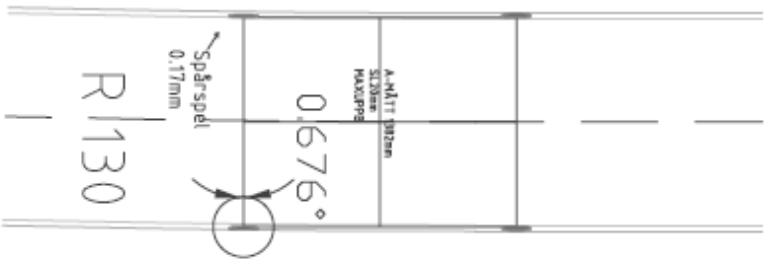
20mm fläns



A-mått 1382mm

Spårvidd 1438mm

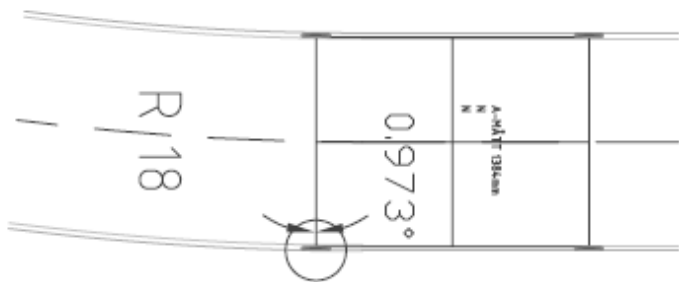
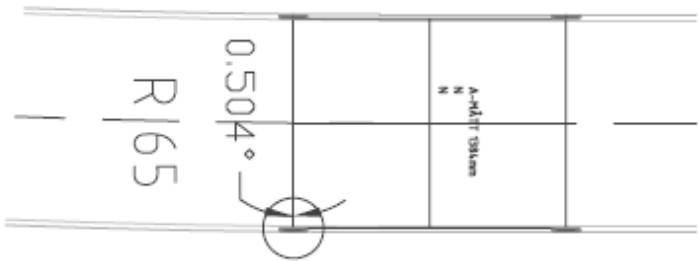
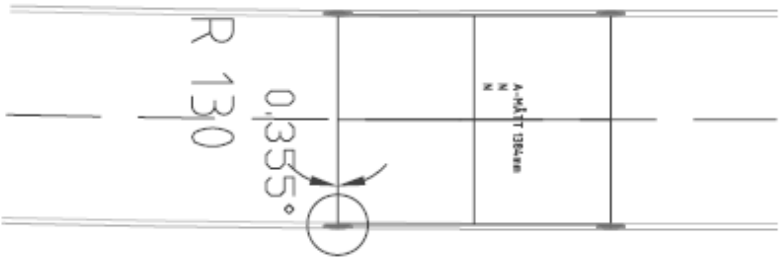
20mm fläns



A-mått 1384 mm

Spårvidd 1435 mm

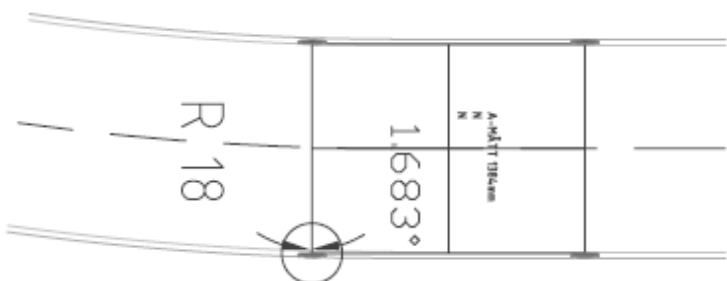
Nya hjul



A-mått 1384mm

Spårvidd 1445mm

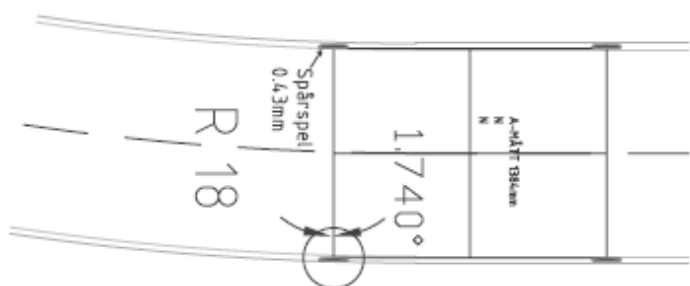
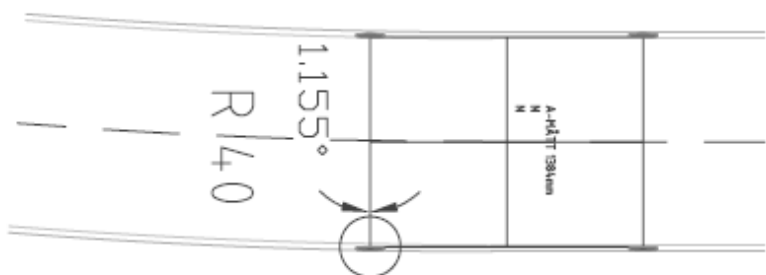
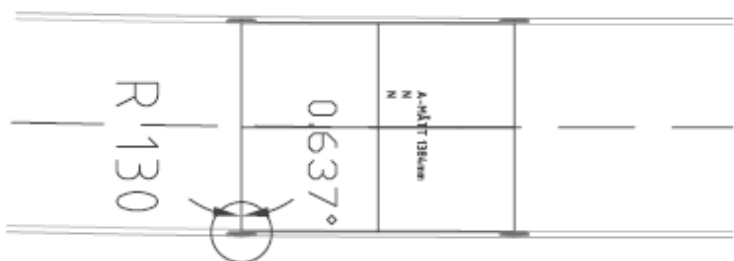
Nya hjul



A-mått 1384mm

Spårvidd 1446mm

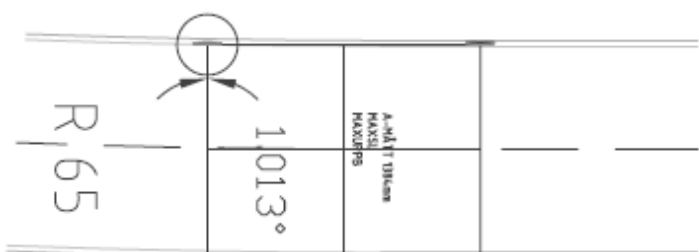
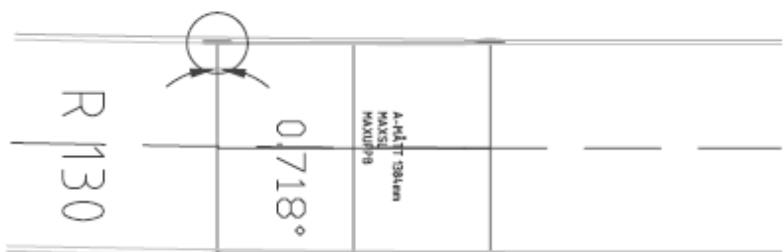
Nya hjul



A-mått 1384mm

Spårvidd 1435mm

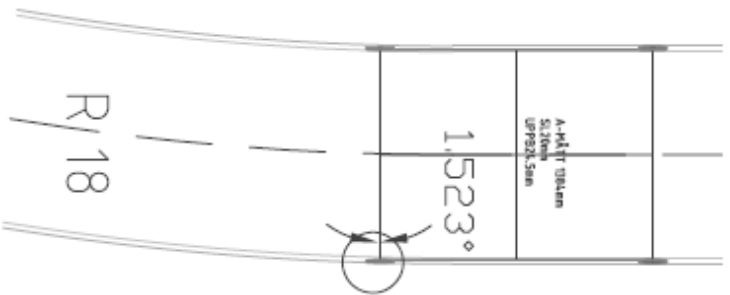
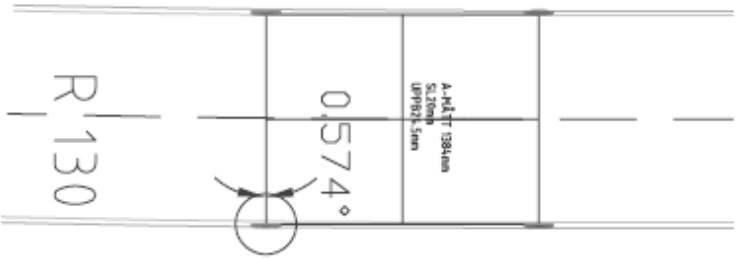
Max slitna framhjul



A-mått 1384mm

Spårvidd 1435mm

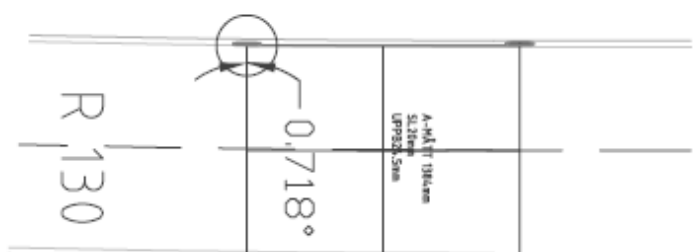
20mm fläns



A-mått 1384mm

Spårvidd 1445mm

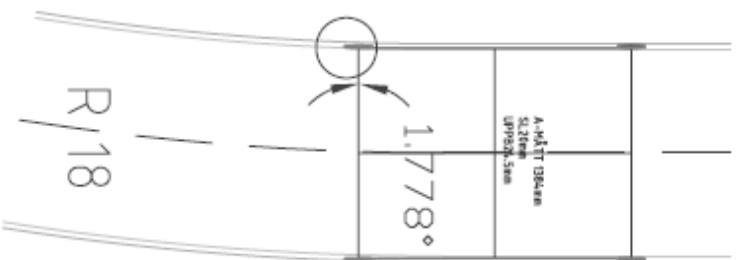
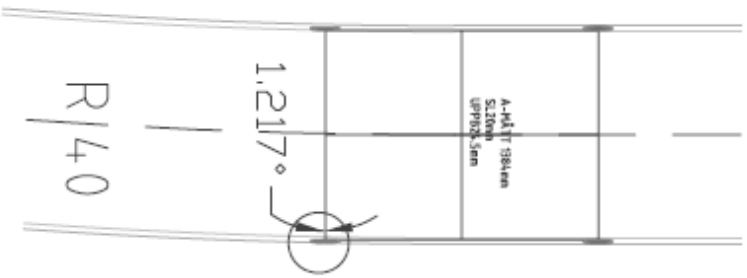
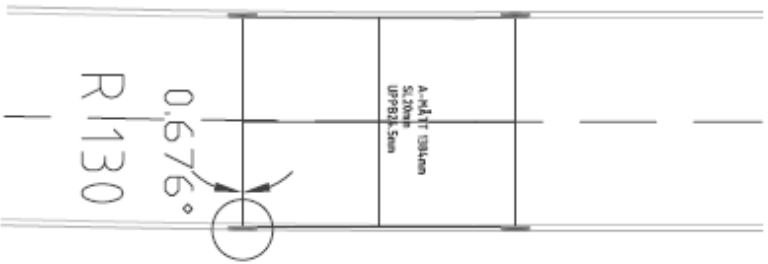
20mm fläns



A-mått 1384mm

Spårvidd 1440mm

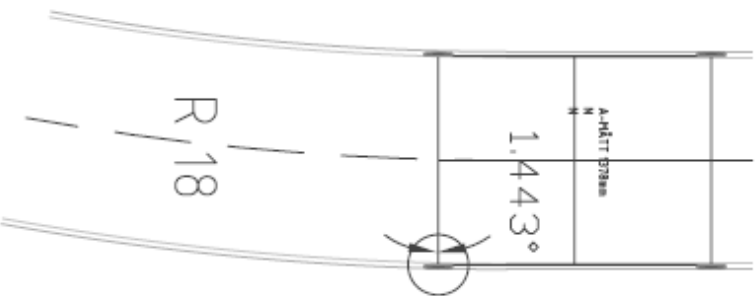
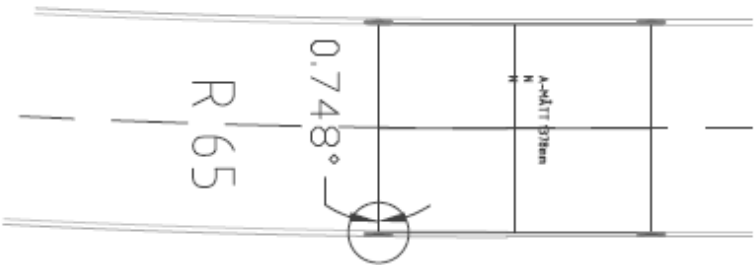
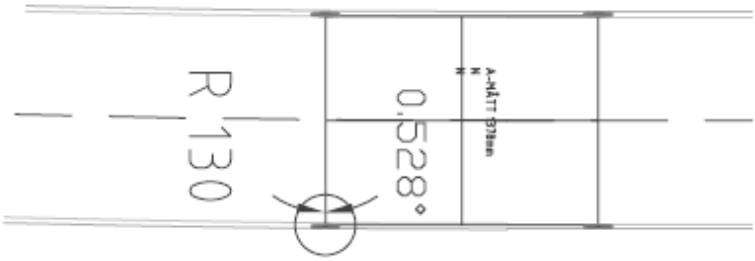
20mm fläns



A-mått 1378mm

Spårvidd 1435mm

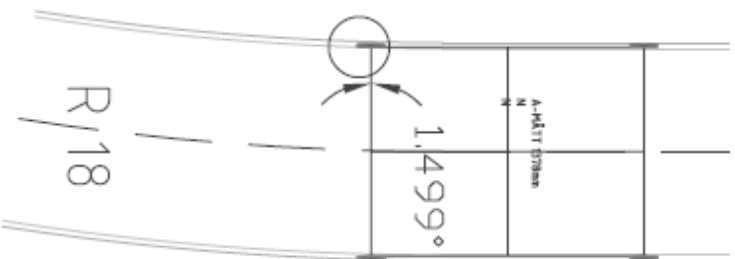
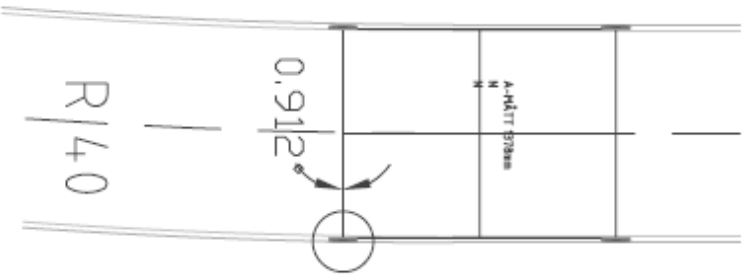
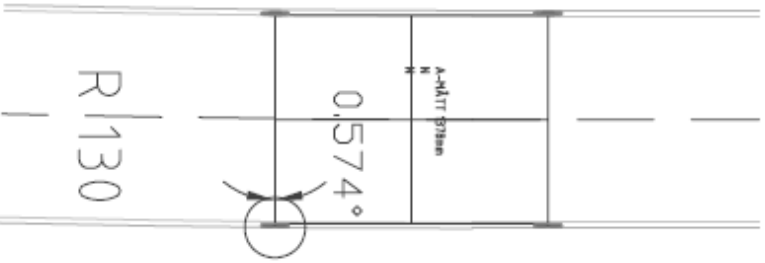
Nya hjul



A-mått 1378mm

Spårvidd 1437mm

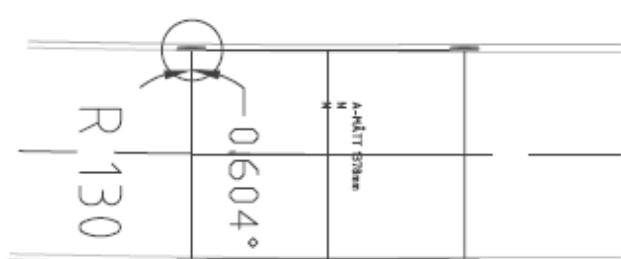
Nya hjul



A-mått 1378mm

Spårvidd 1445mm

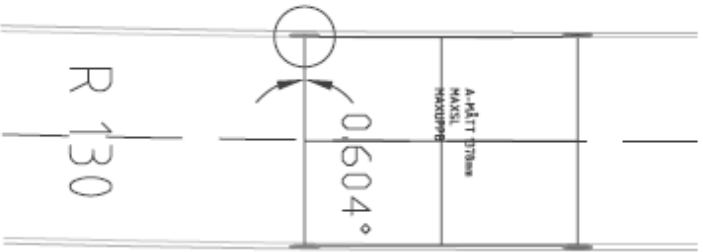
Nya hjul



A-mått 1378mm

Spårvidd 1435mm

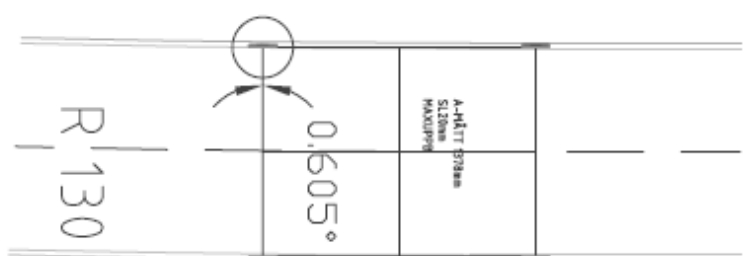
Max slitna framhjul



A-mått 1384mm

Spårvidd 1435mm

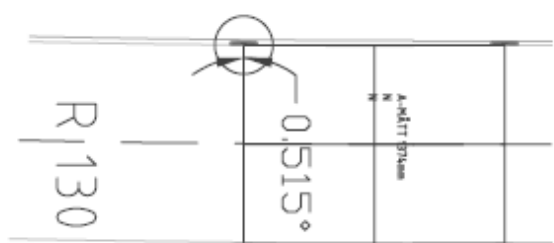
20mm fläns



A-mått 1374mm

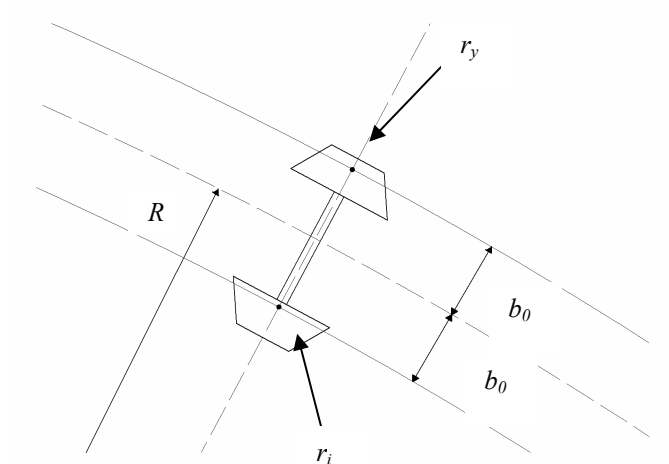
Spårvidd 1435mm

Nya hjul



Konicitetsbegränsning

Då R_{\min} framräknades användes en formel hämtad ur boken Spårfordons dynamik (Andersson, Berg, Stichel 2000. s. 7:24-7:25)



Formeln lyder:

$$\Delta y = \frac{r_0}{\gamma_0} \cdot \frac{b_0}{R} \quad \text{men omvandlas till}$$

$$\Delta y_{\max} = \frac{r_0}{\gamma_0} \cdot \frac{b_0}{R_{\min}}$$

$r_0 = 0,340$ m (radien på ett spårvagnshjul)

$\gamma_0 = 0,029$ (konvinkeln 1:35 på GS-hjul)

$b_0 = 0,75$ m (halva avståndet mellan löpcirklarna)

$\Delta y_{\max} = 0,035$ m (avståndet mellan löpcirkeln och nominella flänskontaktpunkten)

En omkastning av formeln ger:

$$R_{\min} = \frac{r_0}{\gamma_0} \cdot \frac{b_0}{\Delta y_{\max}}$$

$$R_{\min} = \frac{0,340}{0,029} \cdot \frac{0,75}{0,035}$$

$$R_{\min} = \underline{\underline{251,2}} \text{ m}$$

Fältundersökning av spårvagnens kurvgång

Undersökningsplats: Åkareplatsen (kurvan på Stampgatan mot Drottningtorget)

Hypotes

I alla kurvor med radie mindre än 251,2 m förekommer det flänsstyrning. Flänsstyrningen orsakar nötning på farkanten och flänsen på gaturäler

Syfte

Kartlägga spårvagnsboggiernas kurvgång. Förekommer studs, hackning eller åker de jämnt genom kurvan?

Underlag och förarbeten

Ritningar över valda platser (kurvradier, korgbågar eller klotoider, rälsålder, tidigare påläggssvetsning?)

Statistik (trafikbelastning, passagerarantal)

Tidtabeller (tid mellan spårvagnarna)

Metod

Spraymarkering

Spraymarkering

Sliten, eller misstänkt farkant och fläns på räl, markeras med markeringspray. En spårvagn passerar markeringen med vanligt körbeteende (med andra ord föraren får inte distraheras av fartsänkningsåtgärder, såsom sänkt hastighet eller order från övervakare). Markeringen nöts bort, och avslöjar kontaktmönster mellan hjul och räl.

Syfte: Ta reda på var och hur spårvagnarna får kontakt med rälen, för vidare arbete
Kartlägga nötningsskillnader mellan M28/29 och M31
Undersöka hastighetens och förarens inverkan på slitage

Utrustning

Markeringspray med olika färger

Säkerhets- och skyddsutrustning

Personal

1 eller 2 mätare/markerare

1 observatör

Rapport kurvtest i Åkareplatsen

2006-04-03

Förutsättningar

- Det var smådisigt väder, men inget regn.
- Spårvagnarnas körhastighet var normal, eftersom TLX* gick ut med ett meddelande om att vi genomförde ett test, och att de uppmanades att köra på så normalt som möjligt. Dessutom fanns det ett stoppljus som de alltid tog hänsyn till.
- Sommaren – hösten 2005, gjordes det påläggssvetsning på rälerna.



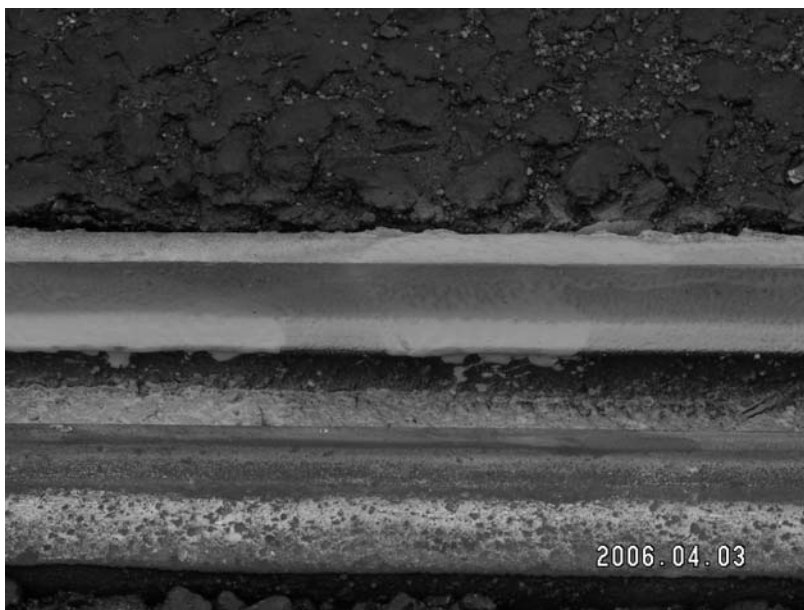
Figur 1 Påläggsvetsad farkant. Observera metallspånen i rillan!

Händelser och observationer

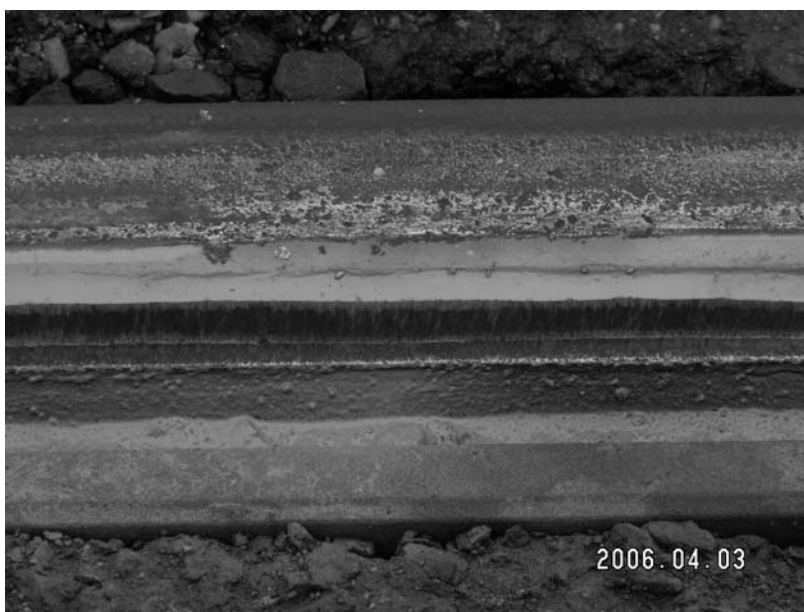
P.g.a den nyligen gjorda påläggssvetsningen så förekom det ingen färgavslitning på innerrälens fläns. Dessutom var den sliten från början, så även fast vagnarna normalt inte kör optimalt p.g.a slitna hjulflänsar så skulle det inte ha syntts ändå.

Ingen synlig hackning eller färgavslitning som skulle indikera hackning förekom. Hjulen rullade igenom kurvan, med främsta kontakten på tänkt farkant. Det förekom dock i vissa fall kontakt på motstående farkant.

* TLX är trafikledningscentralen för kollektivtrafiken i Göteborg



Figur 2 Innerrälens fläns. Sliten, men nu orörd



Figur 3 Farkant med bortsliten färg

Observationer om att spårvagn M31 skulle slita mer annorlunda jämfört med spårvagn M28 eller M29 gjordes. Det märktes ingen skillnad.

Metallspån från rälerne kunde ses i rillorna.

Slutsatser

- Påläggsvetsning är en effektiv åtgärd för att styra slitaget på rälsen.
- Eftersom båda farkanterna slets vid några tillfällen, så borde det innebära att snedställda boggier existerar.