



Järnvägsgruppen

Nya stambanor till lägre kostnader

Evert Andersson, Mats Berg, Sebastian Stichel



KTH Railway Group
Publication 16-01

ISBN 978-91-7729-039-1

Stockholm, 25 maj 2016

Innehåll	Sida
Sammanfattning och slutsatser	3
Summary and conclusions	5
1. Inledning och bakgrund	7
2. Hög hastighet i omvärlden – anläggningskostnader	10
3. Banans teknik	12
4. Hur bra spår behövs – och vad klarar moderna spår?	19
5. Fixerat spår eller ballastspår?	32
6. Flexibel bangeometri och hastighet	40
7. Kostnader och teknikval – slutsatser	45
Referenser	48
Bilaga 1: Anläggningskostnader europeiska höghastighetsbanor	
Bilaga 2: Normer för spårläge	

Termer och förkortningar

EN = Europanorm

GT = Gröna Tåget

ICE = Tyskt höghastighetståg

Sth = Största tillåtna hastighet

TDOK = Trafikverkets normerande dokument

TGV = Franskt höghastighetståg

TRV = Trafikverket

TSI/TSD = Technical Specifications for Interoperability / Driftskompatibilitet

Sammanfattning och slutsatser

Sveriges nya stambanor för höga hastigheter planeras för korridorerna Stockholm–Linköping–Jönköping–Malmö och Stockholm–Jönköping–Göteborg. Sträckan Stockholm–Jönköping är gemensam för de båda. De nybyggda delarna (exkl. befintliga delar närmast ändpunkterna) omfattar c:a 720 km, något beroende på den sträckning som slutligen kommer att väljas. Totala längden trafikspår uppgår till c:a 1500 km. Banorna byggs för hastigheter av 320 km/h.

Kostnaden har tidigare beräknats till mellan 140 och 170 Mdr kronor. I en rapport till den s.k. Sverigeförhandlingen i december 2015 lämnade Trafikverket en ny uppskattning av anläggningskostnaderna på mellan 190 och 320 miljarder kr för huvudalternativet, inom ett sannolikhetsintervall på mellan 15 och 85 %. Osäkerheten är alltså mycket stor. Medelvärdet 255 Mdr kr motsvarar 355 miljoner kr per km dubbelspår (ban-km).

Europeiska banor för hastigheter på minst 300 km/h och som färdigställda 2006 till 2016 har en genomsnittlig anläggningskostnad av c:a 230 miljoner kr per ban-km. Frankrike och Spanien har kostnader på c:a 200 miljoner kr per ban-km, medan Tyskland och Italien ligger c:a 50–65 % högre. *Med kostnader motsvarande Frankrike och Spanien skulle det svenska projektet kosta c:a 145 Mdr kr, medan kostnader enligt europeiskt genomsnitt skulle ge c:a 165 Mdr kr.*

Anledningen till kostnadsökningen uppges av Trafikverket vara (1) att kraven på tillåten sättnings i spåret har skärpts, vilket hör samman med kravet på s.k. fixerat spår; (2) ökade krav på bullerskydd; (3) ökad andel tunnlar och broar, vilket hör ihop med linjeföringen (kurvradierna); (4) krav på sidospår i stationslägen och (5) att den elektriska kraftförsörjningen utanför järnvägen nu ingår i kostnadskalkylen. De tre första punkterna utgör enligt Trafikverket c:a 80 % av den antagna kostnadsökningen.

Fixerat spår eller ballastspår?

I detta arbete granskas nödvändigheten av s.k. *fixerat spår*, d.v.s. ett tekniskt utförande där rälererna monteras på ett lägesfixerat betongdäck. Fixerade spår har *små geometriska justeringsmöjligheter* när det är färdigbyggt och fixerat, i förhållande till de sättnings- och andra rörelser som kan uppkomma i en icke stabiliserad banunderbyggnad. Banunderbyggnaden måste därför vara mycket stabil över banans livslängd. Konventionella ballastspår kan däremot lägesjusteras vid behov, genom riktning och tidvis påfyllning av ny ballast.

Starkt ökade krav på *banunderbyggnadens långsiktiga stabilitet* medför sannolikt *kraftigt ökade anläggningskostnader* för fixerade spår. På inte helt fasta jordarter måste grundläggningen oftast föras ner till fast berg. En översiktlig beräkning visar på *extra kostnader för stabil grundläggning på storleksordningen 65 Mdr kr* för hela systemet.

Även den fixerade banöverbyggnaden, d.v.s. betongdäcket med uppläggning och räler, är något dyrare i anläggning än ett ballastspår. Denna merkostnad är förhållandevis liten och skulle kunna motiveras av lägre livstidskostnader för kontinuerligt underhåll och periodisk spårförnyelse, förutsatt att spåret verkligen ligger stabilt under hela dess livslängd. Nuvärdet av *de lägre underhållskostnaderna kan inte tillnärmelsevis kompensera de ökade grundläggingskostnaderna.*

I långa *bergstunnlar och bergskärningar* kan fixerat spår vara *ekonomiskt fördelaktigt*, eftersom underlaget där är stabilt. Olika typer av spår kan då få variera längs banan.

Anledningen till att fixerat spår förts på tal, och i Trafikverkets tekniska systemstandard hittills angetts som normalt utförande, är en förmodan att det med ballastspår blir svårt att underhålla en tillräckligt god geometrisk standard på spåret, s.k. spåräge. Vår undersökning visar att *moderna ballastspår högst sannolikt kan uppfylla de krav som ställs beträffande*

spårläget i hastigheter upp till åtminstone 320 km/h. En viss ökning av insatserna för spårlägeskontroll och punktvis justering kan behövas jämfört med tågtrafik i lägre hastigheter.

Ballastspår kommer också, rätt utförda, att uppfylla krav på termisk stabilitet. De kommer med stor sannolikhet inte att ge upphov till s.k. stensprut, förutsatt att ballastens övre nivå ligger 3–4 cm under sliprarnas överkant. Detta är rutin sedan länge. Ballastspår väntas ge mindre behov av bullerskydd, både gentemot omgivningen och i tågen. Det är möjligt att ändra spårgeometrin i ballastspår, t.ex. att ändra rälsförhöjningen (spårets dosering i kurvorna) i samband med framtida hastighetsändringar.

Frankrike, Spanien och Italien använder ballastspår i hastighetsområdet 300–320 km/h.

Detta arbete visar också att *moderna höghastighetståg väntas ge förhållandevis låga påkänningar i spåret*, jämfört med tillåtna gränsvärden och i förhållande till vad tunga tåg i lägre hastigheter ger. Det gör att försämringen av spårets kvalitet väntas ske långsammare än om spåret skulle trafikeras även av tunga lokdragna tåg. Vidare, kraven på spårläge är inte exceptionellt höga enligt de normer som utarbetats inom Europa. Vårt arbete visar också att komforten i tåget blir bra med hänsyn till skakningar och vibrationer.

Flexibel bangeometri och hastighet

En ytterligare möjlighet att minska kostnaderna – oberoende av typen av spår – är att göra en optimering av bangeometri och hastighet. Hittillsvarande specifikationer säger att banan ska dimensioneras och byggas för 320 km/h, vilket förutsätts gälla nästan överallt. Det leder till en förhållandevis stel linjeföring i termer av kurvradier, framför allt horisontellt, men i viss mån även vertikalt. Det blir ibland svårt att manövrera i topografin, mellan höjder och vattendrag, i bebyggelse och värdefulla naturområden och mot annan infrastruktur. Resultatet av detta blir ofta tunnlar eller broar och olika krav på fördyrande anpassningar.

Om man tillåter lokala hastighetsnedsättningar till 300 km/h, i några fall möjligen 280 km/h, kan man tillfälligt över kritiska partier tillåta mindre horisontella kurvradier: Man har då lättare av manövrera kring olika hinder. *Enkelt uttryckt: ibland kan man köra runt berget än rakt igenom det.* Istället för att som hittills planera för kurvradier på 5000–6300 m skulle man kunna planera för 4700 m som normalvärde och 3000–3600 m som minimum. Det leder sannolikt till mindre antal tunnlar och broar och mindre fördyrande anpassningar i övrigt. Ett tiotal sådana hastighetsnedsättningar kan leda till förlängning av restiden med 2–3 minuter för de snabbaste tågen; de något långsammare regionaltågen kommer inte att påverkas alls. Detta kan genomföras om kostnadsbesparingarna är betydande. I övrigt bör tidigare specifikationer beträffande bangeometri och hastighet behållas.

Det är inte möjligt att enkelt fastställa hur stora besparingarna kan bli. Varje enskilt fall måste bedömas och beräknas i detalj med de lokala förutsättningar som råder just där. En överslagsmässig kalkyl med en enligt vår uppfattning rimliga antaganden visar på möjliga besparingar i storleksordningen 15 Mdr kronor för hela det planerade systemet.

För att minska kostnaden jämfört med Trafikverkets skattningar, föreslås att konventionellt ballastspår används på större delen av sträckan istället för fixerat spår som kräver mycket stabil grundläggning. Vidare bör linjeföringen och hastigheten kunna bli mera flexibel för att lättare komma förbi olika hinder. Detta ger endast 2–3 minuters tidsförlust för de snabbaste direktgående tågen medan regionaltågen inte påverkas.

Sammantaget uppskattas kostnaderna för de nya stambanorna till 160–190 Mdr kronor, vilket motsvarar en kostnad per ban-km något högre än det europeiska genomsnittet.

Summary and conclusions

The new railway mainlines for high speed in Sweden are planned for the corridors Stockholm–Linköping–Jönköping–Malmö and Stockholm–Jönköping–Göteborg. The part Stockholm–Jönköping is common for the two lines. The new constructions comprise about 720 line-km and about 1500 track-km. The mainlines are designed for train speeds of 320 km/h.

The cost has earlier been calculated as 140 to 170 billion SEK. In a report to the so-called Sverigeförhandlingen in December 2015, Trafikverket provided a new cost estimate of 190 to 320 billion SEK (in the probability interval of 15 to 85 %). Thus the uncertainty is significant. The average estimated cost is 255 billion SEK, corresponding to 355 million SEK per km of double-track (per line-km).

European railway lines for speeds of at least 300 km/h and being completed 2006 to 2016 have an average cost of about 230 million SEK per line-km. In France and Spain the cost is about 200 million SEK per line-km, whereas the cost in Germany and Italy is about 50-65 % higher. With costs corresponding to France and Spain the Swedish railway project should cost about 145 billion SEK, whereas the European average cost should give about 165 billion SEK.

The reasons for the cost increase are specified by Trafikverket as (1) increased requirements on permissible track settlement, which is linked to the request for slab track; (2) increased demands on noise abatement; (3) increased share of tunnels and bridges, which is associated with the track design geometry (curve radii); (4) requirements on sidings at stations and (5) that the electric power supply beyond the railway system is included in the cost calculation. According to Trafikverket, the first three items comprise about 80 % of the cost increase.

Slab track or ballast track?

In the present study the claimed need for slab track, i.e. a design where the rails are mounted on concrete slabs, is investigated. Slab tracks have limited possibilities to adjust the rail positions once these tracks are installed, as compared to the settlement and other motions which might appear in non-stabilized track substructures. These substructures therefore have to be very stable during the life of the track. In contrast, conventional ballast tracks can be re-positioned at demand through tamping and possible ballast refill.

Significantly increased requirement on the long-term stability of the track substructure results likely in a significant cost increase for the slab track system. On not fully stable soils the support has to be provided down to solid rock. An approximate calculation shows that the extra cost for stable track support is in the area of 65 billion SEK for the entire system.

Also the slab track, with concrete slabs and rails, is somewhat more expensive than the construction of the superstructure of ballast track. This additional cost is fairly low and may be motivated by lower maintenance and renewal cost, provided that the track really is resting on solid ground during its life. The present value of the lower maintenance cost is not at all compensating for the increased investment cost for ground reinforcement.

In long rock tunnels and rock cuttings, slab track can be economically viable since the support is solid. In this way, the track designs may vary along the railway lines.

Trafikverket's current choice to focus on slab track in its Technical System Standard, is based on the assumption that it would be hard to maintain a sufficient track geometry quality for ballast track. Our investigation shows that modern ballast track should most likely comply with the requirements on track quality (limited irregularities) for speeds up to at least 320 km/h. A certain increase of track quality control and tamping is foreseen as compared with tracks for traffic of lower speed.

Properly installed ballast track would also fulfil requirement on thermal stability. Also it is unlikely that flying ballast will be an issue, provided the ballast stones are located under a level at 3-4 cm below the sleeper top surface (this is common practice today). Regarding noise, both train interior and exterior, a ballast track should be less demanding with respect to the need for noise abatement. Moreover, it is fairly simple to change the track cant (superelevation) in curves in connection with future changes of train speed.

France, Spain and Italy use ballast track for traffic of 300-320 km/h.

The present study also shows that modern high-speed trains are expected to only give limited impact (stresses) in the track, as compared to limit values and in comparison to the impact caused by heavier trains at lower speed. In this way the track deterioration rate is expected to be lower than for traffic by heavy loco-hauled trains. In addition, the European standards on track geometry quality are not exceptionally demanding. Also, our work shows that the train ride comfort will be good.

Flexible track design geometry and speed

An additional possibility to reduce the cost – independent of the type of track design – is to optimise the track design geometry and train speed. Current specifications say that the railway lines are to be designed and constructed for 320 km/h, which is assumed to apply for virtually all parts of the lines. This results in a fairly rigid line geometry in terms of curve radii, in particular horizontally but to some extent also vertically. In turn such a line geometry is hard to negotiate in the topography, between hills and valleys, in urban areas and in sensitive nature areas, and together with other infrastructures. In this way, additional tunnels and bridges are often needed as well as other costly adaptations.

If local speed reductions are introduced, to 300 km/h or sometimes 280 km/h, demanding parts of the railway lines can be designed for smaller horizontal curve radii. In this way such parts of the lines can more easily adapt to the surroundings. Instead of the current track design for curve radii of 5000–6300 m, a nominal radius minimum of 4700 m and an absolute minimum of 3000–3600 m could be used. This would likely result in fewer tunnels and bridges etc. For about 10 speed reductions like this, the travel time would be about 2-3 minutes longer for the fastest trains whereas regional trains will not be affected at all. This curve geometry and speed optimisation should be applied if significant cost savings are foreseen. Otherwise the current specifications should be used.

It is not possible to easily determine how big the cost savings could be. Every single case has to be investigated in detail with its unique conditions. An approximate calculation with, according to us, reasonable assumptions results in possible savings of about 15 billion SEK for the entire system.

To reduce the cost as compared to Trafikverket's estimates, conventional ballast track is suggested for most of the parts of the new mainlines instead of slab track requiring very stable ground support. Also the track design geometry and speed should be more flexible to ease the negotiation of demanding topography etc, only giving 2–3 minutes of extended travel time for the fastest trains and not affecting the regional trains.

In conclusion the cost for the new railway mainlines is estimated to 160–190 billion SEK, which corresponds to a cost per line-km slightly above the European average.

1. Inledning och bakgrund

Trafik med höghastighetståg har stora inneboende möjligheter och fördelar för samhällets utveckling. Den binder samman våra regioner och bidrar till vidgade arbetsmarknader. Den bidrar till att långsiktigt få ett hållbart transportsystem.

- Det handlar inte primärt om att köra tåg med hög hastighet, utan om att få *konkurrenskraftiga restider*. Det handlar om att få en *ökad kapacitet* i järnvägs-systemet för både personer och gods. Det handlar också om att *modernisera systemet* och komplettera våra nuvarande stambanor som i grunden är 150 år gamla.

Sedan Japan år 1964 öppnade sin första bana för höghastighetståg har många efterföljare tillkommit. Frankrike, Japan, Kina och Spanien har nu omfattande dedicerade järnvägsnät för snabba resandetåg. Tåg för topphastigheter på 250–360 km/h finns även i Tyskland, Italien, Belgien, Ryssland, Turkiet, Sydkorea och Taiwan. Byggnad och långt framskridna planer finns bl.a. i Brasilien, Indien, Marocko, Polen, Saudiarabien och USA. I ytterligare ett stort antal länder pågår utredningar i mer eller mindre framskridet stadium.

- *Nästan alla världens ledande ekonomier har redan, eller har planer på, höghastighetsjärnväg.*

I EU:s vitbok (2011) [1] om framtidens transporter sägs att 2050 bör majoriteten av resandet på medeldistans ske med tåg. Detta ställer mycket stora krav på järnvägens utveckling, både med hänsyn till järnvägens *kapacitet* och med hänsyn till förmågan att vara *attraktiv* för en ökad andel medborgare och godstransportörer. Enligt EU:s vitbok bör Europa tredubbla sitt nät av snabba järnvägar fram till 2030. År 2050 ska nätet av höghastighetsjärnvägar vara komplett. Detta ger förutsättningar för att öka både den snabba persontrafiken och ge plats för den lika viktiga men långsammare godstrafiken. Avsikten är att för unionens välfärd utveckla och upprätthålla en hög mobilitet för personer och gods på ett långsiktigt hållbart sätt med hänsyn till resursförbrukning och miljöbelastning [2]. Förutom de direkta fördelarna av kortare res- och transporttider, ger ökad hastighet också betydande *produktivitetsvinster* och lägre kostnader i tågdriften, räknat per utförd person-km.

Trots finanskrisen fortsätter många ekonomiskt tyngda länder sina järnvägssatsningar. Det gäller till exempel Spanien, Italien och Japan. Även i amerikanska Kalifornien, en ekonomiskt trängd delstat, har senaten godkänt en långsiktig utbyggnad. I Kina, det land som har mest långtgående ambitioner, motiveras utbyggnaden av att öka tillväxten och att bidra till ett långsiktigt hållbart transportsystem.

I Sverige har planeringen av de första järnvägarna för hög hastighet – våra nya stambanor – pågått en tid. En statlig utredning (SOU 2009:74) blev klar 2009 [3]. Det gäller nya banor i korridoren Stockholm–Jönköping–Malmö(–Köpenhamn) med anslutning Jönköping–Göteborg. Den sammanlagda linjelängden (exkl. anslutning till Köpenhamn) blir c:a 780 km. De nybyggda delarna får en total längd på c:a 720 km, något dock beroende av den linjesträckning som slutligen väljs. Banan är tänkt att i sina huvuddelar byggas för en största tillåten hastighet (Sth) av 320 km/h. Det ska medge en restid för de direktgående tågen (utan uppehåll) på 2 tim 30 min Stockholm–Malmö och 2 timmar jämnt Stockholm–Göteborg. Den lika viktiga regionala trafiken som berör de mellanliggande orterna får också betydande – ibland drastiska – förbättringar i restid jämfört med nuläget.

I Trafikverkets rekommendation om kurvradier m.m. [4, 5] finns en delvis uttalad önskan om att i framtiden kunna öka hastigheten från 320 till 360 km/h. Det skulle då ge c:a 10 minuter kortare restid Stockholm–Malmö, alternativt ett par ytterligare uppehåll längs vägen.

Även om de s.k. ändpunktsrelationerna (Stockholm–Malmö och Stockholm–Göteborg) är viktiga så bör vi notera att det största antalet resor kommer att involvera de s.k. mellanmarknaderna, d.v.s. resande mellan de mellanliggande orterna och ändpunkterna, eller mellan de mellanliggande orterna inbördes. Detta gäller inte minst det stor-regionala vardagsresandet till och från arbete och studier, i avsikt att stärka och utvidga våra regioner i Sverige. I detta segment har ännu inga mål för restiden ställts, vilket vi anser vore rimligt att göra.

Avgörande för investeringens nytta är att tåget får betydande resandevolymer och tar marknadsandelar från bil och flyg. Med hänsyn till ovanstående krav på restider och vad som är etablerad teknik i närtid, förefaller den föreslagna topphastigheten 320 km/h vara väl avvägd. Möjligen kan en hastighet på 300 km/h vara tillräcklig på delar av banan, om påtagliga fördelar kan vinnas i form av t.ex. lägre kostnader eller minskat intrång. 250 km/h är för lite för att ge riktigt konkurrenskraftiga restider, särskilt på de längre avstånden från Mälardalen till södra Sverige och Köpenhamn.

Även om hastighetsstandarderna i huvudsak synes väl avvägd, så bör man dock kunna diskutera om delen Jönköping–Göteborg (eller åtminstone den kuperade delen Borås–Göteborg) kunde ges en något *lägre hastighetsstandard*, eftersom avstånden på denna linje är mindre än i och till södra Sverige. Restiden mellan Stockholm och Göteborg (c:a 2 timmar för direkttågen) är inte alls lika kritisk som mellan Stockholm och Malmö/Köpenhamn (2,5 till 3 timmar). En något lägre hastighet (t.ex. 270 eller 280 km/h) på åtminstone delar av sträckan Jönköping–Borås–Göteborg skulle ge 2–5 minuters längre restid beroende på hastighet och omfattning.

En annan fråga som kan diskuteras är att tillåta en optimering av bangeometri och hastighet genom ett antal *lokala hastighetsnedsättningar* med begränsad längd, för att kunna tillåta en flexiblere linjeföring i trånga lägen. Förutsättningen för sådana lokalt reducerade hastigheter är i så fall att betydande fördelar – väsentligt lägre kostnader och eventuellt mindre intrång – kan vinnas genom detta. Omvänt så bör linjeföringen kunna byggas för en *noget högre hastighet* – t.ex. 340–350 km/h på längre sammanhängande sträckor – om det inte leder till betydande merkostnader. En mera flexibel hastighetsstandard bör prövas i den fortsatta projekteringen, med hänsyn tagen till både nytta och kostnader.

Nyttan av investeringen måste ställas i relation till kostnaderna. Trafikverket har i en rapport till den s.k. Sverigeförhandlingen lämnat en uppskattning av anläggningskostnaderna på mellan 190 och 320 miljarder kr för huvudalternativet, inom ett sannolikhetsintervall på mellan 15 och 85 % [6]. Tidigare uppskattningar låg inom intervallet 140–170 miljarder kr. Anledningen till kostnadsökningen anges vara (1) att kraven på maximalt tillåten sättning i spåret har skärpts, vilket i stor utsträckning hör samman med kravet på s.k. fixerat spår; (2) ökade krav på bullerskydd, vilket också delvis hör samman med fixerat spår; (3) ökad andel tunnlar och broar, vilket hör ihop med kurvradierna; (4) krav på sidospår i stationslägen och (5) att den elektriska kraftförsörjningen utanför järnvägen nu ingår i kostnadskalkylen. De tre första punkterna utgör enligt Trafikverket [6] c:a 80 % av den antagna kostnadsökningen.

- *De höga uppskattade kostnaderna – och osäkerheten kring dessa – har lett till att projektets lämplighet har ifrågasatts. De som ifrågasätter projektet använder oftast den högsta angivna kostnaden – 320 Mdr kronor – som argument.*

Avgörande för investeringens nytta och kostnader är det tekniska utförandet. Dessa frågor har enligt vår uppfattning ännu inte fått den uppmärksamhet de förtjänar. Trafikverket har upprättat en preliminär teknisk systemstandard; i sin senaste version från juni 2015 [4]. En översyn och revision pågår under 2016. Samtidigt är detaljplaneringen av de första sträckorna (Ostlänken från södra Stockholmsområdet till Linköping) under våren 2016 i full gång.

Det finns flera enskilda punkter i den hittillsvarande systemstandarden [4] som kan diskuteras och vidareutvecklas. Vi kommer i denna rapport att koncentrera oss på de delar som vi anser vara mest utslagsgivande för kostnader ställda mot nytta, nämligen följande:

- Spårets och banunderbyggnadens konstruktion och utförande: Bör vi ha ett *konventionellt spår* med sliprar lagda i ballast, eller ett ballastfritt spår med räler monterade på betongdäck, s.k. *fixerat spår*? Detta rör den viktiga frågan om hur bra spårets geometriska läge kan och bör underhållas, d.v.s. vilka *spårlägesfel* som kan tillåtas för ifrågavarande höga hastigheter.
- Hur kan *banans geometri* (linjeföring) optimeras med hänsyn till krav på restider och anläggningskostnader? Det gäller i första hand *kurvornas radier* i horisontal- och vertikalplanet.
- Vilka anläggningskostnader kan uppskattas för olika tekniska lösningar enligt ovan? Hur utfaller dessa skattade kostnader i jämförelse med liknande projekt i andra länder i Europa? Vilka relationer kan förväntas mellan anläggningskostnader och ändrade underhållskostnader?
- Vilken marginal bör vi skapa redan nu inför eventuella önskemål om *ökad hastighet och kortare restider i framtiden*? Vad innebär detta tekniskt och kostnadsmässigt?

Vår uppfattning är att det har funnits en tendens att vilja ha det absolut bästa ur teknisk synpunkt, utan att sambanden mellan kostnader och nytta beaktats tillräckligt.

2. Hög hastighet i omvärlden – anläggningskostnader

Japan introducerade redan år 1964 sina första höghastighetståg som kallas Shinkansen. De hade då en topphastighet på 210 km/h. I början av 1980-talet introducerade Frankrike sina första höghastighetståg, TGV, med en topphastighet på 270 km/h. Italien och Tyskland följde efter, med varierande hastigheter mellan 250 och 300 km/h. Spanien inledde sitt numera betydande program för höghastighetståg 1991 mellan Madrid och Sevilla. Idag (2016) bygger Frankrike för 320 km/h, Spanien och Italien för 300 km/h, med möjlighet att höja till 350 km/h. Japan bygger för 320 km/h och Kina för hastigheter mellan 250 och 360 km/h.

Sverige har enligt ovan beslutat att bygga för 320 km/h, med en önskan – dock inte klart uttalad – om en möjlig framtida hastighetsökning till preliminärt 360 km/h. Vi bör notera att de svenska planerna ofta talar om färdigställande av de första delarna c:a 2028, med hela det beskrivna systemet klart 2035. Det är osäkert om denna tidsplan kommer att kunna hållas.

Vi har undersökt redovisade anläggningskostnader för motsvarande projekt i övriga Europa. De grundar sig i huvudsak på referenser [7, 8], med kontroller i andra källor där så varit möjligt. Detaljer redovisas i Bilaga 1. Vi har studerat projekt i närtid med färdigställande mellan 2006 och 2016. Kostnaderna har omräknats till 2015 års nivå. De studerade objekten är alla byggda för en operativ hastighet av minst 300 km/h. Banor med uppgiven lägre hastighet har inte inkluderats. Resultatet är följande:

- *Medelvärdet av europeiska kostnader för höghastighetsbanor är c:a 230 miljoner kr per km dubbelspår. Översatt till de planerade svenska stambanorna (720 km exkl. befintliga spår närmast ändpunkterna) skulle de komma att kosta c:a 165 Mdr kr.*
- *I Frankrike och Spanien är kostnaden i medeltal c:a 200 miljoner kr per km. Med kostnader i denna storlek skulle de nya svenska stambanorna kosta c:a 145 Mdr kr.*
- *Tyskland och Italien har kostnader på i medeltal c:a 320 miljoner kr per kilometer.*

I studien har vi utslutit två extremfall, dels ett i Italien (Milano–Turin) som redovisar nästan tre gånger så höga kostnader som medelvärdet, dels ett i Spanien (Valladolid–Leon) med kostnader på c:a 40 % av genomsnittet.

En helt oberoende och mera omfattande studie, men med i stor utsträckning äldre data, har utförts av BBVA i Spanien [9]. Den omfattar Europa, dock även med en del banor med lägre uppgiven hastighet än 300 km/h. Om man begränsar sig till 21 objekt som hade öppnats för trafik, så blir kostnaden i medeltal 18 miljon EUR per km dubbelspår i 2005 års prisnivå. Detta är exklusive landförvärv och planering/projektering. Med 10 % antagna påslag för det senare, samt uppräknig till 2015 års nivå, blir kostnaden i storleksordningen 23 miljoner EUR per km.

- *I svensk valuta blir kostnaden c:a 215 miljoner kr per km. Det ligger i samma storleksordning som det europeiska medelvärdet i vår egen studie ovan (230 miljoner per km).*

Kostnaderna varierar starkt – med en faktor 2,5 i vår studie – i första hand beroende på landskapets topografi. Att dra dessa banor med stora kurvradier genom bergsmassiv leder nästan alltid till höga kostnader för tunnlar och brobyggnader, medan ett landskap med små höjdvariationer och stabila markförhållanden ger betydligt lägre kostnader. Att dra nya järnvägar genom tätt befolkade och bebyggda områden ökar också kostnaderna. Tyskland och Italien har högre kostnader per kilometer än Frankrike och Spanien. I Italiens fall hänvisar man till hög täthet i bebyggelse. I Tysklands fall bygger man huvuddelen av banorna med ballastfritt spår, vilket skulle kunna förorsaka kostnadsökningar; se Avsnitt 5. Korruption kan ge ökade kostnader i vissa länder och projekt, dock osäkert i vilka.

Det är osannolikt att svenska förhållanden, med ett relativt platt landskap på större delen av sträckan (inkl. delen Jönköping–Malmö), samt en relativt låg bebyggelsestäthet ute på landet, skulle leda till avsevärt högre genomsnittliga kostnader än i t.ex. Spanien och Frankrike. Vi har visserligen vinterklimat, vilket i någon mån fördyrar byggandet. Markförhållandena sägs vara sämre i Sverige, men detta är osäkert. Övriga kostnadsdrivande faktorer bör vara gynnsamma.

Japan och Taiwan har höga anläggningskostnader jämfört med medelvärdet i Europa. Det redovisas i flera källor, bl.a. [7, 9]. Kostnaderna är i medeltal nästan 100 % högre än medeltalet för Europa. Förklaringar kan vara dels att banorna ofta går genom tätt bebyggda områden samt att topografin kräver en stor andel tunnlar, i vissa fall mer än 50 %. Man har i regel också byggt med ballastfritt spår (se avsnitt 3.1), vilket kräver en mycket stabil grundläggning.

Kina visar å andra sidan lägre kostnader. Enligt Världsbanken [8] har Kinas järnvägar för hastigheter över 300 km/h kostat i snitt 129 miljoner RMB per km dubbelspårig bana. Efter en något osäker uppräknings till 2015 blir det i svensk valuta (2016) c:a 175 miljoner kronor per km. Då ingår även fordon och depåer. Med ett uppskattat avdrag för detta på 17 % återstår c:a 145 miljoner kr per km, d.v.s. 60–65 % av snittkostnaderna i Europa.

Man bör inte dra alltför vittgående slutsatser om kostnader i Kina, Japan och Taiwan. Samhällsförhållanden inkl. lagstiftning, organisation, löner, bebyggelsestäthet, topografi m.m. visar betydande skillnader både mellan de tre länderna inbördes och mellan dessa och Europa. De europeiska projekten torde vara mycket bättre som jämförelse till Sverige.

Med hänsyn till anläggningskostnader för andra höghastighetsbanor i Europa, bör kostnaderna i Sverige kunna begränsas till 220–260 miljoner kr per kilometer. Det skulle innebära att 720 km nya stambanor i Sverige skulle kosta 160–190 Mdr kronor, om vinterklimat och sämre markförhållanden beaktas. Se även avsnitt 7.

3. Banans teknik

3.1 Spårets konstruktion och uppbyggnad

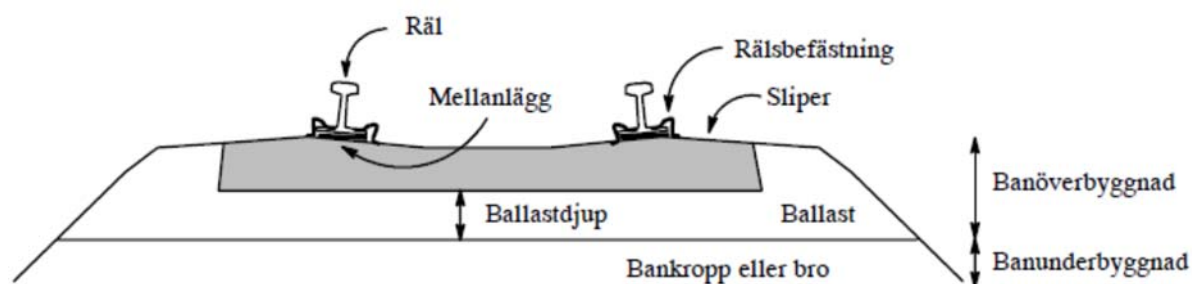
Banan är uppdelad i *banöverbyggnad* och *banunderbyggnad*.

Banöverbyggnaden består av rälerna och det som dessa är monterade på, inklusive det som håller fast dessa delar. I ett konventionellt klassiskt spår är rälerna monterade på *sliprar* – i regel av armerad betong – och däri fasthållna av *rälsbefästningar*. Sliprarna ligger i *ballast*, i moderna spår makadam. Detta klassiska spår kallas ofta *ballastspår*. Se Figur 3.1 och 3.2.

I moderna spår finns dessutom *mellanlägg* av gummi eller annan elastomer som ska ge en viss elasticitet i rälernas uppläggning på sliprarna. Detta görs för att ge mindre stötblastningar – kallade *dynamiska krafter* – på spåret och hjulen när de något ojämna hjulen rullar över det något ojämna spåret (se 3.3 nedan). Moderna spår utförs utan rälskarvar utom på vissa speciella punkter. De kallas därför *skarvfria* spår. Trafikverkets krav för skarvfria ballastspår framgår av TDOK 2013:0664 [10].



Figur 3.1 Konventionellt ballastspår.



Figur 3.2 Uppbyggnad av konventionellt ballastspår.

På vissa håll i utlandet – speciellt i Tyskland och Japan – har utvecklats *ballastfria spår*, där rälerna är elastiskt monterade på betongplattor, som i sin tur är något elastiskt upplagda gentemot banunderbyggnaden.

Möjligheten att justera spårets geometriska läge p.g.a. sättningar och andra rörelser är begränsade. En justeringsmån av ± 5 mm i sidled och ± 20 mm i höjddled är vanlig [11, 12]. Den japanska konstruktionen i Figur 3.3 uppges dock ha en justeringsmån på ± 10 resp ± 50 mm. En tysk konstruktion – Vossloh 300 – uppges tillåta $-4/+60$ mm i höjddled och ± 16 mm i sidled. Dessa justeringsmöjligheter är dock små jämfört med de sättningar och rörelser som kan förekomma under spårets livslängd om det ligger på icke stabiliserad mark. Grundläggningen måste därför vara mycket stabil. Se vidare avsnitt 5.2.2.

Flera olika ballastfria lösningar har utvecklats. De mest använda är (1) det japanska "frame slab track" (Figur 3.3) och (2) system Bögl (Figur 3.4). Även tyska System Rheda har ganska stor användning. I Trafikverkets dokument används begreppet *fixerat spår*. Sammanfattningar finns på flera håll, bl.a. i [11] och [12]. För- och nackdelar med fixerat spår i jämförelse med ballastspår diskuteras i avsnitt 5.



Figur 3.3 Frame slab track (Japan).



Figur 3.4 Ballastfritt spår typ Bögl – övre del.

3.2 Banans geometri i kurvor

Kraven på banans linjeföring horisontellt och vertikalt är starkt beroende av tågens hastighet.

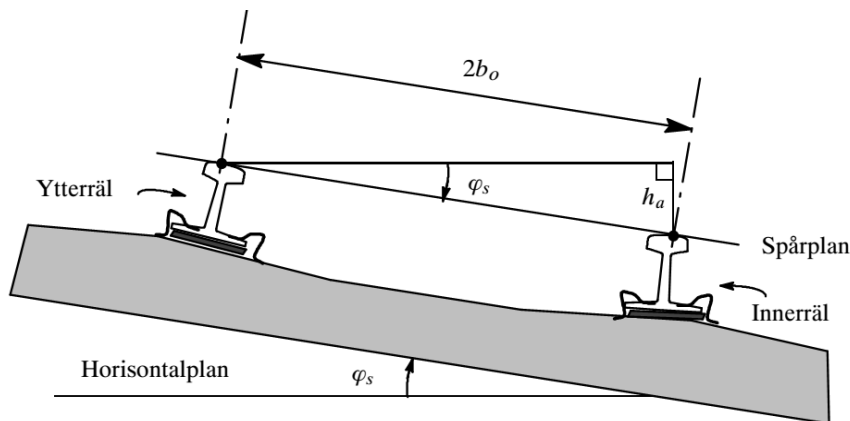
3.2.1 Kurvor i horisontalplanet

Horisontella kurvor ger en acceleration i sidled som i tåget upplevs som en *centrifugalkraft*. För att helt eller delvis kompensera för detta läggs kurvorna nästan alltid med en viss dosering så att den kurvyttre rälen ligger högre än den inre rälen; detta kallas *rälsförhöjning*, se Figur 3.5. Vid en viss hastighet råder balans mellan utåtriktad centrifugalkraft och den upplevda inåtriktade kraft som rälsförhöjningen ger. Denna hastighet kallas *balanserad hastighet*. Om tåget kör snabbare än så, ökar centrifugalkraften. Man skulle då behöva en teoretisk rälsförhöjning, betecknad h_t , för att få balans mellan utåtriktade och inåtriktade krafter. Den ytterligare rälsförhöjning som i så fall skulle behövas kallas *rälsförhöjningsbrist*, betecknad h_b .

Rälsförhöjningsbristen är proportionell mot den upplevda sidoaccelerationen i spårplanet. De är olika uttryck för samma sak.

Accelerationen 1 m/s^2 motsvarar en rälsförhöjningsbrist av 153 mm. Rälsförhöjningsbristen 150 mm motsvarar $0,98 \text{ m/s}^2$ d.v.s. $0,10 \text{ g}$. I vagnskorgen är i regel den upplevda accelerationen och centrifugalkraften större p.g.a. att korgens fjädringssystem under centrifugalkraftens inverkan lutar något utåt i förhållande till rälsförhöjningen (man förlorar alltså en del av rälsförhöjningens verkan). Detta fenomen kallas *krängning*.

Ju snabbare man kör i en kurva med given radie och rälsförhöjning, desto större blir sidoaccelerationen (eller rälsförhöjningsbristen). Vagnskorgen driver iväg i sidled på ett relativt mjukt fjädringssystem. Man riskerar också att få kraftiga svängningar i vagnskorgen; risken ökar med ökad hastighet och rälsförhöjningsbrist. Sidokrafterna på både spåret och tågets resande ökar. Därför bör rälsförhöjningsbristen begränsas.



Figur 3.5 Rälsförhöjning h_a och motsvarande vinkel.

Basen för rälsförhöjningen, $2b_o$, är 1500 mm för normalspårvidd.

Den teoretiska rälsförhöjningen, angiven i (mm) beräknas för normalspårvidd enligt Ekv. 3.1. Kurvradien anges i (m) och hastigheten i (km/h).

$$h_{t,mm} = \frac{1500}{9,81} \frac{(v_{km/h})^2}{3,6^2 R_m} \approx 11,8 \frac{(v_{km/h})^2}{R_m} \quad \dots (3.1)$$

Rälsförhöjningsbristen h_b blir då

$$h_b = h_t - h_a \quad \dots (3.2)$$

Ur dessa ekvationer kan man bestämma tillåten hastighet V (km/h) som funktion av kurvradie R (m) och teoretisk rälsförhöjning $h_t = h_a + h_b$ (mm):

$$V = \sqrt{R \frac{h_a + h_b}{11,8}} \quad \dots (3.3)$$

För en given hastighet V kan (minsta) kurvradien R bestämmas:

$$R = 11,8 V^2 / (h_a + h_b) \quad \dots (3.4)$$

De europeiska reglerna för normalt tillåten rälsförhöjning och rälsförhöjningsbrist framgår av TSI/TSD Infrastruktur (Tekniska Specifikationer för Driftskompatibilitet) [13]. De normala reglerna sammanfattas i Tabell 3.1. Det är tillåtet att göra undantag och tillåta mera om man kan visa att säkerheten ändå kan upprätthållas, se textutdrag under Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Tillåten rälsförhöjning (överst) och rälsförhöjningsbrist (nederst).
Utdrag ur TSI/TSD Infrastruktur 2014 [13].

Design cant [mm]			
	Freight and mixed traffic	Passenger traffic	
Ballasted track	160	180	
Non ballasted track	170	180	

Maximum cant deficiency [mm]			
Design speed [km/h]	$v \leq 160$	$160 < v \leq 300$	$v > 300$
For operation of rolling stock conforming to the Locomotives and Passenger TSI	153		100
For operation of rolling stock conforming to the Freight Wagons TSI	130	—	—

It is permissible for trains specifically designed to travel with higher cant deficiency (for example multiple units with axle loads lower than set out in table 2; vehicles with special equipment for the negotiation of curves) to run with higher cant deficiency values, subject to a demonstration that this can be achieved safely.

Trafikverket har motsvarande regelverk: TDOK 2014:0075 [14]. Detta grundar sig f.n. på en tidigare version av TSI/TSD. TDOK skiljer sig på ett par punkter från nu gällande TSI/TSD:

- (1) Maximalt anordnad rälsförhöjning (design cant) är 160 mm i stället för 180 mm;
- (2) Tillåten rälsförhöjningsbrist (cant deficiency) för hastigheter över 300 km/h är 80 mm i stället för 100 mm.

Det är oklart om Trafikverket vid en uppdatering i detta skede kommer att specificera så mycket som 180 mm rälsförhöjning, men de europeiska reglerna tillåter det (Japan har upp till 200 mm). Man måste dock troligen tillåta de rälsförhöjningsbrister som specificeras i TSI/TSD för att driftskompatibilitet ska kunna upprätthållas. Det är också svårt att se skäl för att inte göra det, om tågfordonen nu anses ha nått sådan teknisk mognad att denna rälsförhöjningsbrist kan tillåtas utan att påkänningarna på spåren blir för stora eller resandekomforten begränsad.

En rälsförhöjningsbrist på 100 mm ger en måttligt stor sidoacceleration (upplevd centrifugalkraft) på de resande: upp till c:a 0,80 m/s² inklusive effekten av fjädringssystemets krängning utåt i kurvan. Det är samma eller något lägre nivå (p.g.a. stor krängning i äldre vagnar) som för c:a 25 år sedan gällde i Sverige, innan man höjde rälsförhöjningsbristen till 150 mm för de flesta resandetåg, motsvarande en typisk sidoacceleration i vagnskorgen på c:a 1,2 m/s². 153 mm rälsförhöjningsbrist (enligt TSI/TSD) är ganska mycket med hänsyn till resandekomforten,

men bör kunna tillåtas tillfälligt i några kurvor då och då, ungefär som man gör i vissa kurvor idag.

Exempel 1: För 320 km/h med 160 mm rälsförhöjning och 100 mm rälsförhöjningsbrist blir den minimalt tillåtna kurvradien $R = 4647$ m.

Exempel 2: För 300 km/h med 160 mm rälsförhöjning och 153 mm rälsförhöjningsbrist blir den minimalt tillåtna kurvradien $R = 3393$ m.

Vi vill dock framhålla att man mycket väl kan projektera för en lägre rälsförhöjningsbrist och högre hastighet, förutsatt att detta inte medför högre kostnader, eller endast blygsamma merkostnader.

Exempel 3: För en framtida hastighet 360 km/h med 160 mm rälsförhöjning och 80 mm rälsförhöjningsbrist blir kurvradien 6372 m.

3.2.2 Kurvor i vertikalplanet

För höghastighetsbanorna kommer banlutningar upp till 35 ‰ att tillåtas kortvarigt (maximal längd 6 km). Ett mera normalt maximivärde är 25 ‰. Vid en övergång från en lutning till en annan anordnas en vertikal kurva. Vid övergång från positiv lutning (uppförslut) till negativ eller horisontell blir vertikalkurvan *konvex*; vid övergång från negativ eller horisontell till positiv lutning blir vertikalkurvan *konkav*.

Vertikala kurvor ges en kurvradie som inte ger nämnvärda störningar i form av vertikala accelerationer, vilket för känsliga personer kan ge åksjuka. Den vertikala accelerationen är proportionell mot hastigheten V i kvadrat och omvänt proportionell mot den vertikala kurvradien R_v . Trafikverket TDOK 2014:0075 [14] anger en rekommenderad vertikal kurvradie och en minsta radie R_v (m) enligt följande som funktion av hastigheten V (km/h):

- Rekommenderad vertikal radie $R_v = 0,30 \cdot V^2$
- Minsta vertikal kurvradie $R_v = 0,175 \cdot V^2$

Den rekommenderade vertikalradien ger en vertikal acceleration av $0,26 \text{ m/s}^2$. Minsta tillåtna radie ger en acceleration av $0,44 \text{ m/s}^2$.

Exempel: För 320 km/h är den rekommenderade vertikalradien $30\,720 \text{ m} \approx 31\,000 \text{ m}$.

Minsta tillåtna radie är $17\,920 \text{ m} \approx 18\,000 \text{ m}$.

Det finns inget sagt om att anlägga en plan eller rak del mellan två vertikalradier, inte ens om radierna och accelerationerna är motriktade; d.v.s. konvexa och konkava radier.

3.3 Geometriska fel i spåret – spårlägesfel

En kritisk fråga för spårets underhåll, dess kostnader och val av tekniska lösningar är vilka *toleranser* som för höga hastigheter kan tillåtas gentemot den ideala och önskade geometrin enligt föregående avsnitt 3.2. P.g.a. denna frågas kritiska karaktär ägnar vi mycket utrymme åt detta i det följande. Avvikelser från spårets ideala läge kallas *spårlägesfel*. Spårlägesfel kan beskrivas med ett antal parametrar, varav de viktigaste är:

- Punktfel höjdläge
- Punktfel sidoläge
- Punktfel spårvidd
- Spårvidd över 100 m (medelvärde)
- Skevning över en viss sträcka (3 eller 6 m).

Förutom ovanstående punktvisa spårlägesfel (eller fel över en begränsad sträcka) mäts även *standardavvikelser* i höjd och sida över längre sträckor (i Sverige mäts även samverkan mellan fel i sidoläge och rälsförhöjning). Exakta definitioner och detaljer finns i den europeiska standarden EN 13848–5 [15, 16] och i Trafikverkets TDOK 2013:0347 [17].

Spårlägesfelen klassificeras också med hänsyn till sin *våglängd*. Det gäller för höjdläge och sidoläge. Följande våglängdsområden definieras i de aktuella standarderna:

- Område D1: 3–25 m (i Sverige 1–25 m)
- Område D2: 25–70 m
- Område D3: 70–150 m.

Trafikverket har som synes kompletterat den europeiska standarden genom att beakta även korta våglängder ner till 1 m. Det är väl motiverat eftersom dessa korta våglängder i regel förorsakar de högsta dynamiska krafterna. Detta gör samtidigt att Trafikverkets mätvärden för spårlägesfelen blir något större än mätvärden enligt EN som bara sträcker sig ner till 3 m våglängd. Trafikverkets striktare krav ger en ökad marginal mot höga spårpåkänningar.

Punktfelen har betydelse framförallt för stötbelastningar (dynamiska krafter), vilket påverkar *underhållsbehovet* för spåret, och i viss mån för *säkerhet mot urspårning*. Särskilt skevningsfel har betydelse för säkerheten mot urspårning. Punktfelen har betydelse också för skakningar inne i tågen, d.v.s. för passagerarnas upplevda *komfort* eller brist på komfort. Särskilt de långa våglängderna 25–150 m påverkar komforten vid höga hastigheter. De kortaste våglängderna (1–5 m) har i regel en mycket begränsad påverkan på komforten, såvida de inte uppträder cykliskt över en viss sträcka. Standardavvikelser påverkar främst komforten.

Kraven på spårläge beror på den *största tillåtna hastighet* (Sth) som spåret är avsett för. Trafikverkets nu (2016) gällande krav [17] sträcker sig upp till 250 km/h, medan gällande EN [15] sträcker sig till 300 km/h. Inom europakommittén för EN arbetar man (2015–16) med att utvidga standarden till hastigheter över 300 km/h. Ett förslag har presenterats [16], och detta är våren 2016 ute på remiss. Vissa parametrar för spårläget har i detta preliminära dokument skärpts något för hastigheter över 300 km/h, dock ganska lite.

Man definierar i dessa normer dels två gränser där *underhåll* ska/bör sättas in, dels en gräns med hänsyn till *säkerhet*. Underhållsgränserna kallas i EN för "*Intervention Limit*" (IL) i Trafikverket för UH. Det finns en låg och en hög gräns i båda fallen. Gränserna där underhåll bör sättas in (IL-low resp IL-high) är rekommendationer i EN. Trafikverkets (TRV) underhållsgränser (UH1 resp UH2) är i princip obligatoriska, men är i praktiken något tånjbara.

Säkerhetsgränserna är obligatoriska inom EU. Beträffande skevningsfel har dock Trafikverket skärpt kraven. Trafikverket betecknar dem KRIT, medan EN betecknar säkerhetsgränserna "*Immediate Action Limit*" (IAL). De två standarderna definierar generellt följande gränser:

TRV-UH1 + EN-IL low: Enligt TRV: för spårlägesfel som överskrider gränsen ska underhåll snarast ska sättas in.

TRV-UH2 + EN-IL high: Enligt TRV: spårlägesfel ska åtgärdas innan de nått denna nivå.

TRV-KRIT + EN-IAL: Enligt både TRV ock EN: Omedelbar åtgärd, hastighetsnedsättning eller stopp för trafiken.

I *Bilaga 2* visas tabeller med utdrag ur Trafikverkets (TRV) standard (TDOK 2013:0347) [17] resp. EN 13848-5 [15]. För en komplett bild av olika spårlägesfel hänvisas till [15, 16, 17]. För hastigheter över 300 km/h visas gränsvärden enligt remissutgåvan av ännu inte fastställd EN [16]. Den senare bör dock ge en god indikation på det spårläge som kommer att krävas för

hastigheter över 300 km/h. Trafikverket planerar att uppdatera sin TDOK till att gälla även högre hastigheter än 250 km/h.

Kommentarer och sammanfattning om geometriska fel i spåret

- Trafikverkets (TRV) underhållsgränser UH1 och UH2 är i de flesta fall 25–35 % striktare än rekommenderade värden i EN. Märk också att TRV hastighetsgränser samtidigt är striktare.
- TRV underhållsgränser för 160–200 km/h är i de flesta fall lika med eller något striktare än EN:s (i remissutgåvan) föreslagna gränser för 300–360 km/h, undantaget de långvågiga felen. Se Bilaga 2.
- Undantaget från ovanstående är punktfel i sidoläget för långa våglängder (25–70 m och 70–150 m). Här är både EN och nuvarande TRV/TDOK mera tillåtande än tidigare svenska normer (BVF 587.02) för hastigheter upp till 200 km/h.
- Sammanfattningsvis är det inget 'superspår' som krävs. Detta hindrar inte att man i vissa länder ändå underhåller spåret för mycket små spårlägesfel, t.ex. i Japan. Trafikverket har i de flesta fall striktare gränsvärden än vad som föreskrivs i EN. Det gör att de dynamiska krafterna på spåret blir lägre, och komforten i tåget blir bättre.

Underhållsgränserna ligger långt under de säkerhetskritiska gränserna. Med hänsyn till detta är det rimligt att tänka sig att Trafikverket kommer att behålla gränsvärdena för 250 km/h även för hastigheter över 300 km/h, med undantag för de långa våglängderna. Det finns dock f.n. inget beslut på detta.

4. Hur bra spår behövs – och vad klarar moderna spår?

4.1 Allmänt

Föregående avsnitt 3.3 presenterade den standard som gäller för spårläge i Sverige resp. Europa. Vi ska nu jämföra dessa standarder med de reaktioner (krafter på spåret och komfort) som har uppmätts med provtåget Gröna Tåget 2006–2008 [18], se Figur 4.1. Tåget framfördes vid dessa mätningar i hastigheter 250–300 km/h.

Frågan om hur tågfordonen interagerar med spåret – och speciellt med dess geometriska fel – är viktig för att fastställa vilket spårläge som egentligen behövs i höga hastigheter, vilket i sin tur är kopplat till både investeringskostnader och förväntat underhåll. Detta kan i sin tur vara avgörande för teknikval beträffande spårets utförande. Generellt är det lätt att både överdriva krav och försumma viktiga aspekter i den osäkerhet som en stor systemförändring innebär.

Dåligt spårläge leder till ökade dynamiska krafter på spåret som i sin tur leder till att spårläget försämras ytterligare. Det leder också till ökade skakningar, d.v.s. dålig komfort, i tåget. I yttersta fall vid mycket dåligt spårläge kan urspårning ske. Det senare har dock, såvitt känt, aldrig hänt på normala spår för högre hastigheter (200 km/h och uppåt), varken i Sverige eller i utlandet. Det enda kända fallet är ett av gamla skyttegravar underminerat spår i norra Frankrike, där ett TGV-tåg spårade ur 1993.



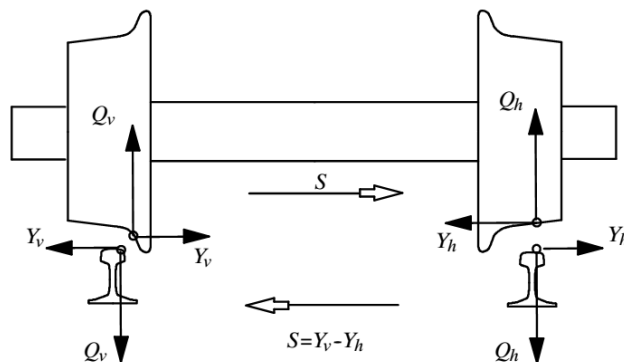
Figur 4.1 I forsknings- och utvecklingsprogrammet Gröna Tåget utfördes flera provserier 2006–08 för att undersöka möjligheterna att öka hastigheten. Ett stort antal prov utfördes i hastighetsområdet 250–303 km/h på olika typer av spår, alla avsedda för lägre hastigheter.

Vi väljer ut följande viktiga mätstorheter som rör interaktionen mellan spår och tåg:

- *Totala vertikala krafter* Q_{tot} hjul-räl: bidrar till sättningar i banunderbyggnad och banöverbyggnad; påverkar alltså det vertikala spårläget. Det är i allmänhet de vertikala krafterna som initierar spårlägesfelen. Enligt EN 14363 [19] är tillåtet gränsvärde för höghastighetståg 160 kN, om krafterna först lågpasfilteras med 20 Hz gränsfrekvens.
- *Sidokrafter* på spårkroppen, s.k. spårförskjutningskrafter S (i internationell standard betecknade ΣY): kan i vissa fall bidra till sidolägesfel. Blir S -krafterna alltför stora (större än tillåtet gränsvärde) kan de förorsaka större spårförskjutningar i sidled vilket ytterst kan leda till urspårning. Detta är mycket ovanligt, men frågan måste ändå bevakas. Tillåtna gränsvärden ges i EN 14363 [19]. Gränsvärdet beror av axellasten på tåget; ju tyngre tåg, desto stabilare ligger spåret. För axellasten 17 ton (övre gräns för tillåten axellast på tåg över 250 km/h) är gränsvärdet 65,6 kN.

- *Urspårningskvoten Y/Q* , d.v.s. kvoten mellan sidokraft och vertikal kraft för ett hjul: höga kvoter (högre än gränsvärdet) kan leda till urspårning; hjulflänsen riskerar att klättra upp över rälsens farkant. Tillåtet gränsvärde ges i EN 14363 [19]. Kvoten Y/Q får i regel vara högst 0,80, även om detta är ett konservativt värde.
- *Dynamiska accelerationer* mätta i tåget och vägda med hänsyn till människans känslighet för vibrationer med olika frekvenser. De är mätetal på vad som internationellt brukar kallas "ride comfort". De mäts både i sidled (lateralt) och i vertikal led. Bedömning av mätetalen (very comfortable, comfortable, medium, etc.) ges i EN 12299 [20]. Exempelvis betraktas frekvensvägda accelerationer vara "very comfortable" under $0,20 \text{ m/s}^2$ och "comfortable" under $0,30 \text{ m/s}^2$. Man bedömer i dessa fall dynamiska accelerationer vid 95-percentilen, d.v.s. de accelerationsnivåer som inte överskrids i 95 % av de utvärderade delsträckorna. Frekvensvägningen överensstämmer med ISO 2631 och accelerationerna benämns ibland ISO-värden.

Krafterna Y , Q och S visas i Figur 4.2.



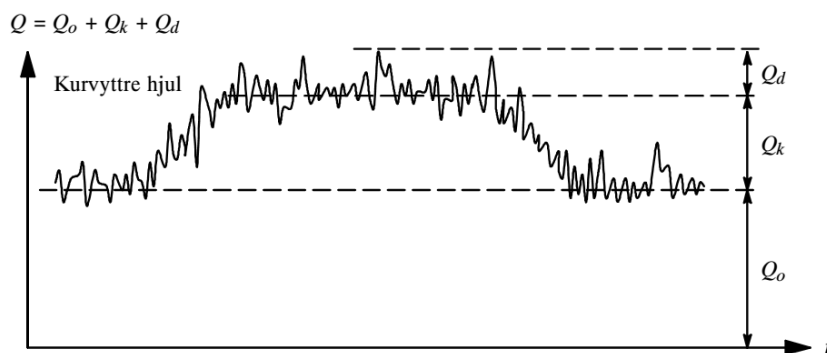
Figur 4.2 Vertikala krafter Q samt sidkrafter (lateralkrafter) Y och S .

Ofta indexerar första axels högra hjul 11 och vänstra hjulet 12, istället för 'h' resp 'v'.

Krafterna består av flera komponenter, se Figur 4.3, som visar principen för vertikalkraften Q . Följande komponenter finns:

- Statisk del Q_o = halva axellasten.
- Kvasistatisk del Q_k = tillskott (eller underskott) p.g.a. omfördelning från ena sidan till den andra, vid körning i kurva med rälsförhöjningsbrist, alternativt -överskott.
- Dynamisk del Q_d : beroende framför allt av spårlägesfelen.

Denna principiella bild gäller både vertikala krafter och sidkrafter. För sidkrafter är medelvärdet = noll om man kör i omväxlande kurvor och på rakspår.



Figur 4.3 Q -kraft p.g.a. kurvgång med rälsförhöjningsbrist (Q_k) och spårlägesfel (Q_d).

Mätvärden från Gröna Tåget kommer att redovisas och jämföras med det spårläge som rådde. Hastigheter och andra driftförhållanden ligger ganska nära vad som kan förväntas av framtida höghastighetståg, men skiljer sig ändå något enligt följande:

- 1) Mätvärden härrör från ett tåg med lägre *axellast* än 17 ton (tillåtet enligt TSI/TSD för höghastighetståg över 250 km/h). Gröna Tåget hade 15,5 tons axellast.
- 2) Mätningarna skedde i varierande *hastigheter* 250–300 km/h istället för 320 km/h vilket är målet för de framtida svenska höghastighetstågen. *Rälsförhöjningsbristen* varierade i proven, från noll upp till c:a 200 mm. Som visats i avsnitt 3.2.1 så tillåter TSI/TSD [13] 153 mm brist upp till 300 km/h; för högre hastigheter 100 mm.
- 3) Gröna Tåget var utrustat med *radialstyrda s.k. mjuka boggier*, vilket ger lägre sidokrafter på spåret än de s.k. styva boggier som i regel används i ordinära höghastighetståg. Erfarenhetsmässigt så ger styva boggier 20–30 % högre sidokrafter än mjuka boggier, både kvasistatiskt och dynamiskt i stora kurvradier. Vi kommer att använda korrigeringsfaktorn 1,30 för att räkna upp sidokrafterna från Gröna Tåget.
- 4) Gröna Tågets vagnskorg är med hänsyn till styvhet och vibrationer utförd för 200 km/h. Detta gör att särskilt de vertikala vibrationerna vid vagnsmitt blir 50–80 % större än över boggierna som annars normalt har högst vibrationer (d.v.s. dynamiska accelerationer). Medelvärde över hela vagnskorgen är c:a 20 % högre. I sidled är skillnaden mindre. När komforten jämförs med spårläget bör detta beaktas.

I övrigt skiljer sig inte Gröna Tåget på ett signifikant sätt från andra höghastighetståg. De vertikala krafterna blir ungefär desamma vid samma förhållanden i övrigt (axellast m.m.).

Slutligen kan nämnas att en version av Gröna Tåget var utrustad med s.k. *aktiv sidofjädring* ("Active Lateral Suspension", ALS). Krafterna i fjädringssystemet styrs av ett elektroniskt styrsystem och en elektro-hydraulisk aktuator, vilket ger väsentligt förbättrade dynamiska accelerationer och komfort inne i tåget. De mätvärden som redovisas i detta avsnitt härrör dock från konventionell passiv fjädring, vilket fortfarande är det mest normala på världens höghastighetståg. I framtiden är det troligt att aktiv fjädring kommer att få ökad användning. Det finns redan idag på t.ex. nya italienska ETR 1000 tåg och flera japanska tåg, bl.a. typ N700.

Korrigerade mätvärden

Av ovanstående anledningar korrigeras mätvärden M från Gröna Tåget (GT) enligt ekvationer 4.1 till 4.3, så de blir ekvivalenta med de värden H som de tänkta höghastighetstågen (HHT) skulle ge, dock utan att använda aktiv fjädring. Index M avser då mätvärden från GT, medan index H avser värden för framtida HHT. I nedanstående korregeringsformler 4.1 till 4.3 är

P = axellast (ton)

h_b = rälsförhöjningsbrist (mm)

V = hastighet (km/h)

Index 'k' avser kurvgång; index 'd' avser dynamik.

För vertikala krafter Q_H görs följande korrigering:

$$Q_H = P_H/P_M \cdot Q_{0M} + h_{bH}/h_{bM} \cdot Q_{kM} + (V_H/V_M)^{1,2} \cdot Q_{dM} \quad \dots (4.1)$$

I de fall som ingen rälsförhöjningsbrist fanns i de utvärderade proven (på rakspår), beräknas ett kvasistatiskt påslag enligt [21] avsnitt 4.1. De dynamiska krafterna kan i vissa fall öka något snabbare än hastigheten p.g.a. att spåret kan ha en något progressiv styvhet.

För sidkrafter (laterala krafter) S och Y gäller:

$$S_H = (h_{bH}/h_{bM} \cdot S_{kM} + (V_H/V_M)^{1,2} \cdot S_{dM}) \cdot 1.30 \quad \dots (4.2)$$

Komforten är mera svårbedömd, men de ISO-vägda accelerationerna kan enligt författarnas tidigare erfarenheter approximativt korrigeras enligt följande:

$$ISO_H = (V_H/V_M)^{1,5} \cdot ISO_M \quad \dots (4.3)$$

Även om formlerna för hastighetsberoendet är approximativa och beroende av tågfordonens faktiska utförande och egenskaper, så ger de en god indikation. Korrigeringarna är approximativt giltiga för tågfordon som är ägnade att köra i högre hastigheter, visat efter prov enligt EN 14363 och EN 12299. De är i princip giltiga för de typtåg som Trafikverket valt ut som referenser. Om behov finns av ännu större säkerhet så kan kompletterande prov utföras.

4.2 Mätvärden från Gröna Tåget samt korrigerade värden

Vi visar här några exempel på uppmätta krafter vertikalt och i sidled. De härrör dels från ett modernt spår byggt under de första åren på 2000-talet, dels från en äldre banunderbyggnad, anlagd på 1800-talet eller vid dubbelspårsutbyggnad på 1930-40-talen (Töreboda–Skövde).

De flesta exemplen härrör från en ganska ny banunderbyggnad (Uppsala–Gävle) som nybyggts i början på 2000-talet vid dubbelspårsutbyggnad och linjeomläggningar. Data för detta nyare spår är:

- Banunderbyggnad: modern, c:a 5 år vid provtillfället
- Banöverbyggnad: c:a 5 år
- Råler: 60 kg/m
- Betongsliprar, avstånd: 65 cm
- Elastiskt mellanlägg (c:a 10 mm).

Detta spår torde kvalitetsmässigt vara mera representativt än äldre spår, för vad som kan förväntas av de framtida spåren för hög hastighet. Standarden har dock sedan början av 2000-talet förbättrats ytterligare. Bl.a. har slipersavståndet minskats från 65 till 60 cm och spårväxlarna har stabiliserats med s.k. "Under Sleeper Pads". Spåren som byggs idag, liksom framtida spår, kan därför vara kvalitetsmässigt bättre än det undersökta spåret.

Data för det äldre spåret är följande:

- Banunderbyggnad: äldre
- Banöverbyggnad: c:a 15 år
- Råler: 60 kg/m
- Betongsliprar, avstånd: 65 cm
- Elastiskt mellanlägg (c:a 10 mm).

Egenskaperna för detta äldre spår är *knappast representativa för de framtida spåren för hög hastighet*, men ger en uppfattning om vilka krafter som verkar på spår med betydande spårlägesfel, vilket ger indikationer om hur stora marginalerna är.

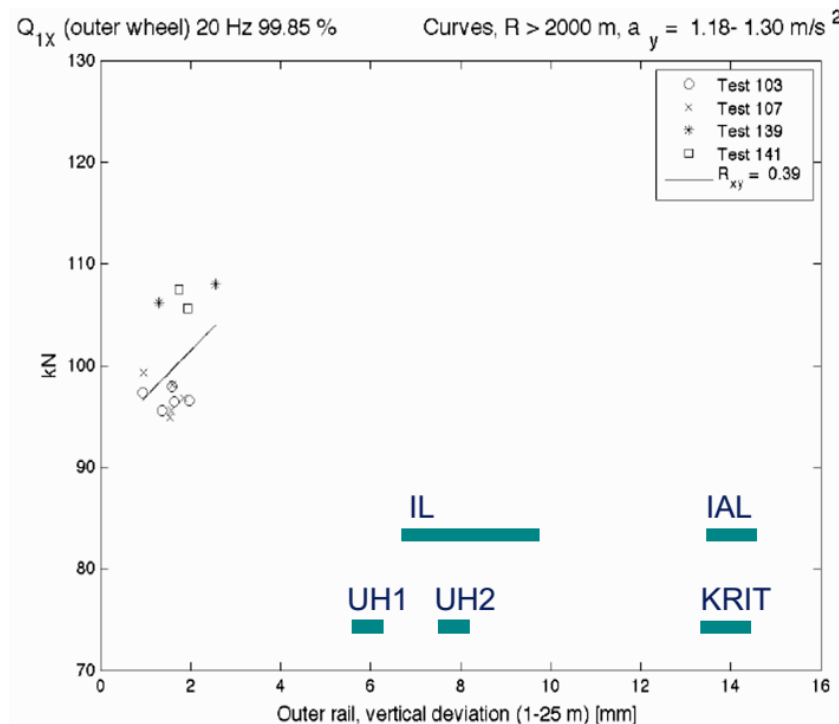
Mätvärden, med utvärdering av motsvarande spårläge, framgår av en rapport [22] framtagen inom programmet Gröna Tåget.

4.2.1 Ny banunderbyggnad

Vertikala krafter på spåret

Figur 4.4 visar uppmätta *vertikalkrafter* Q från den nyare banunderbyggnaden. I grafen visas Q -krafter som underskrids med 99,85 % sannolikhet för varje utvärderad delsträcka. Varje

delsträcka är 500–600 m lång. Tillåtna gränsvärden för spårlägesfel enligt provisorisk EN för hastigheter över 300 km/h är markerade i figuren. Även Trafikverkets gränsvärden UH1 och UH2 för 250 km/h är markerade, med antagande att dessa gränsvärden i stort sett kommer att tillämpas även för hastigheter över 300 km/h (se avsnitt 3.3). Spårlägesfelen för det nyare spåret når på mätsträckorna inte i något fall upp till Trafikverkets UH1 eller EN:s nedre underhållsgräns IL. Därför har utvärderingarna kompletterats med viss utvärdering även för det äldre spåret; se avsnitt 4.2.2.



Figur 4.4 Uppmätta vertikalkrafter Q på nyare spår (Uppsala–Gävle) som funktion av punktfel i spårläget. Normer för spårläge – Trafikverkets UH1 och UH2 samt EN 13848-5 "Intervention Limit (IL) low to high" – är inlagda i figuren. Även kritiska värden visas. Källor [16, 17, 23].

Max mätvärde $Q_M = 108$ kN.

Korrigerat värde 1: $Q_H = 107$ kN (inkl. 100 mm rälsförhöjningsbrist i kurvor).

Korrigerat värde 2: $Q_H = 115$ kN (inkl. 153 mm rälsförhöjningsbrist i kurvor).

Gränsvärde enligt EN 14363 = 160 kN.

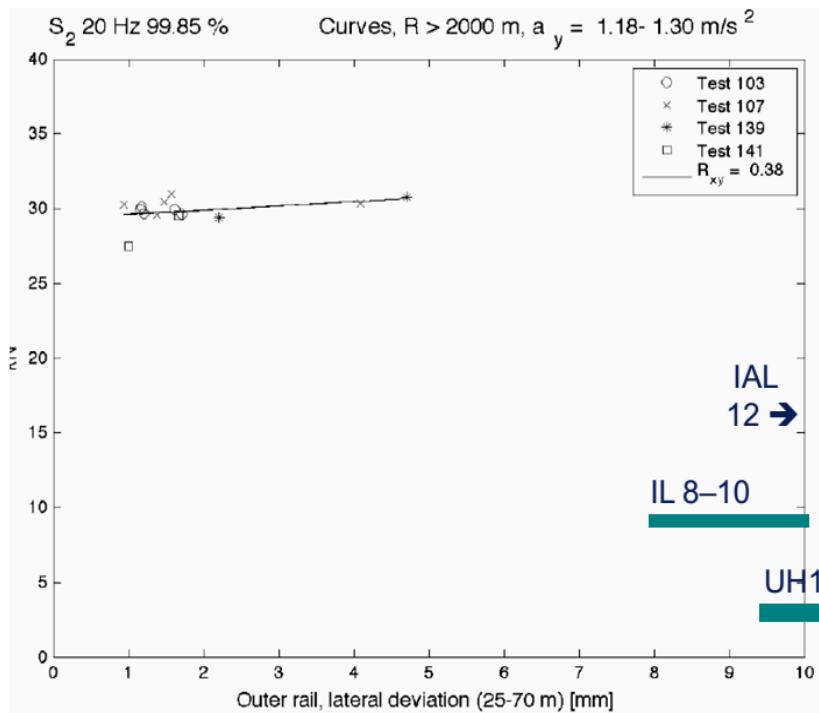
Notera att den markerade regressionslinjen är osäker. De ungefärliga nivåerna är dock säkerställda.

Korrigerade värden enligt Figur 4.4 har beaktat både höjd axellast, höjd hastighet och förändrad rälsförhöjningsbrist. Marginalerna till gällande gränsvärden är stora. Man skulle kunna hävda att spårläget är så bra att mätvärdena inte är representativa för vad som kan förväntas på framtida spår som underhållits till nivåerna UH1 resp UH2. Därför har även resultat från sämre vertikalt spårläge undersökts; se avsnitt 4.2.2.

Sidokrafter (laterala krafter) på spåret

Figur 4.5 visar sidokrafter S enligt samma principer som för vertikalkrafterna. I detta fall fanns den största korrelationen mellan krafter och spårlägesfel inom våglängdsområdet 25–70 m, även om detta måste betraktas som en tillfällighet. Inget punktfel på mätsträckorna når upp till Trafikverkets nivå UH1 eller till EN:s IL-nivå. Vi ser också att Trafikverkets UH-nivå (hittills för maximalt 250 km/h) i detta fall ligger högre än vad EN preliminärt föreslår för 300–350

km/h. Sannolikt kommer Trafikverket att sänka sina UH1 och UH2-nivåer för våglängder om 25–70–150 m i nästa revision för högre hastigheter, så att de maximalt når upp till vad EN rekommenderar. Tidigare (se avsnitt 3.3) har vi konstaterat att Trafikverket i sin nu gällande norm [17] för långa våglängder ligger högre än riktvärden i tidigare föreskrifter (BVF 587.02).



Figur 4.5 Uppmätta *sidokrafter* S på nyare spår (Uppsala–Gävle) som funktion av spårläget. Normer för spårläge – Trafikverkets UH1 samt EN 13848-5 "Intervention Limit (IL) low to high" – är inlagda i figuren. Även kritiska värden visas. Källor [16, 17, 23].

Max mätvärde $S_M = 31$ kN.

Korrigerat värde 1: $S_H = 32$ kN (inkl. 100 mm rälsförhöjningsbrist i kurvor).

Korrigerat värde 2: $S_H = 42$ kN (inkl. 153 mm rälsförhöjningsbrist i kurvor).

Gränsvärde enligt EN 14363 = 65,6 kN (vid 17 tons axellast).

Notera att den markerade regressionslinjen är osäker. Som dynamiskt varierande kraft har 12 kN antagits i de korrigerade värdena, grundat på simuleringsresultat och andra prov. Styv boggi har antagits öka den kvasistatiska sidokraften med 30 %. P.g.a. viss osäkerhet bedöms nivåerna kunna variera ± 15 % kring det angivna korrigerade värdet.

Det finns en ytterligare utvärdering för sidokraften S som funktion av sidolägesfel inom våglängderna 1–25 m. Den uppvisar ingen klar korrelation med spårläget och de maximalt uppmätta krafterna är naturligtvis desamma.

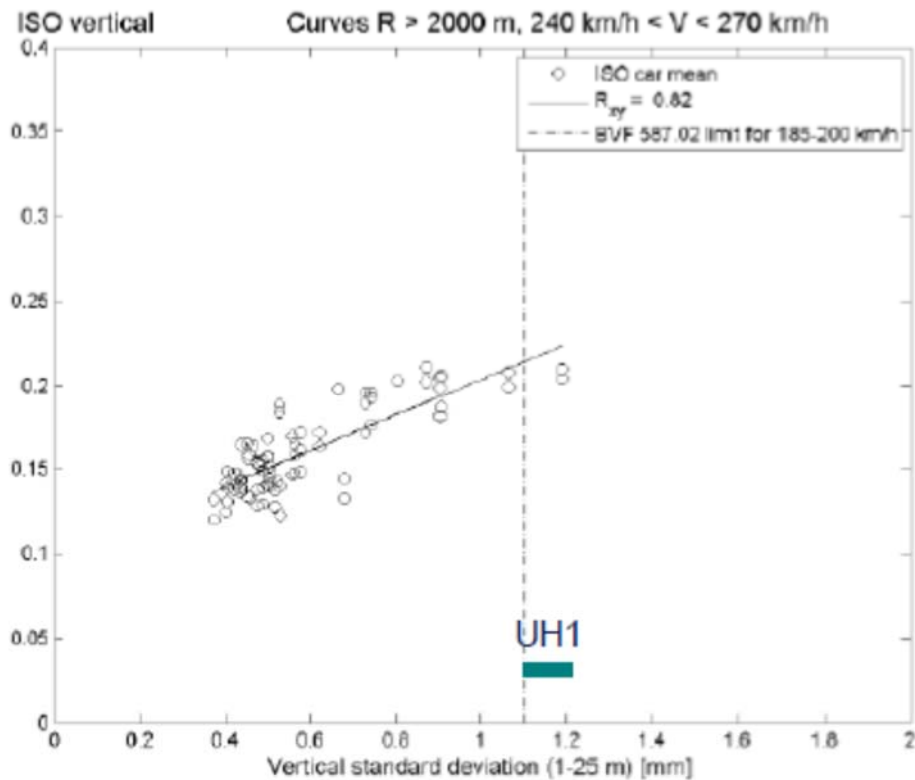
Sambandet mellan sidokrafter S och spårets sidoläge är generellt svagt i intervallet 1–5 mm. Det gäller olika våglängdsområden, kurvradier och hastigheter [22]. Detta bekräftas också av en inofficiell studie utförd av Trafikverket 2011, där i synnerhet våglängdsområdet 1–25 m har undersökts. Den dynamiska komponenten av sidokrafterna uppträder i huvudsak stokastiskt på en låg nivå om maximalt 10–15 kN. För måttligt stora sidolägesfel (upp till 6 å 7 mm i 320 km/h) beror sidokrafterna huvudsakligen på rälsförhöjningsbristen. De stokastiska variationerna beror i första hand av s.k. sinusgång, d.v.s. hjulparens något slingrade gång i spåret. Även 'styva boggi' uppvisar detta stokastiska beteende med låga nivåer på de

dynamiska krafterna. Det beror delvis också på att måttligt stora sidolägesfel tas upp av de rörelsemöjligheter som finns mellan hjulflänsar och räler på rakspår och i stora kurvradier. Vid större sidolägesfel ökar de dynamiska sidokrafterna och blir korrelerade till spårläget.

De gränsvärden för underhållsinsatser i våglängdsområdet 1–25 m som finns i EN [16] och även i TDOK [17] synes väl valda. De grundar sig på erfarenheter och kunskap från de länder där hastigheter kring och strax över 300 km/h förekommer.

Dynamiska vertikala accelerationer (komfort)

Figur 4.6 visar uppmätta vertikala accelerationer, frekvensvägda enligt ISO och EN 12 299.



Figur 4.6 Uppmätta ISO-vägda vertikala accelerationer (komfort) på nyare spår (Uppsala–Gävle) som funktion av spårlägets standardavvikelse (våglängder 1–25 m). Norm för spårläge är Trafikverkets riktvärde UH1. Källa [17, 23].

Medelvärde standardavvikelse för vertikalt spårläge (1–25 m): 0.7 mm.

Mätvärde Vertikalt ISO (95-percentil) = 0,20 m/s².

Korrigerat värde: $ISO_H = 0,28 \text{ m/s}^2$.

Komfortvärdering enligt EN 12299: 'Komfortabelt' (ISO-acceleration = 0,20–0,30 m/s²).

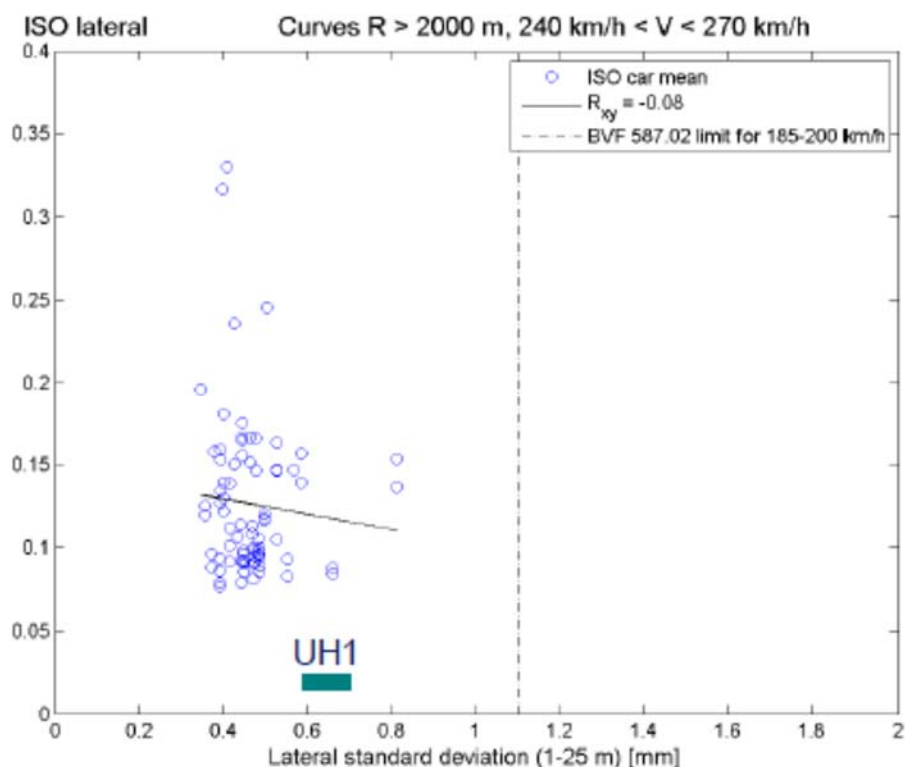
Av Figur 4.6 kan följande slutsatser dras:

- Höjdläget på det nyare spåret har på de allra flesta delsträckor en standardavvikelse inom riktvärdet UH1. Medelvärdet över hela sträckan är c:a 40 % bättre.
- Komforten bedöms vara god med hänsyn till tågets skakningar.

Vi bör notera att de vertikala accelerationerna är högre i Gröna Tåget än i ett optimalt fordon för 320 km/h; se avsnitt 4.1. Ett optimalt fordon torde ha accelerationer som i medeltal över fordonslängden är c:a 15 % lägre, d.v.s. ISO_H skulle då bli c:a 0,24 m/s², vilket också bedöms som 'komfortabelt'.

Dynamiska sidoaccelerationer (komfort)

Figur 4.7 visar *lateral accelerationer* (d.v.s. i sidled), frekvensvägda enligt ISO och EN 12299.



Figur 4.7 Uppmätta ISO-vägda sidoaccelerationer (komfort) på nyare spår (Uppsala–Gävle) som funktion av spårlägets standardavvikelse (våglängder 1–25 m). Trafikverkets riktvärde UH1 har indikerats. Källa [17, 23].

Medelvärde standardavvikelse för vertikalt spårläge (1–25 m): 0,5 mm.

Mätvärde *Vertikalt ISO* (95-percentil) = 0,17 m/s².

Korrigerat värde: $ISO_H = 0,24$ m/s².

Komfortvärdering enligt EN 12299: 'Komfortabelt' (ISO-acceleration = 0,20–0,30 m/s²).

Av Figur 4.7 kan följande slutsatser dras:

- Sidoläget på det nyare moderna spåret har på de allra flesta delsträckor en standardavvikelse inom riktvärdet UH1. Medelvärdet över hela sträckan är c:a 20 % bättre.
- Komforten bedöms vara god med hänsyn till tågets skakningar.
- För dessa små sidolägesfel finns ingen korrelation mellan spårläge och komfort. Detta överensstämmer med vad som konstaterats även för sidokrafter *S*.

Vi har även utvärderat komforten i förhållande till sidolägesfel med våglängder 25–140 m. Resultatet är likartat och följande slutsatser kan dras:

- Sidoläget på det nyare spåret har på de allra flesta delsträckor en standardavvikelse inom det i Bilaga 2 rekommenderade värdet 2,4 mm. Medelvärdet över hela sträckan är c:a 50 % bättre.
- Komforten bedöms vara god med hänsyn till tågets skakningar.
- För dessa relativt små sidolägesfel finns ingen korrelation mellan spårläge och komfort. Detta överensstämmer med vad som tidigare konstaterats även för sidokrafter *S*.

Urspårningskvot Y/Q

Sidokrafterna Y mellan hjul och räl uppnår de högsta värdena i kurvor, framför allt i snäva kurvor. Tabell 4.1 visar de maximalt uppmätta urspårningskvoterna för Gröna Tåget [18, 23].

Tabell 4.1 Urspårningskvoter Y/Q uppmätta och statistiskt utvärderade för Gröna Tåget.
Källa: Gröna Tåget [18, 23].

Test zone	Max estimated value	Percentage of limit	Max measured value
$250 \leq R \leq 400$ m	0,68	85	0,61
$400 \leq R \leq 600$ m	0,65	81	0,61
$900 \leq R \leq 1500$ m	0,46	58	0,45
Large radius curves	0,28	35	0,24

Marginalerna mot det i EN 14363 definierade gränsvärdet 0,8 är för de stora kurvradierna mycket stora. Marginalerna kommer att fortsatt vara stora även vid en ökning av hastigheten till 320 km/h. Vi gör därför ingen vidare utredning och korrektion av Y/Q .

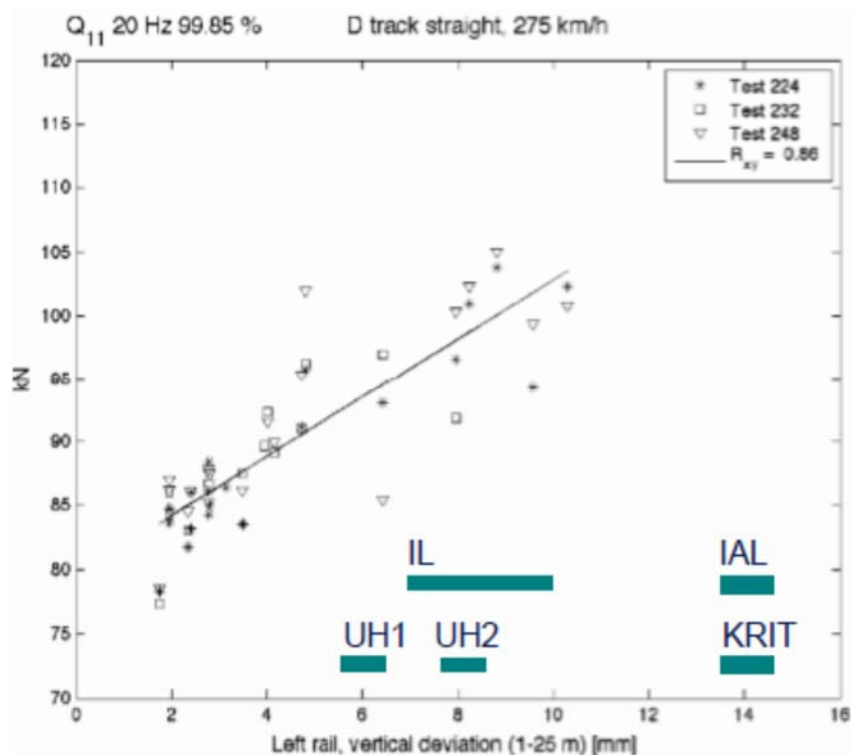
4.2.2 Äldre banunderbyggnad

Den äldre banöverbyggnaden är inte relevant vad gäller att bedöma spårlägesfelens realistiska storlek för ett modernt spår byggt och underhållet enligt senaste kunskaper och erfarenheter. Spårlägesfelen på den nya banunderbyggnaden når inte alltid upp till Trafikverkets gränsvärden UH1 och UH2 – eller till EN:s rekommenderade värden – enligt Tabell B2.1 i Bilaga 2. Därför har inte krafterna kunnat fastställas för dessa gränsvärden. Så är fallet för spårets höjdläge och motsvarande vertikala krafter. Vi gör därför en utvärdering för det äldre spåret med avseende på dessa storheter.

Figur 4.8 visar uppmätta vertikalkrafter Q och höjdlägesfel på den äldre banunderbyggnaden. I grafen visas liksom tidigare Q -krafter som inte överskrids med 99,85 % sannolikhet för varje utvärderad delsträcka. Varje delsträcka är 500–600 m lång. Spårlägesfelen för det äldre spåret når i några fall upp till EN:s övre gräns IL high. C:a 80 % av spårsektionerna har dock spårlägesfel som är mindre eller högst lika med Trafikverkets gränsvärde UH2, d.v.s. den nivå där de måste åtgärdas. Men som tidigare sagts: detta äldre spår har inte den standard och stabilitet som är relevant för framtida höghastighetsspår.

Ur Figur 4.8 kan sammanfattningsvis följande slutsatser dras:

- Q -krafterna är måttligt stora, även med korrigerade värden med hänsyn till axellast och hastighet och maximalt tillåten rälsförhöjningsbrist. De högsta korrigerade värdena på det dåliga spårläget ligger c:a 15 % under tillåtna gränsvärden.
- Även om detta äldre spår med betydande spårlägesfel inte ger kritiska Q -krafter som närmar sig gränsvärdena, så har c:a 30 % av spårsektionerna spårlägesfel på nivå UH1 som bör åtgärdas om man ska köra helt normenligt i hastigheter över 200 km/h.
- De största spårlägesfelen ligger fortfarande c:a 30 % under vad som betraktas som kritiskt i de föreslagna normerna för spårläge.



Figur 4.8 Uppmätta vertikalkrafter Q på äldre spår (Töreboda–Skövde) som funktion av spårläget. Normer för spårläge – Trafikverkets UH1 och UH2 samt EN 13848-5 "Intervention Limit (IL) low to high" – är inlagda i figuren. Även kritiska värden visas. Källor [16, 17, 23].

Max mätvärde $Q_M = 105$ kN.

Korrigerat värde $Q_H = 134$ kN (inkl. max tillåten rälsförhöjningsbrist i kurvor).

Gränsvärde enligt EN 14363 = 160 kN.

4.2.3 Dynamisk instabilitet hos tågfordonen

Hos vissa fordon uppträder under vissa betingelser s.k. *dynamisk instabilitet*, d.v.s. fordonets boggier eller vagnskorg svänger i sidled fram och tillbaka över spåret. Man säger ibland att fordonet "wobblar". Det finns huvudsakligen två typer av instabilitet:

- 1) Hjulpar och boggier svänger regelbundet fram och tillbaka med en frekvens 4–8 Hz, vanligen på rakspår. Det kallas vanligen *högfrekvent instabilitet* eller *boggi-instabilitet*. Det ger återverkningar i form av skrammel och vibrationer uppe i vagnskorgen och kan i ogynnsamma fall även leda till höga sidokrafter S på spåret. I några kända fall har till och med fordonet spårat ur. Detta fenomen uppträder främst vid *trång spårvidd* då den s.k. effektiva koniciteten mellan hjul och spår blir hög. Därför föreskrivs en viss minimispårvidd över 100 m i spårlägesnormerna. Hög hastighet medverkar till att fenomenet uppträder, men med olämpliga förhållanden kan det inträffa redan runt 100 km/h.
- 2) Både vagnskorg och boggier samverkar i svängningar med en frekvens av vanligen 1,5–3 Hz. Det kallas ibland för *lågfrekvent instabilitet* eller *korg-instabilitet*. Det inträffar vanligen vid *hög rälsförhöjningsbrist* (säg över 120 á 150 mm), när vagnsfjädringens progressiva sidostopp kommer i ingrepp och ger en hög resulterande styvhet för fjädringen i sidled mellan korg och boggi. Hög hastighet, allt annat lika, medverkar till att fenomenet uppträder, men med olämpliga förhållanden kan det inträffa redan runt 160 km/h. Risken för lågfrekvent instabilitet är huvudorsaken till att rälsförhöjningsbristen enligt TSI begränsas till 100 mm vid hastigheter över 300 km/h.

Instabil gång enligt någon av typerna ovan har *inget samband med spårläget*. Ibland har särskilt typ 2) tolkats som att spårläget behöver förbättras. I godkännandeprocessen för nya fordon enligt EN 14363 [19] ingår prov för att visa att fordonet inte uppvisar instabilitet.

4.3 Hur bra är moderna ballastspår?

Utvärderingarna i avsnitt 4.2.1 har visat att *spårlägesfelen på de utvärderade delsträckorna i de allra flesta fall är mindre än de preliminära gränsvärden som finns i EN [15, 16] och Trafikverkets TDOK 2013:0347 [17]*.

Vi har då antagit att spårlägeskraven i de flesta fall inte kommer att skärpas för hastigheter över 300 km/h utöver nu gällande TDOK. För hastigheter över 300 km/h har vi utgått från remissförslaget till EN [16] som innebär en viss skärpning av kraven jämfört med hastigheter upp till 300 km/h, dock ingen stor skärpning. Trafikverkets gällande TDOK har redan i lägre hastigheter (över 160 upp till 250 km/h) i regel hårdare krav än både gällande EN såväl som EN:s remissutgåva för hastigheter över 300 km/h.

Undantaget från ovanstående är de långvägiga felen med våglängder 25–70–150 m. EN:s remissutgåva föreslår här en skärpning av kraven för våglängder upp till 70 m. Detta måste rimligen gälla även för kommande uppdateringar av TDOK för högre hastigheter, förutsatt att kraven i EN:s remissutgåva kommer att fastställas. För våglängder 70–150 finns inga krav i EN, eftersom sådana krav främst gäller komforten i fordonen. Det senare har EN inga synpunkter på, utan här får nationella krav fastställas. Vi föreslår i Bilaga 2 gränsvärden för sidoläget i området 70–150 m, både som punktfel och standardavvikelse. Utvärderingarna i avsnitt 4.2.1 visar att nuvarande moderna spår, underhållna på traditionellt sätt, klarar även dessa föreslagna gränsvärden med god marginal.

De utvärderingar som visas i avsnitt 4.2.1 avser prov över utvalda provsträckor med någorlunda konstanta och för proven intressanta förhållanden. Som ett komplement till detta kommer vi nu att undersöka spårlägesfel över en längre sträcka med modernt spår och banunderbyggnad, som inkluderar provsträckorna men som totalt är betydligt längre.

Den undersökta banan är de nybyggda delarna av Uppsala–Gävle, nedspåret, närmare bestämt mellan 'Samnan' (km 7) till 'Skutskär' (km 96). Vi upprepar här vad som sades om denna bana i avsnitt 4.2.

Banan nybyggdes i början på 2000-talet vid dubbelspårsutbyggnad och linjeomläggningar. De nybyggda delarna hade en modern banunderbyggnad, som var c:a 5 år vid provtillfället.

- Råler: 60 kg/m
- Betongsliprar, avstånd: 65 cm
- Elastiskt mellanlägg (c:a 10 mm).

De äldre stationerna ligger i stor utsträckning kvar. På dessa platser är banunderbyggnaden av äldre datum, i de flesta fall troligen från banans anläggning på 1800-talet. Dessa har därför uteslutits ur utvärderingen, eftersom dessa platser inte motsvarar nuvarande och framtida standard för en modern banunderbyggnad. De utgör totalt en längd av c:a 9 km. Kvar står en bana med modern underbyggnad på c:a 80 km.

Detta nyare spår torde kvalitetsmässigt vara mera representativt än äldre spår för vad som kan förväntas av de framtida spåren för hög hastighet. Standarden har dock sedan början av 2000-talet förbättrats ytterligare. Bl.a. har slipersavståndet minskats från 65 till 60 cm och spårväxlarna har delvis stabiliserats med "Under Sleeper Pads". Även andra förbättringar har

gjorts. Spåren som byggs idag, liksom framtida spår, är därför sannolikt kvalitetsmässigt bättre och stabilare än det undersökta spåret.

På totalt 80 km bana med modern underbyggnad finns enstaka punktfel som är i närheten av underhållsgränserna UH1 och UH2, med de antaganden om spårlägesnormer som sagts i de tre första styckena ovan. Beträffande långvågiga fel så anges de i våglängdsområdet 25–100 m, vilket var Trafikverkets (Banverkets) standard år 2008. De långvågiga spårlägesfelen blir då något större än om våglängdsgränsen sätts till 70 m, och något mindre än om gränsen sätts till 150 m. Dåvarande riktlinje (2008) föreskrev punktfel i sidoläget på maximalt 10 mm, i höjdläget 15 mm, med underhållsåtgärd närmast svarande mot UH1.

Som jämförelse visas också EN:s föreslagna värden för "Intervention Limit" (IL). De funna spårlägesfelen redovisas i Tabell 4.2.

Tabell 4.2 Punktfel utvärderade på modern banunderbyggnad Uppsala–Gävle, 80 km.

	Antal punktfel på eller överskridande gräns				
	UH1	UH2	KRIT	EN IL low	high
Höjdläge vänster + höger (1–25 m)	10	4	0	8	2
Höjdläge (25–100 m)	0	0	0	-	-
Sidoläge (1–25 m)	8	3	0	6	0
Sidoläge (25–100 m)	0	0	0	-	-
Skevning över 6 m	3	0	0	0	0

Enligt denna utvärdering finns på den 80 km långa sträckan (med 160 000 metersvärden) c:a 20 punkter där spårläget bör justeras vid hastigheter över 300 km/h. I en tredjedel av fallen bör spårläget justeras omgående enligt den här antagna UH2-nivån för högre hastigheter. Skulle man tillämpa EN:s rekommendationer blir antalet lägre. I inget fall nås kritiska nivåer.

Vi bör notera att spåret är byggt och underhållet för maximal hastighet 200 km/h och trafikerat även av tunga godståg. Trots detta finns på hela den 80 km långa sträckan endast ett begränsat antal punktfel som skulle behöva åtgärdas vid hastigheter över 300 km/h.

Som sagts tidigare har regelverket för ballastspår skärps sedan början av 2000-talet, bl.a. genom *tätare sliperavstånd*, ökade krav vid *genomföringar av trummor* m.m. I den tekniska systemstandarden för höghastighetsbanor [4] krävs även förbättrade *övergångzoner mellan bro och bank*. I cirka hälften av fallen enligt Tabell 4.2 är spårlägesfelen lokaliserade till broar enligt noteringar i spårlägesmätningen. Dessa olika förbättringar avser att leda till ytterligare stabilisering av moderna spår jämfört med det utvärderade spåret.

Kraven på *spårväxlar* bör också beaktas. I den preliminära systemstandarden [4] är specificerat att *växlar med rörlig korsningsspets* ska användas i hastigheter över 250 km/h. Detta väntas begränsa de dynamiska stötkrafter som uppträder i växlar. "*Under Sleeper Pads*" bör öka stabiliteten. Därmed bör även spårläget i växlar kunna hållas tillräckligt bra utan att stora underhållsinsatser behöver sättas in. Vidare studier om spårväxlars stabilitet och underhåll ligger utanför detta arbete.

- Om dessa olika förbättringar – tillsammans med relativt modesta spårpåkänningar – endast leder till 25 % mindre amplitud på spårlägesfelen – ett icke bevisat men enligt vår uppfattning rimligt minimiantagande – så skulle antalet fel i Tabell 4.2 som ligger på eller överskrider gränsen UH1 minska från 21 st. till 7 st. på den 80 km långa sträckan. Inget fel skulle ligga på eller över gränsen UH2.

- Trots detta är det sannolikt att *punktvisa spårlägesjusteringar behöver ske med tätare tidsintervaller än vad som sker för lägre hastigheter*. Vissa kompletteringar av mätsystemet kan också vara önskvärda. I avsnitt 5 och 7 diskuterar vi kostnaderna.

4.4 Slutsatser

Ur genomförda analyser kan följande slutsatser dras:

- Moderna tåg med begränsad axellast och utvecklade för höga hastigheter, ger begränsade krafter på spåret. Det finns en betydande marginal gentemot gällande gränsvärden i EN 14363 [19]. Vi vet att tunga lok och godsvagnar ofta ger krafter som närmar sig gränsvärdena, även i deras lägre hastigheter, men sådana fordon kommer enligt nuvarande planer inte att framföras på höghastighetsspåren.
- Komforten med hänsyn till dynamiska accelerationer i tåget blir fullt acceptabel med lämpliga tågfordon.
- Spårläget bör uppfylla rekommendationerna för "Intervention Limit" som föreslås i EN [15, 16], eller de något mer krävande nivåerna i Trafikverkets TDOK [17]. De innebär en måttlig skärpning av de krav som finns redan för hastigheter kring 200 km/h. EN:s säkerhetsrelaterade nivå "Immediate Action Limit" är obligatorisk, men tillåter mycket sämre spårläge än vad som normalt förekommer på moderna spår. Trafikverkets TDOK ansluter till EN:s säkerhetskrav även om kraven även här i något fall har skärpts. Komplettering av normerna för långvägiga spårlägesfel (70–150 m) föreslås.
- Spårlägesfel uppstår i första hand genom sättningar, d.v.s. förändringar i höjdläget. De vertikala krafterna på spåret är här utslagsgivande. Vi noterar att även dåligt spårläge (strax över Trafikverkets nivå UH2) ger måttligt stora vertikala krafter.
- Enligt vår analys bör moderna ballastspår generellt kunna möta de krav som ställs på spårläget. Den fortgående utvecklingen av spår och banunderbyggnad – som i stor utsträckning redan har skett – verkar positivt på möjligheterna att hålla ett tillräckligt gott spårläge. Vidare, spåren kommer endast att belastas av höghastighetståg, vilka ger relativt modesta spårpåkänningar.
- Det kan finnas ett begränsat antal punktfel som inte uppfyller de nämnda rekommendationerna för höga hastigheter. Ökade insatser för punktvis spårlägesjustering kan behöva göras, åtminstone i ett inledningsskede innan spåret hunnit stabilisera sig. Detta kan ses som en del av investeringen.

Moderna ballastspår bör kunna möta de krav som ställs på spårläget i hastigheter upp till åtminstone 320 km/h. Det gäller i synnerhet som höghastighetståg ger relativt låga spårpåkänningar. En viss ökning av insatserna för spårlägeskontroll och -justering kan behöva göras jämfört med tågtrafik i lägre hastigheter.

Frankrike, Spanien och Italien använder ballastspår för hastigheter kring och strax över 300 km/h.

5. Fixerat spår eller ballastspår?

I avsnitt 3.1 har de två typerna av spår beskrivits översiktligt. *Fixerat spår* kallas också ibland *ballastfritt spår*. Internationellt används uttrycket "*slab track*". Det konventionella spåret kallas *ballastspår*, eftersom det har sliprar som ligger i ballast av makadam.

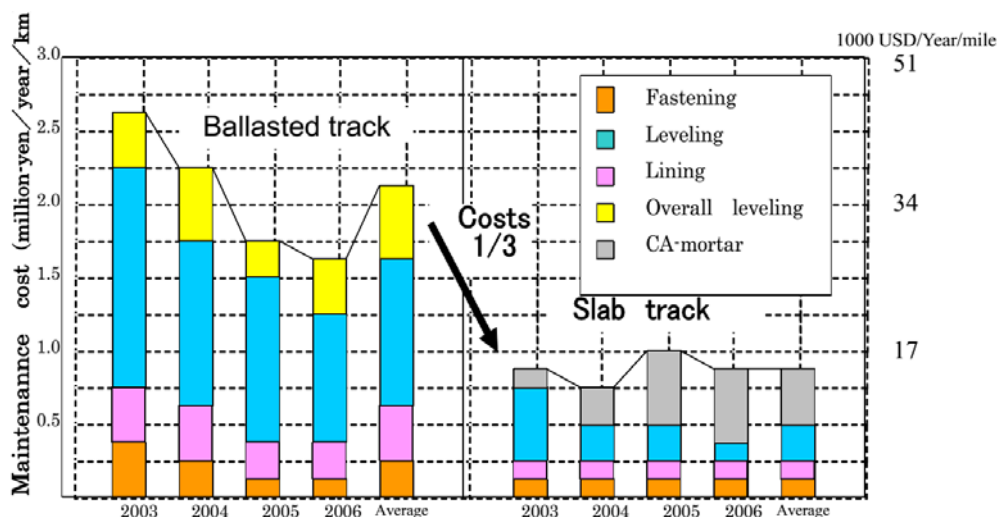
Båda typerna av spår har sina för- och nackdelar, redovisade i bl.a. [11, 12, 24]. Några av för- och nackdelarna är relevanta för de nya svenska stambanorna, andra är det inte.

5.1 Uppgivna fördelar för fixerat spår

5.1.1 Mindre underhåll

Det kontinuerliga underhållet av spårläget är betydligt mindre. Dessutom bortfaller underhåll av ballastprofilen (påfyllning av ballast, sopning av överskott m.m.). Detta är de flesta överens om. Hur stora besparingarna är, råder det dock osäkerhet kring. Det beror på vilka egenskaper de olika spårkonstruktionerna har, underhållsorganisation, maskinell utrustning, lönekostnader, sammanhängande disponibel tid i spår, m.m.

En japansk källa [25] anger att underhållskostnaden per km spår och år i deras fall minskar från i medeltal 2,12 till 0,87 miljoner JPY/km/år, se Figur 5.1. Kostnadsminskningen är betydande även om ett visst underhåll kvarstår. Figuren anger "Costs 1/3" men de redovisade medelvärdena över de 4 åren visar snarare på c:a 60 % minskning.



Figur 5.1 Jämförelse av underhållskostnader för banöverbyggnaden. Källa [25].

Översatt till svensk valuta (maj 2016) och uppräknat 1,5 % per år till 2015, motsvarar *kostnadsminskningen 114 000 SEK per spår-km och år*. Detta belopp bör dock användas med försiktighet. Vi vet inte hur stor trafiken är på de japanska banorna i jämförelse med framtida svenska banor. Generellt sett så är dock trafikomfattningen hög på japanska Shinkansen, och sannolikt är den högre än vad som förväntas på våra framtida stambanor. Dessutom, samhällsförhållanden och organisation, lagstiftning, löner m.m. skiljer sig betydligt mot vad som förekommer i Sverige och Europa. Kostnadsminskningen i procent är därför mera intressant än absolutbeloppet.

I övrigt är det svårt att få tillförlitliga uppgifter under jämförbara förhållanden. Nästan varje referens säger att underhållskostnaderna minskar men inte hur mycket. Det finns också rena gissningar. En inofficiell tysk källa säger att *underhållskostnaderna minskar som planerat, förutsatt att grundläggningen är stabil*. Mera om nödvändigheten av en stabil grundläggning behandlas i avsnitt 5.2.2.

En studie inom Banverket 2010 [24] uppskattar kostnaden för spårunderhåll i konventionellt ballastspår för hög hastighet till 134 000 kr per km spår och år, plus 30000 kr per år och växel. Spårriktning, planerad och akut, står för 66 % av detta. Omräknat till 2015 och en växel-frekvens av 0,15 per km spår blir det c:a 150 000 kr per spår-km och år. 60 % besparing p.g.a. fixerat spår blir *90 000 kr per spår-km och år*, vilket är ett något lägre värde än det japanska, men i samma storleksordning. Om vi använder ett medelvärde av 100 000 kr per spår-km, blir det totalt för hela det nya höghastighetsnätet (c:a 1500 spår-km inkl. vissa sidospår) *150 miljoner kr per år*.

- *Nuvärdet* (4 % kalkylränta och 60 års kalkylperiod) av minskat underhåll blir c:a *3400 miljoner kr*. Dessa värden bör behandlas med viss försiktighet, men ger en indikation om storleksordningen.

5.1.2 Ökad livslängd och mindre reinvesteringar

Livslängden för fixerat spår uppges enligt tyska källor bli 80 år, jämfört med 60 år för ballastspår. Detta uttalande grundar sig på tidiga laboratorieförsök i Tyskland. Osäkerheten beträffande den verkliga livslängden måste rimligen vara stor, eftersom längre tids erfarenhet saknas. Även betongkonstruktioner påverkas av ålder, belastning, fuktinträngning, konstruktionsfel m.m. Dessutom har de vinster som eventuellt uppkommer efter 60–80 år ett mycket lågt nuvärde p.g.a. diskonteringsräntan. *Argumentet ökad livslängd lämnas därför utan avseende.*

Ett argument som är relevant är att ett *spårbyte* efter c:a 30 år sannolikt medför lägre kostnader än för ett ballastspår, eftersom bara rälerna och rälsbefästningarna (inkl. dess fjädrande mellanlägg) måste bytas. Sliprar och ballast finns inte. Detta förutsätter att den fixerade spårkonstruktionen i övrigt inte behöver revideras, vilket naturligtvis är en osäkerhet. Vidare, för att behålla ballastspårets egenskaper krävs *ballastrening* och ballastkomplettering inom ungefär halva denna tid, d.v.s. c:a 15 år.

Banverkets utredning 2010 [24] beaktade dessa reinvesteringarkostnader och slutade i ett nuvärde av 3,9 miljoner kr per dubbelspårs-km. Kostnaderna synes något underskattade, varför vi här höjer beloppet till nuvärdet 5 miljoner per dubbelspårs-km, d.v.s. 2,5 miljoner per spår-km i 2015 års kostnadsnivå. För hela spårlängden på 1500 km (inkl. vissa sidospår) blir nuvärdet c:a 3800 miljoner kr. Detta är ett bruttobelopp som inte tar hänsyn till de kostnader som en förnyelse av det fixerade spåret kostar.

- Om vi antar att spårförnyelsen kostar hälften mot vad ballastspåret kostar, och ballastrening inte alls behövs, så slutar kalkylen på en kostnadsminskning för reinvesteringar av c:a 70 %. Därmed skulle *nuvärdet bli c:a 2500 miljoner* till det fixerade spårets fördel, för de planerade nya stambanorna. Även här bör de uppgivna värdena behandlas med försiktighet, eftersom de bygger på antaganden om det fixerade spårets långtidsegenskaper, vilka idag är okända.

5.1.3 Inget stensprut

Det är vanligt att tåg vintertid i Sverige samlar snö i underrede och boggier. Om inte tåget avisas och om tåget omväxlande befinner sig över och under fryspunkten, så kan den packade snön successivt omvandlas till is, eller åtminstone hård snö. När snön/isen lossnar under färd faller den ner i spåret. Om isblocket då träffar ballastens makadam, kan det slå upp stenar i underredet vilka sedan studsar tillbaka ner i spåret och slår upp flera stenar i en kedjereaktion. Detta kallas ofta *stensprut*.

En effektiv åtgärd mot stensprut är att *sänka ballastens nivå* så att dess överkant ligger 3–4 cm under sliperns övre nivå. Denna åtgärd infördes i Sverige på 1990-talet, efter det att X2000 vintertid hade visat upp tendenser till att ganska frekvent ge stensprut. Enligt underhandsuppgifter från Trafikverket och SJ har stensprutsproblemen i stort sett upphört. Det har förekommit att stensprut uppkommit om ballastnivån inte hållit föreskriven nivå.

I program Gröna Tåget uppmärksammades stensprut som ett potentiellt problem i högre hastigheter än 200 km/h [18]. Därför utfördes en serie prov där isblock (c:a 2 liter) släpptes ner i spåret från en höjd av 1–1,5 m över rälsöverkant i hastigheter upp till 250 km/h. Förloppen filmades med höghastighetskamera och mikrofoner placerades i underredet för att indikera eventuella träffar av ballaststenar mot tåget. Experimentet upprepades ett 100-tal gånger. Inga ballaststenar träffade tågets underrede så långt man kunde konstatera. Av höghastighetsfilmen framgick att isblocken varje gång studsade mot sliparna 6–8 gånger medan de successivt pulveriserades.

Hade ballasten nått upp till slipersöverkant – eller enligt tidigare praxis även legat uppe på sliparna – så hade högst sannolikt betydande stensprut uppkommit.

De fall vi refererar till ovan rör hastigheter i området 200–250 km/h, alltså betydligt lägre än de 320 km/h som planeras för de nya stambanorna. Men *risken för stensprut p.g.a. nedfallande isblock torde inte öka med ökad hastighet om ballasten ligger 3–4 cm under sliparnas överkant*. Det beror på att *isblocket träffas sliparna i en flackare vinkel ju högre hastigheten är*.

Om ballasten ligger i höjd med sliparna, eller till om med uppe på dessa, så skulle nedstickade turbulensskapande delar i tåget kunna dra upp ballaststenar. Detta är inget relevant fall.

- Vi drar slutsatsen att *stensprut sannolikt inte blir något problem i ökade hastigheter*. Däremot kommer kravet på en ganska noggrann ballastnivå att kräva vissa underhållsinsatser. Detta är rutin även idag och ingår i de underhållskostnader som tidigare redovisats i avsnitt 5.1.1.

5.1.4 Ökad stabilitet mot termiska påkänningar

När rälerna blir upphettade över den spänningsfria temperaturen uppstår tryckspänningar och tryckkrafter i rälerna. Om spåret då inte är stabiliserat kan det knäcka ut i sidled. Detta kallas populärt ofta *solkurva*. Generellt har moderna skarvfria ballastspår med tunga betongsliprar med varierande bredd och ballastskuldror i ändarna en hög stabilitet. Äldre skarvspår med lättare jämntjocka träsliprar har betydligt sämre stabilitet.

Trafikverket har i TDOK 2014:0520 [26] definierat regler och åtgärder för att säkerställa stabiliteten. Vissa arbeten anses stabilitetspåverkande, andra inte.

Vid hög solinstrålning och höga rälstemperaturer måste trafiken stabilisera spåret innan full hastighet tillåts, alternativt och som komplement kan maskinell spårstabilisering (s.k. DSS) utföras. Sommartid med mycket höga lufttemperaturer och solinstrålning kan hastighetsnedsättning vara nödvändig efter större stabilitetsnedsättande åtgärder i spåret. Det gäller t.ex. vid total spårförnyelse, växelbyten eller spårriktning med stora lägesförändringar i spåret. Om maskinell stabilisering utförs efter sådana åtgärder begränsar sig hastighetsnedsättningen i regel till den tid det tar att köra 25 000 bruttoton över spåret, vilket i de flesta fall torde vara c:a 1 dygn med den trafik som kan förutses. Vid mera normala åtgärder (t.ex. normal spårriktning) och ej extrema rälstemperaturer (maximalt 55 °C över spänningsfri temperatur) krävs ingen nedsättning av hastigheten. Detaljer finns i [26].

Vi noterar att t.ex. Spanien, Frankrike och Italien använder ballastspår i de höga temperaturer som under sommaren tidvis förekommer i dessa länder. Den spänningsfria temperaturen kan visserligen i de flesta fall läggas högre än i Sverige, men de möjliga rälstemperaturerna torde också bli betydligt högre.

Ett annat fall där höga rälstemperaturer kan förväntas är vid användning av s.k. *virvelströmsbroms*. Virvelströmsbroms används på ICE-tågen i Tyskland, men oss veterligt används sådana bromsar inte på annat håll, och planeras såvitt känt inte heller. Bromsning från höga hastigheter sker normalt huvudsakligen med elektrisk återmatande broms, vid fullbroms även med den mekaniska bromsen. I Tyskland tillåts användning av virvelströmsbroms endast på fixerat spår ("Feste Fahrbahn"). Att bygga banor för användning av virvelströmsbroms är inget krav enligt TSI/TSD, utan det är en öppen punkt som överläts till nationella beslut. I *Trafikverkets preliminära tekniska systemstandard [4]* finns i punkt 8.2.2.2 krav på att virvelströmsbroms ska kunna användas, vilket indirekt ställer krav på fixerat spår. Vi känner inte till bakgrunden till detta krav, men anser att kravet bör tas upp till nya överväganden. Det är svårt att se någon signifikant samhällsekonomisk nytta.

- *Fixerat spår är en fördel med hänsyn till stabilitet vid termiska påkänningar.* Det ger inga restriktioner i hastighet efter stora spårarbeten vid höga temperaturer. Virvelströmsbroms kan användas om behov finns. *Det är dock tveksamt om dessa fördelar är så stora att de ger signifikanta samhällsekonomiska fördelar.*

5.1.5 Mindre bygghöjd och tunnelarea

Fixerade spårkonstruktioner har i regel en mindre bygghöjd under spåret än ett ballasterat spår. Skillnaden är enligt uppgifter 0,25–0,40 m. Det ger möjlighet till en något mindre area i sprängda tunnlar; i storleksordningen 3–4 %. Om kostnaden för en sprängd dubbelspårstunnel i snitt är 300 miljoner kr per km (ungefärligt tolkat enligt [24]) skulle *besparingen kunna bli i storleksordningen 10 miljoner kr per km dubbelspårstunnel.*

5.1.6 Bättre fjädringsegenskaper?

Fixerat spår uppges ofta ha bättre fjädringsegenskaper än konventionellt ballasterat spår. Både rälsbefästningar och underlaget under betongplattan har en viss fjädring. Detta minskar de dynamiska påkänningarna i spårkonstruktionen och även i hjulen.

Även moderna ballastspår har fjädring i mellanlägggen och i eventuella "Under Sleeper Pads". Tidigare spår på betongslipers var betydligt styvare och kunde ibland ge betydande dynamiska krafter. Sverige införde redan på 1990-talet elastiska mellanlägg i nya och förnyade spår, medan t.ex. Tyskland gjorde det långt senare.

- Om man jämför med äldre spårkonstruktioner så har fixerade elastiska spår en fördel, men det är tveksamt om det ger signifikanta fördelar gentemot moderna ballastspår.

5.1.7 Ökad tillgänglighet

Det har ibland sagts att fixerat spår ger ökad tillgänglighet för banan p.g.a. minskat underhåll, så att trafiken kan bedrivas utan avbrott för underhållsåtgärder. *Detta argument synes inte relevant i vårt fall.* Man planerar att stänga av persontrafiken c:a 6 timmar varje natt. Så gör man också t.ex. i Japan och på flera andra håll. Skulle man vilja köra ett antal snabba kombi- eller posttåg på natten så bör detta kunna ske genom enkelspårdrift över de banavsnitt där underhåll sker. Det är dock inget uttalat krav idag. Vidare, underhåll över en given sträcka

väntas heller inte ske särskilt frekvent, och absolut inte varje natt. Annat underhåll, t.ex. av kontaktledning, växlar och signaler sker tidvis också, men detta är oberoende av typ av spår.

5.2 Uppgivna nackdelar för fixerat spår

5.2.1 Högre kostnader för banöverbyggnaden

Banöverbyggnaden är dyrare för fixerat spår än för ballastspår. Det finns olika uppgifter om detta varierande från 2 till 4 miljoner kr per spår-km, se bl.a. [11, 24]. Att uppgifterna skiljer sig åt är naturligt, eftersom det dels rör sig om olika konstruktioner av fixerat spår, dels avser projekt och förhållanden i olika länder. Några säkrare uppgifter för svenska förhållanden har vi inte kunnat finna. Den slutliga och verkliga kostnaden kan i bästa fall komma fram vid en upphandling inför byggskedet, även om tilläggskostnader skulle kunna uppstå i en ny och för våra förhållanden okänd spårkonstruktion.

- Merkostnaden för banöverbyggnad med fixerat spår förväntas ligga i intervallet 3 till 6 miljarder kr för hela projektet (c:a 1500 spår-km inkl. vissa sidospår).

5.2.2 Högre krav på stabil grundläggning

Det fixerade spåret har små justeringsmöjligheter när det väl är lagt och fixerat. En viss justeringsmöjlighet finns i rälsbefästningarna. I bästa fall uppgår den möjliga spårålägesjusteringen till ± 60 mm i höjded och ± 16 mm i sidled; se tidigare avsnitt 3.1. Dessa justeringsmöjligheter är dock små jämfört med de sättningar och rörelser som kan förekomma under spårets livslängd på ostabiliserad mark. Grundläggningen måste därför vara mycket stabil.

Ett ballastspår kan justeras i efterhand, i princip i hur många omgångar som helst. Vissa sättningar och rörelser i banunderbyggnaden kan därför tillåtas och stabilisering blir då inte lika omfattande.

Risken för sättningar i banunderbyggnaden för fixerat spår har anförts som ett av de viktiga skälen för den osäkerhet och risk för fördyringar som anförts av Trafikverket till Sverige-förhandlingen [3]. Totalkostnaderna har angetts inom ett intervall 190 till 320 miljarder kr mot tidigare 140–170 miljarder. Det finns enligt vår uppfattning goda skäl för denna osäkerhet och risk för fördyring, om fixerat spår ska användas.

I Tyskland undviker man numera att lägga fixerat spår där grundförhållandena är dåliga [11]. Det bestyrks även av informella kontakter.

Banverkets gjorde en studie 2010 [24] som behandlar grundläggningsfrågan relativt ingående. Man säger bl.a följande:

- Kraven på geotekniska förstärkningsarbeten blir att de i princip ska vara långsiktigt sättningfria. Spårläggning på lösa jordlager eller förstärkningsarbeten som inte sker ner till fast berg eller mycket stabila jordarter, kan ge sättningar som är betydligt större än de justeringsmöjligheter som finns i fixerade spår.
- Om grundläggningen inte är långsiktigt stabil måste mycket dyra reparationsarbeten tillgripas, alternativt rivning och nybyggnad.
- Om djupet till fast berg eller jord blir för stort, kan fixerade spår överhuvudtaget inte användas. Möjligen skulle någon form av stabilisering ändå kunna ske, men det är inte utrett (2010).

- Det finns två något förenklade fall i [24]:
 - (1) Lösa jordlager med stort djup (> 5 á 10 m) som kräver omfattande förstärkningsarbeten och stora merkostnader, sannolikt 200 – 250 000 miljoner kr i merkostnader per km fixerat dubbelspår i prisnivå 2015.
 - (2) Lösa jordlager med begränsat djup som medger urgrävning. Detta innebär relativt låga eller inga merkostnader för fixerat spår jämfört med ballastspår. Detta fall med låga merkostnader är även tillämpligt på bergtunnlar och bergskärningar.
- Fall (1) väntas ge merkostnader på c:a 215 miljoner kr per km dubbelspår, jämfört med ballastspår (2015 års prisnivå). Man har uppskattat att 50 % av banlängden består av fall (1), och då blir den genomsnittliga merkostnaden för fixerat spår c:a 110 miljoner kr per km dubbelspår, eller 55 miljoner kr per spår-km. Då är beaktat att även ballastspår i vissa fall kommer att kräva en djup och stabiliserande grundläggning. Med tanke på osäkerheten räknar vi med 'endast' 40-45 miljoner kr per spår-km i merkostnad.

Totalt för hela projektet (1500 km spår, inkl. vissa sidospår) uppskattar vi merkostnaden till c:a 65 miljarder kr. Detta är den helt dominerande källan till skillnader i kostnader mellan olika typer av spår.

Merkostnaden 65 Mdr kr är resultatet av en översiktlig bedömning och beräkning av merkostnader för grundförstärkning [24], samt vår bedömning.

- *Även om kostnadsökningen är osäker, så visar den på potentiellt mycket höga kostnader för grundläggning av fixerat spår.*

Kostnadsökningen på 65 miljarder kr enligt ovan bedömer vi vara i linje med de uppgifter som Trafikverket lämnat till Sverigeförhandlingen [6].

Även konventionellt ballastspår behöver grundförstärkningar i vissa fall. Det är dock stor skillnad på nödvändiga åtgärder i ett spår som kan efterjusteras och ett som har begränsad justeringsmöjlighet. Även riskerna i att inte grundförstärka är betydligt större för det från början fixerade spåret.

5.2.3 Ökad mängd betong – ökade miljökostnader

Fixerat spår innehåller betydande mängder betong. De olika fixerade spårkonstruktionerna har något olika mängd betong, men genomgående har de betydligt mera än vad ballastspår har. I Banverkets studie 2010 [24] uppges det fixerade spåret (modell System Rheda 2000) innehålla totalt 2,1 ton betong per spårmeter, d.v.s. 2100 ton per spår-km. Sliprarna i motsvarande ballastspåret innehåller 500 ton betong per spår-km. Enligt Trafikverkets nyligen publicerade miljörapport [27], uppges betong ha ett klimatavtryck på 0,16 ton CO_{2,ekv} per ton betong. Detta skulle då innebära ett extra klimatavtryck för fixerat spår på c:a 250 ton CO_{2,ekv} per spår-km. Det fixerade spåret innehåller också mera armering än ballastspåret, vilket ger ytterligare meravtryck. Å andra sidan ger också ballasten (makadamen) klimatavtryck, men detta avtryck torde vara mycket begränsat i sammanhanget även om ballastrening och ballastbyten beaktas.

Det ska också nämnas att det betydligt mer omfattande grundläggningsarbetet för fixerat spår ger stora meravtryck för klimatgaser.

5.2.4 Svårt och kostsamt att göra förändringar i spårgeometrin

Det är svårt att ändra geometrin i det fixerade spåret. Vid en eventuell framtida hastighetshöjning, t.ex. från 320 till 360 km/h, bör troligen rälsförhöjningen ökas. Detta är en relativt enkel åtgärd i ett ballastspår, men svårt och kostsamt i ett fixerat spår.

5.2.5 Lång avstängning efter urspårning

Generellt så är risken för urspårning med snabba tåg mycket låg. Det torde inte vara någon skillnad i urspårningsrisk för de olika spårtyperna. Fel i tåget (t.ex. axel- eller hjulbrott) kan man dock inte helt bortse ifrån. Sådana fel är inte helt ovanliga varken i Sverige eller i utlandet (exempel X2000, TGV, ICE). En risk- och konsekvensanalys bör göras.

En nackdel som framförts är att en urspårning kan leda till skador på det fixerade spåret som är mycket svåra och tidsödande att reparera. Om man tvingas gjuta ett nytt betongdäck på plats tar det minst flera veckor, innan betongen uppnått tillräcklig styrka. Det finns alltså risk för betydande och oacceptabla trafikavbrott.

Det kan finnas fixerade spår som möjliggör ett snabbt återställande. Om fixerade spår blir aktuellt, t.ex. i tunnlår, bör snabbt återställande efter urspårning vara ett urvalskriterium.

5.2.6 Höjd bullernivå

Det finns åtskilliga uppgifter om att fixerat spår ger högre bullernivåer än ballastspår. Uppgifterna varierar från 1 till 5 dB ökning av bullernivån. Det gäller då i första hand externt buller som sprids till omgivningen. Storleken på bullerhöjningen beror på vilken typ av ballastspår man jämför med. I TSI/TSD Noise [28] är det tillåtet att utföra bullerprov på fixerat spår. Tillåtna gränsvärden är då 2 dB högre än på ballastspår. Det ger en indikation på ett typiskt värde. Det är i första hand den minskade dämpningen i spåret som ger ökat buller.

I princip leder högre genererat buller till behov av ökat bullerskydd. Högre genererat buller från spåret i fallet fixerat spår leder till att andra källor måste minska eller bullret skärmas. Ofta används någon typ av bullerskärmar för att reducera buller i utsatta lägen med bebyggelse. I så fall kan det aerodynamiska bullret från tågets övre delar (strömavtagare m.m.) bli dimensionerande för det totala emitterade bullret till omgivningen. En begränsad höjning av bullret på spårnivå av 2 dB har då begränsad betydelse medan en höjning av 5 dB har en betydande effekt. Den ökade ljudavstrålningen från spåret (2 dB eller mera) kan då nödvändiggöra bullerskydd (skärmar etc.) på platser där det annars inte skulle behövas. Det är svårt att generellt göra kostnadsbedömningar för detta.

Bullret inne i tåget tenderar att öka mera än det externt emitterade bullret, p.g.a. betongdäckets högre reflektion av ljud i jämförelse med ballast. För att bibehålla en önskad bullerkomfort inne i tåget krävs en kraftigare ljudisolering i tågets golv eller ljudabsorbenter under tågets vagnar, vilket ger ökad tågvikt och kostnad. Det ligger dock utanför denna studie att kvantifiera effekterna av detta.

- Sammanfattningsvis ger fixerat spår högre bullernivåer både externt mot omgivningen och internt inne i tåget. Ökade kostnader uppkommer både i infrastrukturen och i tågen. Det är dock svårt att kvantifiera detta i exakta ekonomiska termer.

5.3 Slutsatser

Fixerat spår ger både fördelar och nackdelar jämfört med konventionellt ballastspår.

- Det är sannolikhet så att *behovet av spårunderhåll minskar* betydligt med fixerat spår, förutsatt att banans grundläggning är långsiktigt stabil. Det gäller även kostnad för ballastrening efter 15 år eller spårförnyelse efter c:a 30 år, även om de långsiktiga egenskaperna för fixerat spår inte är kända.
- Fixerat spår ger en viss ökning av *kostnaden för banöverbyggnad*, som dock är måttlig jämfört med anläggningens totalkostnad.
- Fixerade spår har små geometriska justeringsmöjligheter när det är färdigbyggt och fixerat. Justeringsmöjligheten är liten i förhållande till de sättningar som kan uppkomma i en icke stabiliserad banunderbyggnad. Konventionella ballastspår kan däremot lägesjusteras vid behov.
- Starkt ökade krav *banunderbyggnadens långsiktiga stabilitet* medför sannolikt *kraftigt ökade anläggningskostnader* för fixerade spår. På inte helt fasta jordarter måste grundläggningen sannolikt föras ner till fast berg. Kostnadsökningen för detta är mycket större än nuvärdet av inbesparade kostnader för spårunderhåll.
- I långa *bergtunnlar och bergskärningar* kan fixerat spår vara *ekonomiskt fördelaktigt*, eftersom underlaget där är stabilt. I tunnlar kan dessutom den sprängda tunnelarean i regel minskas, vilket mer än väl torde kompensera den fixerade banöverbyggnadens ökade kostnader. I vissa fixerade spårkonstruktioner kan eventuellt betongdäcket användas av räddnings- eller underhållsfordon för tillfällig åtkomst i tunnarna.
- Det är komplicerat och kostsamt att i fixerat spår *ändra spårgeometrin* – t.ex. rälsförhöjningen – efter det att spåret byggts.
- Moderna ballastspår väntas uppfylla de krav som finns, t.ex. beträffande *stensprut, termisk stabilitet och spårläge*. Andra europeiska länder med tåghastigheter kring eller strax över 300 km/h (Frankrike, Spanien, Italien) använder ballastspår. Om tveksamhet råder kan lämpligt upplagda prov utföras, i Sverige och/eller i utlandet.
- Med fixerat spår kan viss ökning av *externt bullerskydd* komma att bli nödvändigt, dock av begränsad omfattning. Effekterna *internt i tågfordonen* väntas bli större, dock ännu inte kvantifierade.
- En *urspårning* på fixerat spår kan leda till långa avstängningar i trafiken, om det kräver omläggning av betongdäcket. En riskanalys bör utföras om fixerat spår fortfarande är ett alternativ över längre sträckor.
- Övriga uppgivna fördelar eller nackdelar med fixerat spår är antingen inte relevanta i det svenska fallet, eller ger endast små effekter som är svåra att kvantifiera.

6. Flexibel bangeometri och hastighet

6.1 Allmänt

Såsom systemstandarden [4] hittills utformats förutsätts att målhastigheten 320 km/h ska gälla nästan överallt, utom vid vissa större stationer och nära banans ändar, där hastigheten ändå måste sänkas för de flesta tåg. Det leder till en förhållandevis stel linjeföring i termer av kurvradier, framför allt horisontellt men i viss mån även vertikalt. Det blir ibland svårt att manövrera i topografin, mellan höjder och vattendrag, i bebyggelse och värdefulla naturområden och mot annan infrastruktur. Resultatet av detta blir ofta tunnlar eller broar och olika krav på fördyrande anpassningar. Den lokala opinionen kan också vara kritisk och försöka stoppa föreslagen linjesträckning.

Redan i avsnitt 1 nämndes möjligheten av att anpassa banans linjeföring och hastighet till lokala förhållanden. Om en viss stel linjeföring kräver en tunnel genom ett berg eller under bebyggelse, en bro över ett vattendrag, eller en miljöanpassning genom ett värdefullt naturområde, borde det i vissa fall vara möjligt att 'gå runt' dessa 'hinder', om kurvradierna kan minskas.

Kurvradierna är givna av den hastighet som krävs, den rälsförhöjning man anlägger och den rälsförhöjningsbrist (sidoacceleration) man accepterar. Detta har utförligt beskrivits i Avsnitt 3.2. Det finns både en europeisk standard (TSI/TSD) [13] och en nationell standard (TDOK 2014:0075) [14] för detta. Den svenska standarden har hittills varit något mera restriktivt beträffande rälsförhöjning och rälsförhöjningsbrist än den sedan 2014 gällande europeiska, men den svenska standarden uppges vara under revision för en viss anpassning till TSI/TSD.

Det finns i båda standarderna en hastighetsgräns vid 300 km/h. Över denna hastighet tillåts mindre rälsförhöjningsbrist (100 mm i TSI/TSD, 80 mm i hittillsvarande TDOK) än i hastigheter upp till 300 km/h, där 153 mm tillåts. Enligt vår erfarenhet beror detta huvudsakligen på s.k. lågfrekvent instabilitet, där hög hastighet i kombination med hög rälsförhöjningsbrist riskerar att ge stötar och svängningar i sidled (se Avsnitt 4.2.3). Det finns dock legala möjligheter för nationella myndigheter att tillåta högre hastighet och rälsförhöjningsbrist, om man kan visa att en viss fordonstyp även i ökade hastigheter eller rälsförhöjningsbrister klarar de generella kraven på spårpåkänningar, komfort m.m (se textutdrag under Tabell 3.1). Komforten är dock huvudsakligen oreglerad, eftersom i regel bara krav på säkerhet och spårunderhåll strikt regleras i TSI/TSD och motsvarande EN-standarder. Det betyder dock inte att komforten för resenärerna/kunderna kan försummas.

Tanken i detta arbete är att vid behov kunna anpassa banans hastighet – och därmed kurvradier – till de lokala förutsättningarna. I första hand kan man *sänka hastigheten lokalt över en viss sträcka* – t.ex. till 300 km/h – där man annars skulle behövt bygga en fördyrande lösning (t.ex. en tunnel eller bro). Det blir då en viss körtidsförlängning; se kommande Tabell 6.1. I vissa fall – där inga hinder finns på längre sammanhängande sträckor – kan man anlägga kurvradier för t.ex. 360 km/h, vilket skulle kunna utnyttjas i framtiden om behov finns. Ett önskemål är dock att rälsförhöjningen då kan ändras (se Avsnitt 5.2.4).

En annan tanke är att *minska hastighetskraven på delsträckan Jönköping–Göteborg*, i praktiken från accelerationssträckans slut väster om Jönköping till påbörjan av inbromsning utanför Landvetter eller Mölndal. Stora delar av denna sträcka är topografiskt förhållandevis krävande. Om hastigheten i sin helhet på denna sträcka sänks från t.ex. 320 till 280 km/h, skulle körtiden i direkttågen Stockholm–Göteborg öka med endast 2,5–3 minuter. För de tåg

som gör uppehåll vid mellanstationer blir effekten mindre. För regionaltåg med maximal hastighet 250–280 km/h blir det ingen effekt alls. Denna bana (Stockholm–Jönköping–Göteborg) är sannolikt mindre känslig för restiderna än den längre sträckan Stockholm–Jönköping–Malmö–Köpenhamn. Om en sänkning av hastighetsstandarden på detta sätt är samhällsekonomiskt försvarbar eller inte bör utredas separat. Resultatet är bl.a. beroende av hur stora inbesparingar som kan göras i form av anläggningskostnader, önskat intrång m.m.

6.2 Hastighet och kurvradier

6.2.1 Horisontell bangeometri

Vi förutsätter att kurvradier anordnas så att komforten blir god och framtida hastighetsökningar möjliga där så kan ske utan signifikant ökade intrång eller kostnader. *Mindre kurvradier än de rekommenderade bör anläggas bara där kostnader eller önskat intrång kan minskas och där fördelarna överväger minskning av nyttorna.*

I hastigheter över 300 km/h föreskriver gällande TSI/TSD en rälsförhöjningsbrist av maximalt 100 mm. Detta leder till en sidoacceleration i spårplanet av $0,65 \text{ m/s}^2$. I vagnskorgen blir sidoaccelerationen något större – $0,80 \text{ m/s}^2$ – beroende på fordonets krängning över fjädringssystemet utåt i kurvan (se Avsnitt 3.2.1). Det är samma eller något lägre nivå (p.g.a. stor krängning i äldre vagnar) som för c:a 30 år sedan gällde generellt i Sverige. Detta bör ge en fullgod komfort för de resande och bör normalt användas.

I slutet av 1980-talet höjde Banverket till 150 mm rälsförhöjningsbrist för tåg Kategori B (d.v.s. de flesta resandetåg), motsvarande en typisk sidoacceleration i vagnskorgen på c:a $1,20 \text{ m/s}^2$. Detta utnyttjas idag ganska frekvent.

Vi bör i detta sammanhang notera att våra nya stambanor kommer att få en ganska hög andel kurvor; troligen inom intervallet 60–80 % av den totala linjelängden. Därför bör *normvärdet fortfarande vara 100 mm rälsförhöjningsbrist*, att anläggas där så kan ske utan signifikanta negativa konsekvenser beträffande kostnader och/eller intrång. 153 mm rälsförhöjningsbrist – som tillåts i hastigheter upp till 300 km/h enligt TSI/TSD – är ganska långtgående med hänsyn till resandekomforten, om det förekommer reguljärt i de flesta kurvor. Däremot bör det kunna *tillåtas tillfälligt i några kurvor* då och då, ungefär som man kör i vissa kurvor idag med tåg Kategori B.

Om vi förutsätter att rälsförhöjningen är maximalt 160 mm (enligt TRV TDOK 2014) och *rälsförhöjningsbristen är 100 mm* (enligt TSI/TSD) blir minsta möjliga kurvradie enligt Ekv. 3.4:

- 4647 m för 320 km/h
- 5882 m för 360 km/h (eventuellt framtida önskvärd hastighet).

Om *rälsförhöjningsbristen sätts till 80 mm* (enligt tidigare TSI/TSD, samt hittillsvarande TRV TDOK) blir minsta möjliga kurvradie:

- 5035 m för 320 km/h
- 6372 m för 360 km/h.

Hittillsvarande planering för Ostlänken (Järna–Norrköping–Linköping) har skett enligt de senare förutsättningarna, med en rekommenderad kurvradie av 6300 m. Detta är troligen svårt att ändra på nuvarande stadium utan avsevärda fördröjningar i projektet. Däremot bör de nya reglerna enligt TSI/TSD (d.v.s. 100 mm rälsförhöjningsbrist) kunna tillämpas på fortsättningen av de nya stambanorna, d.v.s. på c:a 80 % av den totala linjelängden.

Om vi accepterar mindre lokala hastighetsnedsättningar från 320 km/h till 300 eller 280 km/h blir minsta kurvradier enligt Tabell 6.1. Anordnad rälsförhöjning är 160 mm. Rälsförhöjningsbristen är 153 mm i hastigheter från 300 km/h och nedåt, att användas tillfälligt i trånga och kostnadsdrivande banavsnitt.

Tabell 6.1 anger också hur stor restidsförlusten blir per hastighetsnedsättning (p.g.a. inbromsning och acceleration) och per kilometer nedsättning. Tåget har antagits ha en driveffekt av 25 kW per ton tjänstevikt och ytterligare 15 % högre effekt i den elektriska bromsen. Det finns redan på flera av dagens tåg (bl.a. TGV och japanska N700), troligen i ökad utsträckning i framtiden.

Tabell 6.1 Minsta horisontell kurvradie och restidsförluster vid lokala hastighetsnedsättningar. L = nedsättningens längd (km); ΔS = linjeförlängning (km).
Rälsförhöjning 160 mm. Rälsförhöjningsbrist 153 mm vid hastigheter ≤ 300 km/h.

	Minsta kurvradie	Restidsförlust per hastighetsnedsättning (s)
Från 320 till 300 km/h	3393 m	$1,5 + 0,75 \cdot L + 12,0 \cdot \Delta S$
Från 320 till 280 km/h	2956 m	$5,7 + 1,60 \cdot L + 12,9 \cdot \Delta S$

Exempel 1: Tio hastighetsnedsättningar från 320 km/h till 300 km/h, totalt 60 km långa inkl. 10 % linjeförlängning, ger en restidsförlust av 126 s, d.v.s. drygt 2 minuter.

Exempel 2: Sju hastighetsnedsättningar från 320 km/h till 300 km/h, plus tre till 280 km/h, också totalt 60 km långa inkl. 10 % linjeförlängning (d.v.s. totalt 6 km), ger en restidsförlust av 159 s, d.v.s. drygt 2,5 minuter.

I exemplen ovan har hastigheten satts ner på totalt c:a 60 km av banlängden. Det förutsätts att avståndet mellan nedsättningarna är så långa att tåget hinner återfå den normala hastigheten. Accelerationssträckan från 300 till 320 km/h är c:a 3000 m: bromssträckan (med elbroms) är c:a 1200 m. Från 280 km/h till 320 är accelerationssträckan c:a 5300 m och bromssträckan med elbroms är 2400 m.

- Att optimera hastighet och bangeometri innebär att man lokalt har gjort anpassningar så att signifikanta kostnader eller intrång har kunnat inbesparas, i regel genom att undvika eller minska längden av tunnlar, broar och miljöanpassningar. Hur stora kostnader eller andra olägenheter som kan inbesparas måste avgöras från fall till fall. Det är bara i vissa lägen som en förbättring är möjlig. Det beror på lokala betingelser: topografi, vattendrag, bebyggelse, naturområden m.m. enligt vad som tidigare sagts.
- Restidsförluster och därigenom minskade nyttor bör samhällsekonomiskt ställas mot besparingarna i varje enskilt fall.

6.2.2 Ökning av hastigheten i framtiden

I Trafikverkets rekommendation om kurvradier m.m. [4, 5] finns en delvis uttalad önskan om att i framtiden kunna öka hastigheten från 320 till 360 km/h. Detta skulle kunna ge en minskning av restiden Stockholm–Malmö–Köpenhamn med c:a 10 minuter, förutsatt att tågen anpassas för denna hastighet. Utan att gå in på samhällsekonomiska resonemang och kalkyler synes detta vara en rimlig ansats. Naturligtvis får de eventuella framtida vinsterna av detta inte leda till stora extra kostnader i nuläget, eller rättare: nuvärdet av de framtida diskonterade vinsterna får inte understiga den extra kostnaden i anläggningskedet. Frågan är hur en möjlig optimal lösning kan se ut.

Av den tekniska systemstandarden [4] framgår vid en närmare kontroll att man antagit att dagens regler beträffande rälsförhöjning och rälsförhöjningsbrist kommer att gälla även i framtiden. Detta är inte sannolikt. Det finns flera möjligheter att förbättra och optimera både med avseende på bana och fordon:

- (1) Rälsförhöjningen kan öka från 160 till 180 mm. Detta är tillåtet även i den TSI/TSD som gäller från 2014 [13]. Detta har visats i Tabell 3.1.
- (2) Rälsförhöjningsbristen kan för hastigheter över 300 km/h tillåtas öka från 100 mm till åtminstone 150 mm, troligen 180 mm. Denna utveckling på fordonssidan är i stor utsträckning redan ett faktum.

Beträffande punkten (2) så krävs för det första *aktiv sidofjädring* – "Active Lateral Suspension". Det finns idag på nyare japanska tåg för Shinkansen, i syfte att ge en lugnare gång i spåret, på rakspår men framför allt i kurvorna.

Aktiv sidofjädring finns också på de modernaste europeiska tågen – de nya italienska tågen ETR 1000, som sattes i reguljär drift 2015. Dessa tåg utprovas nu för en rälsförhöjningsbrist av 150 mm vid en hastighet av 350 km/h. Inom parentes kan nämnas att denna utveckling är ett resultat av programmet Gröna Tåget, där aktiv sidofjädring med mycket gott resultat utvecklades och provades. Egenskaperna på både rakspår och i kurvor var mycket goda. Rälsförhöjningsbrister på upp till 210 mm provades.

Den aktiva sidofjädringen kan kompletteras med en måttlig korglutning. Det är nödvändigt med hänsyn till resenärernas komfort om rälsförhöjningsbristen överstiger 150 å 160 mm. De japanska tågen N700 har därför en korglutning på 1–1,5 grader (X 2000 har 6,5 grader), förutom att de har aktiv sidofjädring. Högsta hastighet är 300 km/h och tillåten rälsförhöjningsbrist är 160 mm. Den resulterande sidoaccelerationen i vagnskorgen blir då $0,85 \text{ m/s}^2$, d.v.s. ungefär som vid konventionell fjädring och 100 mm rälsförhöjningsbrist.

Detta är ett stort steg på vägen mot högre prestanda. Med hänsyn till teknikens nuvarande status så är det sannolikt att man i framtiden (säg om 20–30 år) kan köra 350 å 360 km/h med rälsförhöjningsbrister upp till åtminstone 180 mm. Detta är nästan verklighet redan idag.



Figur 6.1 Italienska nya tåget ETR 1000 (till vänster) har aktiv sidofjädring och utprovas för höjd rälsförhöjningsbrist vid höga hastigheter. Japanska tåget N700 (höger) har både aktiv sidofjädring och en mindre korglutning.

Om man i framtiden anordnar en rälsförhöjning av 180 mm och tillåter samma rälsförhöjningsbrist krävs följande kurvradii:

- 4250 m för 360 km/h
- 3570 m för 330 km/h
- 3356 m för 320 km/h.

Ovanstående är en genomgång av tekniska fakta och ingen slutlig rekommendation av en viss kurvradie eller framtida hastighet. Generellt anser vi – som tidigare framförts – att möjliga kostnadsbesparingar i anläggningskedet bör ställas mot den förlängning av framtida restider som blir resultatet av mindre kurvradier med åtföljande hastighetsnedsättningar.

- Med hänsyn till de fakta som framkommit i detta och föregående avsnitt, inklusive en mycket måttlig ökning av restiderna, kan en absolut minimal kurvradie i området 3000–3600 m vara försvarbar beroende på storleken av de besparingar som kan göras.

6.2.3 Vertikal bangeometri

Som redan sagts i Avsnitt 3.2.2 ska enligt Trafikverkets TDOK [14] de vertikala kurvradierna R_v (m) bestämmas enligt nedanstående formler, där V är hastighet i (km/h):

- Rekommenderad vertikal radie $R_v = 0,30 \cdot V^2$
- Minsta vertikal kurvradie $R_v = 0,175 \cdot V^2$

Vid 320 km/h blir den rekommenderade vertikala radien 30720 m \approx 31000 m. Den rekommenderade vertikalkurvradien ger en vertikal acceleration av 0,26 m/s². Minsta tillåtna radie ger en acceleration av 0,44 m/s². Den senare accelerationen är ganska betydande och kan troligen förorsaka åksjuka på känsliga personer om den förekommer frekvent, särskilt i kombination med andra rörelser i tåget, t.ex. rollrörelser. Enstaka exponeringar ger dock sällan åksjuka.

Särskilt känsligt blir det om konvexa och konkava kurvor ligger strax efter varandra utan rak mellandel. Den totala amplituden topp-till-topp blir då 0,88 m/s². En annan effekt av detta blir att *fordonets luftfjädring sannolikt slår i botten*, när luftfjäderns reglering först har anpassat sig efter en konvex kurva och omedelbart därefter utsätts för en konkav, alternativt i omvänd ordning.

För att undvika detta bör det finnas ett tidsmässigt mellanrum med konstant lutning mellan konvexa och konkava kurvor, förslagsvis det som finns för horisontella kurvor [14]: $0,25 \cdot V$.

Exempel: Om hastigheten är 320 km/h så blir mellanrummet $0,25 \cdot 320 = 80$ m.

En annan aspekt på vertikala kurvor är att de från början bör anpassas till eventuellt höjda hastigheter i framtiden. Vertikalkurvorna blir mycket svåra att ändra i efterhand när banunderbyggnaden väl är lagd.

Om målet är att kunna höja hastigheten till 360 km/h i framtiden, bör som minimikrav gälla att vertikala kurvradien dimensioneras för den minsta tillåtna radien i 360 km/h. Kurvradien R_v blir då $0,175 \cdot 360^2 = 22700$ m. Det ger en vertikalacceleration av 0,44 m/s².

En prestandamässigt bättre lösning vore att i de flesta fall bygga för $R_v = 31000$ m. Det skulle i 360 km/h bli en vertikalacceleration av 0,32 m/s². Enstaka undantag (t.ex. till 22700 m) kan naturligtvis göras, om avsevärda kostnader kan inbesparas.

7. Kostnader och teknikval – slutsatser

Anläggningskostnader i Europa

De genomsnittliga kostnaderna för europeiska höghastighetsbanor, öppnade de senaste 10 åren och byggda för minst 300 km/h, är c:a 230 miljoner kronor per km dubbelspår i 2015 års prisnivå. Variationerna är stora, de dyraste projekten är c:a 2,5 gånger dyrare än de billigaste. Det är främst topografin (berg etc) samt bebyggelsestätheten som är kostnadsdrivande. Fixerat spår blir kostnadsdrivande om man tvingas till ett omfattande grundläggningsarbete.

Omsatt till de planerade svenska nya stambanorna (720 km nybygge) skulle denna genomsnittskostnad ge en total kostnad på c:a 165 Mdr kronor.

Anläggningskostnaderna skiljer sig också mellan olika länder, där Frankrike och Spanien har ett genomsnitt på c:a 200 miljoner kronor per km, medan Tyskland och Italien ligger c:a 60 % högre. Orsakerna till dessa skillnader har inte helt kunnat identifieras.

Det är svårt att inse varför Sverige skulle behöva få mycket högre anläggningskostnader, med sitt måttligt kuperade landskap och sin relativt låga bebyggelsestäthet och. Vinterklimatet verkar i viss mån fördyrande, men de tidigare nämnda faktorerna är gynnsamma. Skillnader i de geotekniska förutsättningarna torde finnas, men är svåra att uppskatta.

Fixerat spår

Det fixerade spåret med räler monterade på betongdäck får högre anläggningskostnader än ett konventionellt ballastspår. I förhållande till andra kostnader är merkostnaden för själva banöverbyggnaden ändå relativt måttlig; uppskattat mellan 3 och 6 Mdr kronor för hela systemet. Detta är i stort sett den merkostnad man förväntas spara in på minskat underhåll och reinvesteringar.

Problemet med det fixerade spåret är inte att själva spårdelen (banöverbyggnaden) är så mycket dyrare, utan att det kräver *en mycket stabil grundläggning*. Fixerat spår har små justeringsmöjligheter i förhållande till de sättningar och andra rörelser som kan förväntas för en grundläggning som inte är helt stabil. För att säkerställa att spåret inte rör sig och därigenom skulle kräva mycket omfattande reparationsarbeten och trafikavstängningar, måste grundläggningen i de flesta fall föras ner till fast berg. Detta riskerar att ge mycket höga kostnader.

Fixerat spår är mest fördelaktigt i långa *bergtunnlar*, där grundläggningen är garanterat stabil. troligen kan några procent av tunnelkostnaden inbesparas om den fixerade spårkonstruktionen medger ett mindre djup under spåret; då kan tunnelarean minskas något. Fixerat spår kan vara fördelaktigt även i långa *bergskärningar*, som också har en stabil grund.

Grunden till att man kräver fixerat spår är att man tror att spårläget måste vara extremt bra i hastigheter kring 300–320 km/h och att konventionellt ballastspår inte kan uppfylla dessa krav. Detta är en mycket förenklad och huvudsakligen felaktig bild.

- Höghastighetståg ger endast måttligt stora belastningar och påkänningar på spåret; tunga lok och godsvagnar ger betydligt mera. Detta innebär att ett spår för höghastighetståg försämras relativt långsamt.
- Kraven på geometriskt perfekt spårläge är måttliga i hastigheter upp till c:a 350 km/h. Det framgår bl.a. av de europeiska normerna, men även av de måttliga spårpåkänningar och skakningar (dålig komfort för resenärerna) som moderna höghastighetståg ger vid icke-perfekt spårläge.

- Ett modernt ballastspår – med de kvalitetsförbättringar som skett under senare tid – kan uppfylla de krav som finns. Ballastspår används för dessa hastigheter exempelvis i Frankrike, Spanien och Italien.

Slutsatsen är att fixerat spår – med den osäkerhet och stora kostnad som är förknippad med kravet på mycket stabil grundläggning – inte bör användas på sträckor där grundläggningen inte är naturligt stabil, t.ex. i långa tunnlar och bergskärningar. Naturligtvis behövs även konventionellt ballastspår stabiliseras på vissa ställen, men det är stor skillnad på nödvändigheten av detta om spåret kan lägesjusteras i efterhand.

En översiktlig kostnadskalkyl ger vid handen att den extra grundläggningskostnaden kan komma att belöpa sig på i storleksordningen *65 Mdr kronor för hela systemet*. Då är antaget att 50 % av banlängden kräver omfattande extra grundförstärkningar.

Flexibel bangeometri och hastighet

Hittillsvarande specifikationer säger att banan ska dimensioneras och byggas för 320 km/h, vilket förutsätts gälla nästan överallt. Det leder till en förhållandevis stel linjeföring i termer av kurvradier, framför allt horisontellt, men i viss mån även vertikalt. Det blir ibland svårt att manövrera i topografin, mellan höjder och vattendrag, i bebyggelse och värdefulla naturområden och mot annan infrastruktur. Det kan även vara svårt att manövrera runt platser med dåliga grundförhållanden. Resultatet av detta blir ofta tunnlar eller broar och olika krav på fördyrande anpassningar.

De tekniska specifikationerna leder till att den horisontella kurvradien blir 6372 m (rekommendation) ner till 5035 m (minimum). Om man tillåter lokala hastighetsnedsättningar till 300 km/h, i några fall möjligen 280 km/h, kan man tillfälligt över kritiska partier tillåta horisontella kurvradier ner till c:a 3400 resp 3000 m. Detta är i enlighet med vad de europeiska normerna tillåter. Restidsförlängningen skulle bli mycket måttlig: 10 nedsättningar till 300 km/h om 6 km vardera skulle förlänga restiden med c:a 2 minuter; görs några av nedsättningarna till 280 km/h kan restidsförlängningen bli ½ till 1 minut längre. Sådana nedsättningar bör göras där betydande kostnader kan inbesparas p.g.a. minskat antal och längd på tunnlar, broar och olika anpassningar. Samhällsekonomiska analyser kan visa hur nytta och kostnader balanserar mot varandra.

Det är inte möjligt att enkelt fastställa hur stora besparingarna kan bli. Varje enskilt fall måste bedömas och beräknas med de lokala förutsättningar som råder just där. Låt oss dock göra ett räkneexempel med enligt vår uppfattning rimliga antaganden:

Exempel: Andelen tunnlar i hela systemet (720 km nybyggt dubbelspår) antas minska från 14 % till 10 % (minskning 29 km). Andelen broar antas minska från 12 % till 9 % (22 km). Om kostnaden för tunnlar är 300 miljoner kronor per km högre än för en öppet förlagd järnväg och broar också är 300 miljoner dyrare per km, blir den totala kostnadsbesparingen totalt c:a 13 Mdr kronor. Dessutom tillkommer sannolikt besparingar för minskat behov av miljöskydd, enklare anpassning till bebyggelse, minskat behov att köra genom sättningsbenägna områden, m.m. Översiktligt skulle besparingarna totalt kunna ligga inom intervallet 15–20 Mdr kronor.

Totala effekter

Här anges översiktligt beräknade ekonomiska effekter av fixerat spår i jämförelse med konventionellt ballastspår i ett livscykelperspektiv på 60 år, avrundat till närmaste miljard kronor. Möjliga effekter av en flexibel bangeometri och hastighet anges också.

• Banöverbyggnad fixerat spår	– 6 Mdr kr (möjligen lägre)
• Spårunderhåll och reinvestering	+ 6 Mdr kr
• Extra stabil grundläggning	– 65 Mdr kr
• Flexibel bangeometri och hastighet	– 15 Mdr kr
Totalt nuvärde	– 80 Mdr kr

Nuvärden för spårunderhåll har beräknats med 4 % kalkylränta.

Den samhällsekonomiska förlusten av 2–3 minuters restidsförlängning per 500 km har översiktligt beräknats till ett nuvärde av 2,5–4 Mdr kr. Inga skatteeffekter har inkluderats

Jämfört med Trafikverkets tidigare till Sverigeförhandlingen uppgivna kostnader (medelvärde 255 Mdr kr) blir det 175 Mdr kr. Detta är endast något högre än de medelkostnader som redovisas för liknande höghastighetsbanor i övriga Europa: 165 Mdr kr för 720 km dubbelspårig bana. Osäkerheten i anläggningskostaden för ballastspår är betydligt mindre än för fixerat spår och de 175 Mdr ovan bör kunna anges som *160–190 Mdr kronor*.

Referenser

- [1] EU: *Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource-efficient transport system*. White paper, March 2011.
- [2] Nelldal B-L, Andersson E: *Mode shift as a measure to reduce greenhouse gas emissions*. Transport Research Arena, Athens 2012.
- [3] SOU 2009:74, *Höghastighetsbanor - ett samhällsbygge för stärkt utveckling och konkurrenskraft*.
- [4] Trafikverket: *Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor – Krav* (TRV TDOK 2014:0159, Version 2.0) *och Råd* (TRV TDOK 2015:0260, Version 1.0), 2015-06-30.
- [5] Trafikverket: *Övergripande krav, ny stambana*. Version 2.0, 2015-12-16.
- [6] Trafikverket: *Utbyggnadsstrategier och förhandlingsunderlag för höghastighetsjärnvägar – Underlag till Sverigeförhandlingen*. TRV Publikation 2015:241.
- [7] Estler T: *Fast Trains Worldwide*, Schiffer Publishing, 2013.
- [8] Ollivier G et al., World Bank: *High-Speed Railways in China; A Look at Construction Costs* (also including some European examples). China Transport Topics, No 9, 2014.
- [9] de Rus G (Ed.) et al.: *Economic Analysis of High Speed Rail in Europe*. Fundacion BBVA, 2009.
- [10] Trafikverket: *Banöverbyggnad – Skarvfritt spår; Krav vid byggande och underhåll*. TDOK 2013:0664.
- [11] Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Feste_Fahrbahn
- [12] Michas G: *Slab Track Systems for High-speed Railways*. KTH Division of Highway and Railway Engineering, Report TSC-MT 12:005, Stockholm 2012.
- [13] EU: *TSD Infrastruktur*. Förordning EU 1299/2014.
- [14] Trafikverket: *Banöverbyggnad - Spårgeometri*. TDOK 2014:0075.
- [15] EN 13848-5:2008+A1: *Geometric quality levels – Plain line*.
- [16] FprEN 13848-5:2015: *Geometric quality levels – Plain line, switches and crossings*.
- [17] Trafikverket: *Banöverbyggnad – Spårläge*. TDOK 2013:0347.
- [18] Andersson E: *Concept proposal for a Scandinavian high-speed train*. KTH Railway Group, Publication 12-02, 2012.
- [19] EN 14363: *Railway applications – Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Testing of running behaviour and stationary tests*, 2005.
- [20] EN 12299:2008: *Railway applications. Ride comfort for passengers. Measurement and evaluation*.
- [21] Öberg J, Andersson E, Gunnarsson J: *Track access charging with respect to vehicle characteristics*. Banverket rapport LA-BAN 2007/31.
- [22] Karis T: *Track Irregularities for High-Speed Trains – Evaluation of their correlation with vehicle response*. Report KTH AVE 2009:95, ISBN 978-91-7415-547-1, Stockholm 2009.
- [23] Andersson L: *Gröna Tåget – Regina 250 phase 3 running dynamics tests 2008*. Interfleet Technology test report 2008-12-15.
- [24] Nyström P, Prokopov A: *Banöverbyggnad för höghastighetsspår – LCC kalkyl*. Förstudie Banverket 2010.
- [25] Yokuyama A: *Infrastructure for high-speed lines in Japan*. International Practicum on Implementing High-Speed Rail in the United States, Baltimore 2011.
- [26] Trafikverket: *BVF 540:33 – Tillåtna hastigheter efter stabilitetspåverkande arbeten i spår*. TDOK 2014:0520.
- [27] Trafikverket: *Effektsamband för transportsystem – Bygg om eller bygg nytt – Kapitel 7 Miljö*, Rapport, 2016-04-01.
- [28] EU: *TSD Noise*. Förordning EU 1304/2014.

Anläggningskostnader europeiska höghastighetsbanor

Bilaga 1

Sträcka	Längd km	Öppnad	STH	Kostnad öppn-år Mdr EUR	Kostnad pris 2015 Mdr EUR	Kostnad pris 2015 milj SEK/km
Nuremberg - Ingolstadt	89	2006	300	3,4	3,82	403
Halle - Erfurt	122	2015	300	2,96	2,96	228
Vaires - Baudrecout (LGV Est - 1)	300	2007	320	6,2	6,88	216
Perpignan - Figueres (Spain)	45	2010	350	0,72	0,77	161
Villers - Petit Croix	140	2011	320	2,3	2,42	163
Connerre - Rennes	182	2015	320	3,4	3,4	176
Baudrecout - Vendenheim (LGV Est - 2)	106	2016	320	2,1	2,1	186
Tours - Bordeaux	302	2016	320	7,2	7,1	221
Cordoba - Malaga	155	2007	300	2,75	3,05	185
Madrid - Barcelona - Figueres	749	2008-13	300	14,9	16,1	202
Madrid - Valladolid	177	2007	300	4,5	4,99	265
Milano - Bologna	182	2008	300	6,4	7,4	380
Milano - Treviglio - Venedig	240	2013	300	7,3	7,6	298
Totalt ovan	2789				68,43	231
Exkluderade p.g.a. osäkerhet om korrekthet eller relevans						
Milano - Turin	125	2009	300	7,4	8,3	624
Valladolid - Leon (delvis enkelspår)	163	2015	350	1,62	1,62	93
Per land						
Tyskland						302
Frankrike						198
Spanien (exkl borttaget)						210
Italien (exkl borttaget)						334

Estler T: Fast Trains Worldwide, Schiffer Publishing, 2013.

Ollivier G, et al: High-speed Railways in China: A look at Construction Costs ,
(including some European examples), China Transport Topics, No.9, 2014

Railway Gazette International

Wikipedia för vissa kontroller

1 EUR = 9.40 SEK

Kostnadsökning 1,3 % per år

Normer för spåråläge - EN 13848-5 och Trafikverket TDOK 2013:0347

Tabell B2.1 Gränsvärden för punktfel höjdläge: (1–25 m) hos TRV; (3–25 m) i EN.

Hastighets- intervall (km/h)	Underhåll ska/bör sättas in		Övre gräns för underhåll		Säkerhetsgräns
	TRV UH1 (mm)	EN IL (low) (mm)	TRV UH2 (mm)	EN IL (high) (mm)	TRV KRIT + EN IAL (mm)
$160 < V \leq 230^{1)}$	7	9	9	14	20
$230 < V \leq 300^{2)}$	6	8	8	12	16
$300 < V \leq 360^{3)}$	--	7	--	10	14 ³⁾

1) I TRV standard endast upp till 200 km/h

2) I TRV standard i hastigheter 200–250 km/h

3) Enligt remissutgåva av EN [16]. Hastigheter över 250 km/h finns f.n. ej i TRV standard.

Tabell B2.2 Gränsvärden för punktfel sidoläge: (1–25 m) hos TRV; (3–25 m) i EN.

Hastighets- intervall (km/h)	Underhåll ska/bör sättas in		Övre gräns för underhåll		Säkerhetsgräns
	TRV UH1 (mm)	EN IL (low) (mm)	TRV UH2 (mm)	EN IL (high) (mm)	TRV KRIT + EN IAL (mm)
$160 < V \leq 230^{1)}$	4	7	6	9	12
$230 < V \leq 300^{2)}$	4	6	5	8	10
$300 < V \leq 360^{3)}$	--	5	--	7	8 ³⁾

1) I TRV standard endast upp till 200 km/h

2) I TRV standard i hastigheter 200–250 km/h

3) Enligt remissutgåva av EN [16]. Hastigheter över 250 km/h finns f.n. ej i TRV standard.

Tabell B2.3 Gränsvärden för skevning totalt över 6 m.

Hastighets- intervall (km/h)	Underhåll ska/bör sättas in		Övre gräns för underhåll		Säkerhetsgräns
	TRV UH1 (mm)	EN IL (low) (mm)	TRV UH2 (mm)	EN IL (high) (mm)	TRV KRIT, EN IAL (mm)
$160 < V \leq 230^{1)}$	9	24	13	24	25, 30 ³⁾
$230 < V \leq 300^{2)}$	9	24	13	24	20, 30 ³⁾
$300 < V \leq 360^{4)}$	--	24	--	24	30 ⁴⁾

1) I TRV standard endast upp till 200 km/h

2) I TRV standard i hastigheter 200–250 km/h

3) Första värdet enligt Trafikverket [17]; andra värdet enligt EN [15].

4) Enligt remissutgåva av EN [16]. Hastigheter över 250 km/h finns f.n. ej i TRV standard.

Övriga viktiga gränsvärden

- *Sidoläget* i våglängdsområdet 25–70 m har hos TRV i gällande TDOK [17] för hastigheter 200–250 km/h, följande gränsvärden för punktfel:
 - UH1 = 10 mm
 - UH2 = 14 mm
 - KRIT = 20 mm.

Den äldre BVF 587.02 ger ett riktvärde (ungefär motsvarande UH1) på 10 mm för hastigheter upp till 200 km/h och våglängder upp till 100 m. Den nu gällande TDOK förefaller då vara ett steg tillbaka, med hänsyn både till den högre hastigheten och till den kortare våglängden.

Bilaga 2, sidan 2

EN [15] anger motsvarande underhållsgränser vid 12, 14 och 20 mm för 230–300 km/h. Enligt remissutgåva EN [16] *bör värdena skärpas till 8, 10 resp 12 mm för 300–360 km/h*. Även gränserna för 230–300 km/h föreslås skärpta: 10, 12 resp 14 mm. Med hänsyn till det mindre våglängdsområdet i EN och i nu gällande TDOK så är EN:s föreslagna gränsvärden för 300–360 km/h liknande som riktvärden i tidigare svenska norm BVF 587.02.

Sidoläget i våglängdsområdet 70–150 m har hos TRV endast rekommenderat gränsvärde.

För hastigheter 200–250 km/h är TRV gränsvärdena för punktfel [17]:

- UH1 = 18 mm
- UH2 = 25 mm
- KRIT = 33 mm.

Som nämnts ovan ger den äldre BVF 587.02 ett riktvärde (ungefär motsvarande UH1) på 10 mm för våglängder upp till 100 m för hastigheter upp till 200 km/h.

EN har inga rekommendationer eller krav alls i det högre våglängdsområdet, eftersom det sägs att "it is not directly linked with safety, but more with vehicle ride quality". Komforten har alltså EN inga synpunkter på. I praktiken bör naturligtvis även komforten beaktas, även om det i detta fall står fritt att använda nationella normer och riktlinjer.

Vårt förslag är att gränsvärdet för UH1 sänks till 10 mm och UH2 till 13 mm, för hastigheter upp till 320 km/h. Det är samma gränsvärde som tidigare (BVF 587.02) gällde upp till 200 km/h. Med hänsyn till den ökade hastigheten (från 200 till 320 km/h) är ökningen av den övre våglängdsgränsen från 100 till 150 m logisk. Sänkningen av gränsvärdena är också logisk med hänsyn till rekommendationerna i EN:s remissutgåva [16] att sänka gränsvärdena för våglängdsområdet 25–70 m.

- *Standardavvikelsen för sidoläget* i alla våglängdsområden har varken nuvarande EN [15] eller den preliminära utökade EN [16] några rekommendationer för beträffande "Intervention Limit" (IL). För våglängdsområdet 3–25 m upp till 300 km/h finns en rekommendation om en "Alert Limit" (AL), vid 0,7 till 1,0 mm. IL brukar i andra sammanhang ligga 35–60 % högre än AL.

Eftersom kraven på punktfel i sidoläget i detta våglängdsområde preliminärt [16] är oförändrat för hastigheter 300–360 km/h jämfört med 230–300 km/h, så borde även standardavvikelsen bli oförändrad, i den mån man kommer att rekommendera något alls.

TRV TDOK [17] är mera precis och anger följande värden för våglängder 3–25 m i 200–250 km/h:

- UH1 = 0,65 mm.

TRV anger alltså ett gränsvärde (UH1) som är något lägre än det gränsvärde som preliminära EN anger som "Alert Limit". UH1-värdet är också c:a 20 % lägre än den rekommendation som gavs i program Gröna Tåget [18] (som 50-percentil eller medelvärde). Vår kommentar är att gränsvärdet UH1 kan vara rimligt som riktvärde för alla hastigheter över 200 km/h. Det borde dock kunna överskridas något utan att spårsläget omedelbart behöver justeras.

Både i EN och TRV TDOK saknas krav på standardavvikelser för våglängder 25–70 m och 70–150 m. I Gröna Tåget [18] rekommenderades följande riktvärden (UH1) för hastigheter upp till 300 km/h:

- Våglängder 25–70 m = 1,2 mm
- Våglängder 70–150 m = 2,4 mm.

Dessa gränsvärden har bedömts ge god komfort p.g.a. dynamiska accelerationer i fordonen.

Bilaga 2, sidan 3

- *Standardavvikelsen för höjdläget* uppvisar liknande förhållanden som sidoläget. EN [15] anger en icke normativ "Alert Limit" (AL) för våglängder 3–25 m på 1,0 till 1,5 mm för hastigheter upp till 300 km/h. "Intervention Limit" (IL) är i andra sammanhang c:a 35 % högre i höjdläget. Eftersom kraven på punktfel i höjdläget inte har skärps för hastigheter över 300 km/h i remissutgåvan [16], så borde även kraven på standardavvikelse bli oförändrade, i den mån man kommer att rekommendera något alls.

TRV TDOK [17] är mera precis och anger följande värden för våglängder 3–25 m i 200–250 km/h:

- UH1 = 1,15 mm.

Detta är något högre än det riktvärde som föreslogs i Gröna Tåget [18]: c:a 0,8 mm. Med hänsyn till att EN:s gränsvärde för "Intervention Limit" skulle hamna på c:a 1,35 till 2,0 mm (med 35 % uppskalning av "Alert Limit"), så förefaller TRV:s UH1-gräns vara rimlig även för hastigheter över 300 km/h.

Både i EN och TRV TDOK saknas krav på standardavvikelse för våglängder 25–70 m och 70–150 m. I Gröna Tåget [18] rekommenderades följande riktvärden (UH1) (som 50-percentil eller medelvärde) för hastigheter upp till 300 km/h:

- Våglängder 25–70 m = 1,2 mm
- Våglängder 70–150 m = 2,4 mm.

I avsaknad av precisa krav har vi alltså lämnat dessa rekommendationer. Dessa gränsvärden har bedömts ge god komfort p.g.a. dynamiska accelerationer i fordonen, och borde kunna gälla även i hastigheter över 300 km/h. Möjligen skulle riktvärdet för 25–70 m kunna höjas något, t.ex. till 1,6 mm.

- För *spårvidden* är det framför allt *minimalt* tillåtet värde på rakspår och i stora kurvor över längre sträckor (100 m) som är relevant i högre hastigheter. Detta p.g.a. risken för instabil gång (ibland kallad 'wobbling'). För hastigheter 200–250 är gränsvärdena för punktfel enligt TRV:
 - UH1 = minst 1434 mm
 - UH2 = minst 1433 mm
 - KRIT-värde anges inte.

Enligt EN bör IL-värdena (motsvarande UH) vara minst 1433 mm för 230–300 km/h och (enligt remissutgåvan) minst 1434 mm för 300–360 km/h.

Maximalt tillåten spårvidd är i något fall 1450 mm, i de flesta fall högre, d.v.s. upp till 1463 mm. Spårvidder vid dessa övre gränsvärden är inget som normalt förekommer i verkliga spår för högre hastigheter.



Järnvägsgruppen

KTH Järnvägsgruppen bedriver forskning och utbildning i spårtrafikrelaterade ämnesområden. Inom denna grupp samlas och samverkar specialister inom olika områden: tågtrafikplanering, kapacitet och ekonomi, banteknik, elektriska kraftsystem, energianvändning, spårfordon och samverkan fordon-bana. Även ljud och vibrationer, lätta konstruktioner, tribologi m.m. ingår i gruppens kompetens.

Evert Andersson är professor emeritus i järnvägsteknik vid KTH. Hans främsta forskningsområde är samverkan mellan fordon och bana. Hans bakgrund är inom industrin och han var under 1980-talet en av de ledande ingenjörerna vid utvecklingen av X2000, för att kunna köra med ökad hastighet och prestanda på befintligt spår. Han har bl.a. varit projektledare för FoU-programmet Gröna Tåget 2005–2012. Han är invald i Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA).

Mats Berg är professor i järnvägteknik vid KTH. Han arbetar framför allt inom området samverkan fordon-bana, fjädringssystem och spårfordons energianvändning, inkl. klimatavtryck. Han har tagit civilingenjör- och doktorsexamen på Lunds Tekniska Högskola samt varit postdoc på University of California at Berkeley och arbetat på ABB Traction. Han ingår f.n. i ett femårigt utbytesprogram med Southwest Jiaotong University i Chengdu i Kina.

Sebastian Stichel är professor i spårfordons dynamik vid KTH och föreståndare för KTH Järnvägsgruppen. Hans främsta forskningsområde är dynamisk samverkan mellan fordon och bana. Han har tagit civilingenjör- och doktorsexamen på TU Berlin och arbetat på Bombardier Transportation i 11 år. Han har varit gästprofessor både på University of Illinois in Urbana-Champaign i USA och på Beijing Jiaotong University i Kina.