

Järnvägssignalteknik – Signalsystem (AH2029)



Spårgeometri



Björn Kufver, Ferroplan
Anders Lindahl, KTH

© 2007, WSP Sverige AB

Kursagenda

- **Spårgeometri**
 - Definitioner (5)
 - Fordonets styrning i spåret (4)
 - Horisontalgeometri (16)
 - Vertikalgeometri (2)
 - Underhåll av spårgeometrin (1)
 - Standarder, motsv (1)

Grundläggande begrepp

▪ Spårgeometri (track geometry)

- Nominell spårgeometri / linjeföring (alignment)
 - Horisontell linjeföring (horizontal alignment)
 - Vertikal linjeföring (vertical alignment)
 - Rälsförhöjning (cant, superelevation)
 - Spårvidd, spårviddstillägg (gauge, gauge widening)
- Spårlägesfel / spårläge / spårkvalitet (track irregularities, track quality)
 - Sidlägesfel (misalignments, line)
 - Höjdlägesfel (top)
 - Skevningsfel (cant irregularities, twist)
 - Spårviddsfel (gauge irregularities)

Nominell spårgeometri – grundläggande definitioner - 1

▪ Spårlinjens definitioner

- Spårlinjen avser oftast spårmitt (track centre line)
- Spårlinjen projiceras ner på ett (plant) horisontalplan, y , x (*Easting*, *Northing*)
- Spårets längdmätning löper i horisontalplanet - inga lutande längder (chainage), s
- Spårlinjen utformas som en serie linjeföringselement som hänger ihop i tangeringspunkter (tangent point). Vid tangeringspunkterna skall det vara kontinuitet rörande
 - Koordinater x , y , z
 - Spårets bäring (bearing, direction)
 - Spårets lutning (gradient)
 - Rälsförhöjning
 - Spårvidd

Nominell spårgeometri – grundläggande definitioner - 2

- I horisontalplanet utformas spårinjen som
 - Raklinjer / rakspår (tangent track / straight track)
 - Horisontalkurvor (horizontal curves)
 - Cirkulärkurvor (circular curves, ibland "full curves")
 - Övergångskurvor (transition curves), olika typer av övergångskurvor finns
- Spårets höjd z bestäms av den vertikala linjeföringen, vilken består av
 - Konstanta lutningar (gradients)
 - Vertikalkurvor (vertical curves), antingen parabler eller cirkulära vertikalkurvor
 - Parabler: $z=A+B*s+s^2/(2*R_v)$ Lätt att kontrollberäkna
 - Cirkulära vertikalkurvor:
 $z=A-R_v*(\cos(\arcsin(\sin(\arctan(B))+s/R_v))-\cos(\arctan(B)))$

Nominell spårgeometri – grundläggande definitioner - 3

- Höjdskillnad mellan två räler tillhörande samma spår benämns rälsförhöjning h_a (cant, superelevation, D)
 - Normalt $h_a=0$ på rakspår
 - Konstant rälsförhöjning (eller $h_a=0$) i cirkulärkurvor
 - Kontinuerligt ändrar rälsförhöjning i rälsförhöjningsramper. Dessa skall normalt sammanfalla med övergångskurvor (cant transitions, superelevation ramps)
- Spårvidd mäts mellan räleras innerkanter, farkanter (gauge)
 - Normalspårvidd 1435 mm (standard gauge)
 - Nominell spårvidd > 1435 mm = bredspår (broad gauge)
 - Nominell spårvidd < 1435 mm = smalspår (narrow gauge)
 - Spårviddstilllägg i små kurvradier (gauge widening)
 - Spårviddstilllägg ändras linjärt på anslutande linjeelement

Nominell spårgeometri – grundläggande definitioner - 4

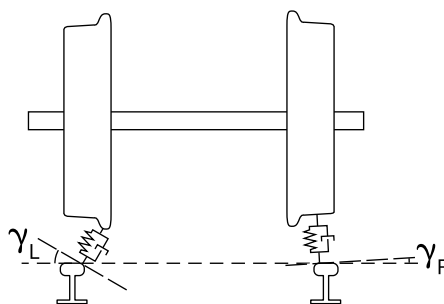
Exempel på (nominella) spårvidder

1676 mm	Bangladesh, Indien, Pakistan
1668	Spanien/Portugal
1600	Australien
1524	Finland, Ryssland
1435	Normal spårvidd
1067	Queensland, Taiwan, Sydafrika
1055	Algeriet
1000	Bolivia, Afrika, Schweiz
914	Peru, Colombia
891	Sverige
762	Mocambique
760	Grekland
610	Indien
600	Angola, England, Sverige

Fordonets styrning i spåret -1

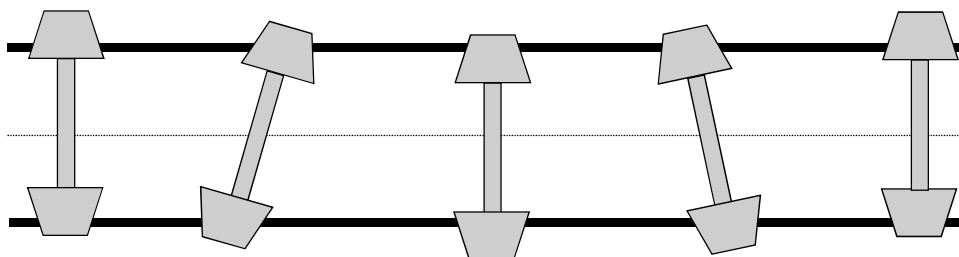
Stela hjupar (rigid wheelset)

- Hjulen snurrar med samma rotationshastighet
- Koniska hjul – sidoförskjutning av hjulparet ger rullradieffärens
- Rullradieffären matchar längdskillnaden mellan ytter- och innerräl i kurvor
- Hjulflänsen styr bara i undantagsfall
- Mycket styv kontakt mellan hjul och räl
- Andra principer finns dock (fritoterande hjul, gummihjul, ...)



Fordonets styrning i spåret - 2

- **Fria hjulpar och alltför svagt infästa hjulpar ger instabilitetsproblem på rakspår**
 - Sinusgång (hunting)
 - Åtgärdas på fordonssidan – inte genom att plocka bort rakspåren!



Järnvägssignalteknik – Signalsystem (AH2029)
© 2007, WSP Sverige AB

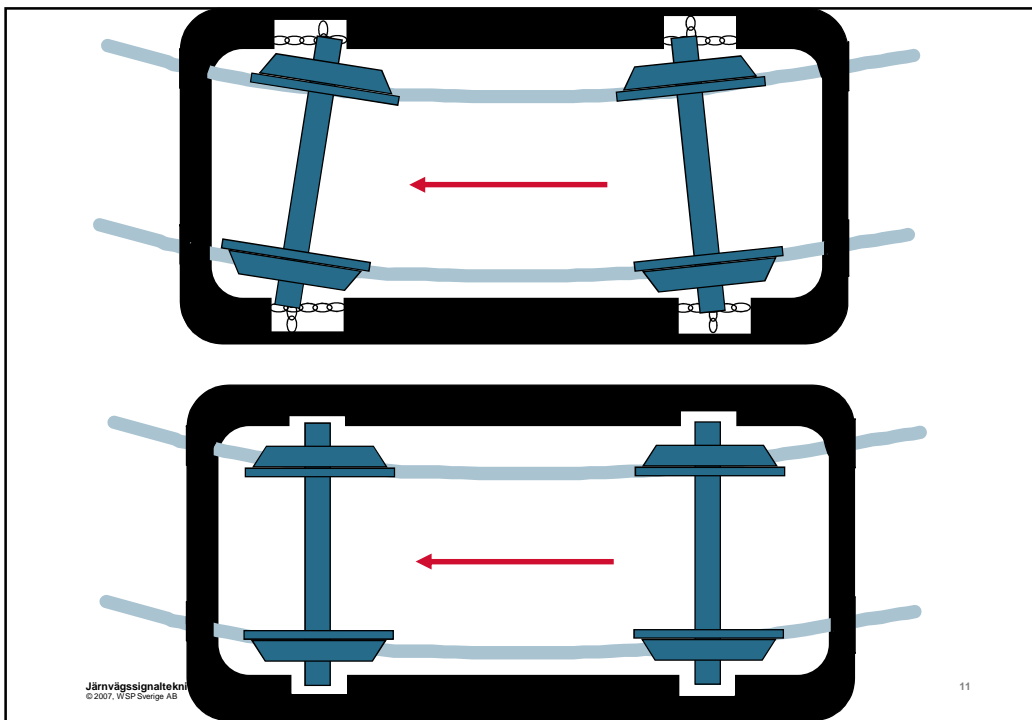
9

Fordonets styrning i spåret - 3

- **Alltför styvt infästa hjulpar ger problem med styrning i kurvor**
 - Stora lateralkrafter mellan hjul och räl (guiding forces, track shift forces)
 - Risk för spårförskjutning
 - Stort slitage av hjulflänsar och ytterråler
 - Utmattningsproblem (rolling contact fatigue, RCF, gauge corner cracking)
 - Mjuka boggier / radialstyrande boggier är vanliga i Sverige (radial steering bogies, self steering bogies)
 - Mjuka boggier ger möjlighet till högre tillåten lateracceleration i kurvor

Järnvägssignalteknik – Signalsystem (AH2029)
© 2007, WSP Sverige AB

10



Horisontalgeometri - 1

- **Horisontalgeometrin är ofta bindande för tillåten hastighet**
- **Raklinjer är den önskvärda linjelementet**
 - Ingen rälsförhöjning behövs
 - Samma rälsförhöjning ($h_g=0$) passar alla tåghastigheter
 - Enkelt att underhålla
 - Enkel inläggning av spårväxlar (turnouts), det går att lägga växlar i en horisontalkurva men det är förenat med hastighetsrestriktioner och underhållsproblem
 - Utmed plattform: Bra sikt för personal vid dörrstängning
 - Vägprojektörer föredrar kurvor med stora kurvradier pga mindre risk för bländning, uttröttning av förare, skevning för vattenavrinning:
Samlokalisering väg – järnväg kompliceras!

Horisontalgeometri - 2

▪ Cirkulärkurvor

- Horisontalradie som alla fordon skall klara = 150m (Internationellt krav)
- Minsta radie utan spårviddstillägg = 200m
- Minsta radie utan buffertförskjutningsproblem = 240m
- Minsta radie för skarvfritt spår = 250m
- Vanliga radier i spårväxlar: 190m, 300m, 500m, 760m, 1200m, 2500m
- Utmed plattform: Stora kurvradier önskas
- Hastighetsberoende krav på kurvradier

Horisontalgeometri - 2

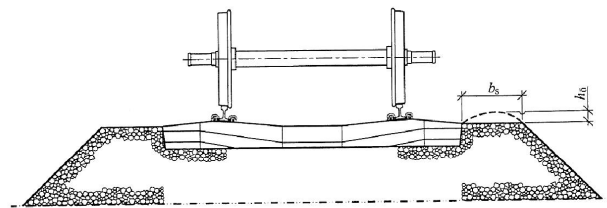


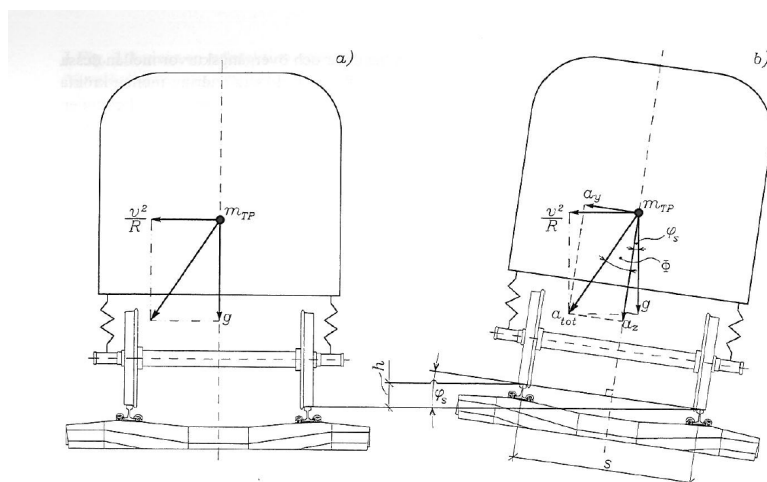
Fig. 3.13 Ballastöverhöjning krävs i snäva kurvor. Enligt Banverket krävs för skarvfritt spår:

$R \geq 500 \text{ m}$, $b_s \geq 400 \text{ mm}$,

$R < 500 \text{ m}$, $b_s \geq 550 \text{ mm}$ samt

$R < 400 \text{ m}$ $b_s \geq 550 \text{ mm}$ och $h_0 \geq 100 \text{ mm}$.

Horisontalgeometri - 3

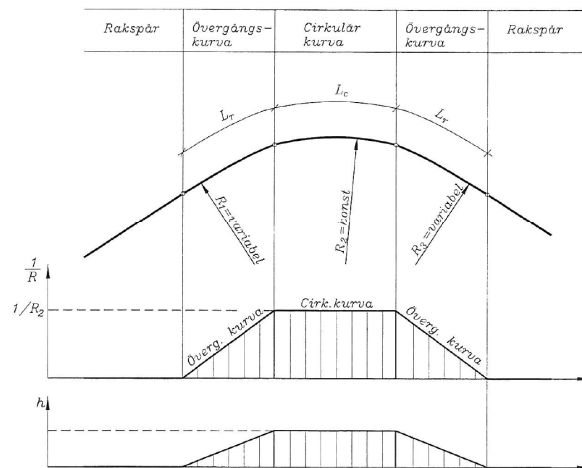


Horisontalgeometri - 3

▪ Cirkulärkurvor & rälsförhöjning - 1

- Det går att anordna en rälsförhöjning som för en horisontalradie och viss hastighet ger fullständig kompensation av lateralaccelerationen: Teoretisk rälsförhöjning h_t (equilibrium cant)
- För normalspårvidden 1435mm gäller $h_t = 11.8 \cdot V^2/R$
 h_t ges i mm, V ges i km/h, R ges i meter
- Normalt anordnas en lägre rälsförhöjning än h_t för de snabbaste tågen. Skillnaden benämns rälsförhöjningsbrist h_b och är proportionell mot lateralaccelerationen i det lutande spårplanet (cant deficiency, I)
- $h_b = h_t - h_a$
- För normalspårvidd 1435mm: Lateralacceleration (m/s^2) = $h_b/153$
- Om $h_a > h_t$ uppstår rälsförhöjningsöverskott $h_o = h_a - h_t$ (cant excess, E)

Horisontalgeometri - 4



Horisontalgeometri - 4

■ Cirkulärkurvor & rälsförhöjning - 2

- Största rälsförhöjning sätts mht lastförskjutning om tåg/arbetsmaskiner stannar i kurvan
- Största tillåtna rälsförhöjning är i Sverige 150mm. Utomlands förekommer även att 160mm och 180mm är det största tillåtna värdet
- Vid små kurvradier kan tillåten rälsförhöjning behöva begränsas pga urspårningsrisker för tåg som stannar i kurvan (för kraftig hjulavlastning av ytterhjulen)
- Låg rälsförhöjning utmed plattform, helst max 70mm
- Växlar i kurva kan också begränsa rälsförhöjningen

Horisontalgeometri - 5

▪ Cirkulärkurvor & rälsförhöjning - 3

- Största rälsförhöjningsbrist sätts med hänsyn till spårkrafter och åkkomfort
- Största tillåtna rälsförhöjningsbrist är i Sverige i normalfallet (fordon kategori A) 100mm
- För fordon med radialstyrande boggier (kategori B) gäller $h_b \leq 150\text{mm}$
- För fordon med radialstyrande boggier och korglutning (kategori S) gäller $h_b \leq 245\text{mm}$

- ERTMS ger möjlighet att signalera olika hastighetsbesked för olika tågkategorier. Systemet bygger på följande värden för tillåten rälsförhöjningsbrist: 92 - 100 - 115 - 122 - 130 - 153 - 168 - 183 - 245 - 275 - 306 mm.
- TSI har helt andra gränsvärden (trots att ERA är ansvariga för både ERTMS och TSI). Även CEN har två uppsättningar regler som är inkonsistenta.

Horisontalgeometri - 6

▪ Cirkulärkurvor & rälsförhöjning - 4

- Räkneexempel: Vad är minsta kurvradie för 200 km/h ?
 - Antag $h_a = 150\text{ mm}$
 - Kategori A-tåg
 - $h_b \leq 100\text{mm}$, dvs $h_t \leq 250\text{mm}$
 - $R_{min} = 11 \cdot V^2 / 250 = 1888\text{m}$
 - Kategori B-tåg
 - $h_b \leq 150\text{mm}$, dvs $h_t \leq 300\text{mm}$
 - $R_{min} = 11 \cdot V^2 / 300 = 1574\text{m}$ (avrundat på säkra sidan)
 - Kategori S-tåg
 - $h_b \leq 245\text{mm}$, dvs $h_t < 395\text{mm}$
 - $R_{min} = 11 \cdot V^2 / 395 = 1195\text{m}$ (avrundat på säkra sidan)
- ATC-systemet har regler för B- och S-tåg som också måste beaktas

Horisontalgeometri - 7

▪ Övergångskurvor & rälsförhöjningsramper - 1

- Mellan rakspår och cirkulärkurva, och mellan cirkulärkurvor med olika radier, skall *normalt* finnas en övergångskurva (transition curve)
- I Sverige används klotoider som övergångskurvor (clothoids)
- I klotoiden ändras spårets krökning ($1/R$) linjärt med längdmätningen (curvature)
- Därmed ändras även teoretisk rälsförhöjning h_t linjärt med längdmätningen

- Utomlands förekommer andra övergångskurvor, där spårets krökning ändras icke-linjärt. Länder där sådana övergångskurvor förekommer är exempelvis Tyskland, Österrike, Ungern, Japan.

Horisontalgeometri - 8

▪ Övergångskurvor & rälsförhöjningsramper - 2

- Mellan två spåravsnitt med olika rälsförhöjning skall *alltid* finnas rälsförhöjningsramp (cant transition / superelevation ramp)
- I Sverige används ramper där rälsförhöjningen h_a ändras linjärt med längdmätningen
- Därmed ändras även rälsförhöjningsbristen/överskottet h_b eller h_δ linjärt med längdmätningen

- Utomlands förekommer andra rälsförhöjningsramper, där rälsförhöjningen ändras icke-linjärt. Länder där detta förekommer är exempelvis Tyskland, Österrike, Ungern, Japan.

Horisontalgeometri - 9

▪ Övergångskurvor & rälsförhöjningsramper - 3

- Spårets skevhet i en rälsförhöjningsramp ger hjulavlastning på vissa hjul. Stor hjulavlastning kan leda till urspårning
- Oavsett hastighet är brantaste ramplutning $dh_d/ds=1/400$ (cant gradient)

- Spårets skevhet i en rälsförhöjningsramp ger också upphov till en rollvinkelhastighet hos hela fordonet.
- Största rampstigningshastighet dh_d/dt begränsas därför till 46mm/s för tåg av kategori A. Formeln är skriven som $L_{\geq} 6 * V * \Delta h_d / 1000$ (rate of change of cant)

- För B-tåg och S-tåg gäller mindre stränga krav

Horisontalgeometri - 10

▪ Övergångskurvor & rälsförhöjningsramper - 4

- Ändringshastigheten hos rälsförhöjningsbristen innebär att den upplevda lateralaccelerationen ändras, vilket kallas för lateralt ryck (lateral jerk)
- Största briständringshastighet dh_b/dt begränsas därför till 46mm/s för tåg av kategori A. Formeln är skriven som $L_{\geq} 6 * V * \Delta h_b / 1000$ (rate of change of cant deficiency)

- För B-tåg och S-tåg gäller mindre stränga krav

- **Viktigt:** Kraven på dh_d/ds , dh_d/dt och dh_b/dt innebär ofta att den hastighet som cirkulärkurvans radie medger inte kan nyttjas. Övergångskurvorna är för korta. Förlängning av korta övergångskurvor innebär att spåret måste flyttas i sidled (baxas).


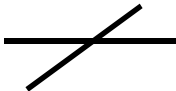
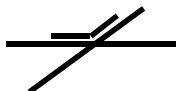
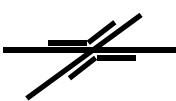
Horisontalgeometri - 11

▪ Övergångskurvor & rälsförhöjningsramper - 5

- Räkneexempel: Vad är kortaste övergångskurva mellan rakspår och $R=1888\text{m}$ vid hastigheten 200 km/h ?
 - Antag $h_a=150\text{ mm}$ i $R=1888\text{m}$ (och $h_a=0$ på rakspåret)
 - Kategori A-tåg
 - $h_b = h_t - h_a = 11.8 \cdot 200^2 / 1888 - 150 = 100\text{mm}$
 - dh_a/ds kräver $L \geq 150 / (1/400) = 60000\text{mm} = 60\text{m}$
 - dh_a/dt kräver $L \geq 6 \cdot 200 \cdot 150\text{mm} / 1000 = 180\text{m}$
 - dh_b/dt kräver $L \geq 6 \cdot 200 \cdot 100\text{mm} / 1000 = 120\text{m}$
 - Alla villkor måste vara uppfyllda vilket ger $L \geq 180\text{m}$
 - Om övergångskurvan är kortare måste h_a och V och eventuellt även h_b sänkas. En iterativ process krävs för att sänka V så lite som möjligt. Alternativt förlängs övergångskurvan.

Horisontalgeometri - 12

▪ Spårväxlar (switches and crossings) - 1

- Enkel växel (turnout) 
- Spårkorsning (diamond crossing) 
- Enkel korsningsväxel (single slip) 
- Dubbel korsningsväxel (double slip) 

Horisontalgeometri - 13

▪ Spårväxlar - 2

- Växlar med UIC60-räler finns i Sverige med radierna 300, 500, 760, 1200 och 2500 meter
- Växlar med BV50-räler finns med radierna 190, 300 och 600 meter
- Korsningsväxlar finns i Sverige enbart med radien 190 meter.
- I Sverige får enbart enkla växlar placeras i kurva
- Spårkorsningar och korsningsväxlar får enbart placeras på rakspår och får ej ha rälsförhöjning

Horisontalgeometri - 14

▪ Spårväxlar - 3

- Om en växel bockas och placeras på en horisontalkurva påverkas växelns alla spår.
- Approximativt gäller att krökningsskillnaden mellan spåren behålls
- Exempel: Växlar med nominell radie 1200m placeras i ett spår med $R=2400$ (högerkurva)
 - Om växeln har inåt avvikande spår blir radien i detta spår 800m
($1/800 - 1/2400 = 1/1200$)
 - Om växeln har utåt avvikande spår blir radien i detta spår -2400m
($-1/2400 - 1/2400 = -1/1200$)
- Principen om superposition för krökningen gäller även övergångskurvor och om växeln ligger över flera linjeföringselement
- Ofta besvärligt att hitta en rälsförhöjningen som passar bägge spåren (de har olika radier och ofta även olika tillåten hastighet)
- Även underhålls- och reservdelsproblem med krökta växlar

Horisontalgeometri - 15

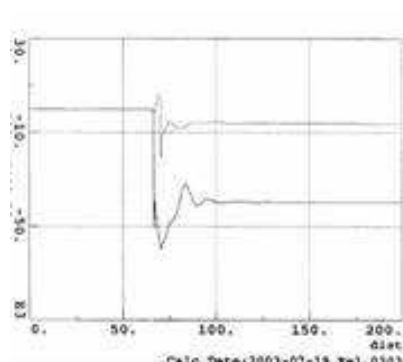
▪ Spårväxlar - 4

- Spårväxlar saknar normalt övergångskurvor
- Rälsförhöjningsbristen h_b ändras språngvis
- Där radien ändras är gränsvärdet för dh_b/dt ersatt med ett gränsvärde för språnget i rälsförhöjningsbrist Δh_b
- Vid hastigheter $V \leq 100 \text{ km/h}$ gäller $\Delta h_b \leq 100 \text{ mm}$ för alla tågkategorier. Vid högre hastighet skärps kraven
- Även utanför spårväxlar tillåts för sidotågspår att övergångskurvor saknas om det är svårt att få plats med dessa
- I anslutning till krökta växlar med rälsförhöjning kan rälsförhöjningsramper anordnas som inte sammanfaller med övergångskurva. Sådana lösningar skall dock undvikas

Horisontalgeometri - 16

▪ Spårväxlar - 5

- Exempel på simulerade laterala krafter (kN) mellan hjul och räl (två olika hjul) vid övergång från rakspår till cirkulärkurva med $R=295$ utan mellanliggande rakspår. Observera den *transienta* hjul/räl kraften innan boggien har intagit rätt sidoläge. Hastigheten är 50 km/h och $\Delta h_b = 100 \text{ mm}$



Vertikalgeometri - 1

▪ Lutningar

- Max lutning på linjen bestäms av dragkraft och tågvtikt för resp linje
- I Sverige är gränsvärden på 10 promille och 12.5 promille vanliga.
- På uppställningsspår eftersträvas 0 promille
- Citybanan i Stockholm är projekterad med 30 promille, under antagandet att enbart motorvagnståg trafikerar banan
- Utländska höghastighetsbanor är i vissa fall byggda med 25-40 promille på linjen. Det antas dels att inga tunga godståg går på en sådan bana, dels att tågen inte tappar mycket fart om gångmotståndet överstiger tillgänglig dragkraft. (Rörelseenergin beror ju av hastigheten i kvadrat)

Vertikalgeometri - 2

▪ Vertikalkurvor

- Max vertikalacceleration på grund av vertikalkurva är (i Sverige) satt till 0.482 m/s^2
- BV-kravet är formulerat som $R_v \geq V^2/6.25$
- Därtill tillkommer vertikalacceleration på grund av horisontalkurva och rälsförhöjning (och eventuell korglutning)
- I rälsförhöjningsramper och spårväxlar finns ytterligare krav på vertikalradierna (minst 3000-5000m)

Underhåll av spårgeometrin

▪ Spårlägesfel (track quality)

- Höjd, sida, skevning beror på rörelser i bankroppen och ballasten.
- Åtgärdas med spårriktmaskin (tamping machine, tamper)
 - Sidriktning / baxning (lining)
 - Höjdriktning / nivellerung (levelling)
 - Stoppning (tamping)
- Automatbax (automatic mode)
 - Spårriktmaskinens mätbas utgör en korda där pilhöjden mäts (versine)
 - Främre hjulen står på justerat spår
 - Bakre hjulen står på ojusterat spår
 - Inom mätbasen justeras spåret, pilhöjden noll eftersträvas på rakspår, om hela mätbasen befinner sig i samma cirkulärkurva eftersträvas konstant pilhöjd. I övrigt måste pilhöjden kontinuerligt ändras när maskinen arbetar sig framåt. Enbart viss felminskning erhålls. Ett bra justeringsresultat kräver extern styrning av maskinen.

Standarder (motsv)

▪ Banverket (BV)

- BVF 586.41 Tillåten hastighet m.h.t spårets geometriska form (under omarbetande till BVS)
- BVH 586.40 Spårgeometrihandboken (under omarbetande)

▪ European Committee for Standardization (CEN)

- prEN 13803-1 Track alignment design parameters – Plain line
- EN 13803-2 Track alignment design parameters – Switches and crossings and comparable alignment situations with abrupt change of curvature
- prEN 12299 Ride comfort for passengers

▪ Technical Specification for Interoperability (TSI)

▪ “ERTMS train categories”