

ONTWERP VAN DE SPOORWEGBOVENBOUW VOOR HOGE SNELHEDEN OF HOGE ASLASTEN

Prof.dr.ir. Coenraad Esveld
Hoogleraar Railbouwkunde TU Delft

- 1 Inleiding
- 2 Belastingen
 - 2.1 Dragende werking bovenbouw
 - 2.2 Laagfrequente belastingen
 - 2.3 Hoogfrequente belastingen
 - 2.4 Spanningen als gevolg van $Q = 170$ kN
 - 2.5 Samenvatting belastingen in spoorstaaf
- 3 ERRI-D161-onderzoek aslastverhoging van 20 naar 22.5 ton
 - 3.1 Aftakelingsmodellen
 - 3.2 Meetresultaten
 - 3.3 Conclusies ERRI-onderzoek
- 4 Normen hoge snelheden
 - 4.1 Relevante parameters
 - 4.2 Voertuigreacties
 - 4.3 Traceringsnormen
 - 4.4 Onderhoudsnormen
- 5 Literatuur

1. Inleiding

Belastingen als gevolg van de interactie tussen voertuig en bovenbouw, in combinatie met temperatuurinvloeden, veroorzaken spanningen en vervormingen in de bovenbouwconstructie. Deze vervormingen zijn niet alleen elastisch. Naarmate het gepasseerde tonnage groeit, nemen ook de blijvende vervormingen toe: het spoor takelt af!

Bij het opvoeren van aslast en snelheid nemen de belastingen toe en zal derhalve, indien geen verdere maatregelen worden getroffen, het aftakelingsproces worden versneld. Bij hoge snelheden zijn het vooral de massatraagheids effecten die een rol spelen. Het is dan ook essentieel om de onafgeveerde massa zo gering mogelijk te houden. De geometrische kwaliteit van het spoor speelt in alle gevallen een belangrijke rol. Bij hoge snelheden worden daaraan zeer hoge eisen gesteld, maar ook bij aslastverhogingen blijkt een betere spoorkwaliteit de nadelige effecten voor een groot deel te kunnen compenseren.

Dat men niet zonder meer van uit de conventionele spoorwegervaringen kan extrapoleren naar een systeem met hoge snelheden of hoge aslasten moge duidelijk zijn. Bij hoge snelheden, bijvoorbeeld, worden oppervlakte golven onder de trein opgewekt, die bij een slappe bodem, welke kenmerkend is voor bepaalde gebieden in West Nederland, tot interferentie met de voertuigbewegingen kan leiden. Om dit soort mach-effecten te voorkomen dienen maatregelen ter verstijving van het baanlichaam te worden aangebracht. Bij hoge aslasten verschuiven de problemen doorgaans van onderhoud aan de spoorgeometrie naar problemen met de spoorstaven als gevolg van de enorme contactspanningen tussen wiel en rail. Slijpen is dan dikwijls de enige remedie.

2. Belastingen

2.1 Dragende werking bovenbouw

De bovenbouw heeft als functie de treinbelasting over te dragen naar de ondergrond. De klassieke bovenbouw, die thans in feite nog steeds wordt toegepast, bestaat uit een discreet systeem opgebouwd uit spoorstaven, dwarsliggers en ballastbed. Het overdragen van de belasting is gebaseerd op een laagsgewijze reductie van de spanningen, zoals schematisch weergegeven in figuur 1. De hoogste spanning treedt op tussen wiel en rail in de orde van 30 kN/cm^2 . Tussen rail en dwarsligger is de spanning twee ordes kleiner en reduceert tussen dwarsligger en ballastbed opnieuw een orde tot ongeveer 30 N/cm^2 . Uiteindelijk bedraagt de spanning op de ondergrond nog slechts ongeveer 6 N/cm^2 .

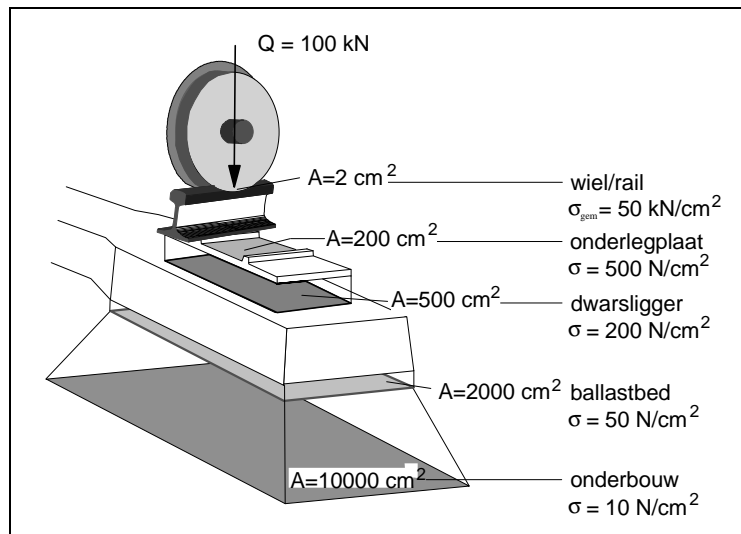


Fig. 1. Principe belastingoverdracht

2.2 Laagfrequente belastingen

Hogere snelheden en hogere aslasten vormen onderwerpen die internationaal in de belangstelling staan. Zowel ERRI als diverse spoorwegmaatschappijen hebben op dit terrein het nodige onderzoek verricht en metingen uitgevoerd. Uit deze in [6] gepubliceerde gegevens blijkt dat in rechtstanden de statische plus laag-frequente wielbelasting (97.5 %-waarde) bij locomotieven oploopt tot ongeveer 150 kN bij 250 km/h. Goederenwagens, met een aslast van 22.5 t, veroorzaken in een dergelijke situatie bij 120 km/h vergelijkbare belastingen.

In het algemeen zijn echter de belastingen in bogen maatgevend als gevolg van de niet-gecompenseerde zijdelingse versnelling. Doorgaans wordt voor deze versnelling een norm van 0.85 m/s^2 gehanteerd waarbij voldoende marge wordt geboden tegen overschrijding van het criterium van Prud'homme; de grens ligt bij ongeveer 1.1 m/s^2 . Volgens de meetresultaten van figuur 2, ontleend aan publicatie [6], wordt bij een niet-gecompenseerde versnelling van 0.85 m/s^2 een maximum Q-kracht bereikt in de orde van 170 kN.

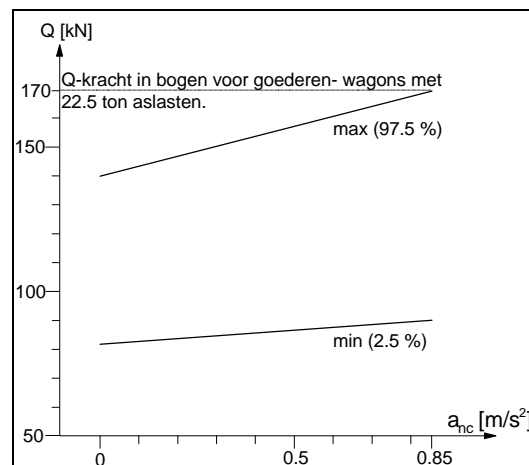


Fig. 2. Maximum wiellast in bogen

2.3 Spanningen als gevolg van $Q = 170 \text{ kN}$

De buigspanningen als gevolg van de maatgevende verticale wielbelasting van 170 kN kunnen worden berekend met behulp van de theorie van Zimmerman, welke uitgaat van een verend ondersteunde buigligger. Met deze theorie, waarvoor verder verwezen wordt naar [1], kan de spanning in de spoorstaafvoet worden beschreven volgens:

$$s_{max} = s_{gem} (1 + 3s) \quad (2)$$

$$s_{gem} = QL/W/4 \quad (3)$$

met: Q = wiellast
 L = karakteristieke lengte
 W = statisch moment van de spoorstaaf t.o.v. de voet
 s = variatiecoëfficiënt (standaardafwijking/gemiddelde)

De spanning tussen dwarsligger en ballastbed volgt uit:

$$s_{max} = s_{gem} (1 + 3s) \quad (4)$$

$$s_{gem} = Qa/(2LA) \quad (5)$$

met: Q = wiellast
 a = dwarsliggerafstand
 A = halve oppervlak tussen dwarsligger en ballastbed
 L = karakteristieke lengte
 s = variatiecoëfficiënt (standaardafwijking/gemiddelde)

$$L = [4 E I a / C / A]^{1/4} \quad (6)$$

met: E = elasticiteitsmodulus staal
 I = traagheidsmoment spoorstaaf
 C = beddingsconstante

Voor $C = 100 \text{ N/cm}^3$, $a = 60 \text{ cm}$, $A = 2850 \text{ cm}^2$, $E = 21\,106 \text{ N/mm}^2$ en gebruik makend van de spoorstaafgegevens uit [1], volgt:

| | Rail | | Ballast | |
|--------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| | σ_r [N/mm ²] | ratio | σ_B [N/mm ²] | ratio |
| UIC 60 | 97 | - | 0.21 | - |
| UIC 54 | 110 | 13% | 0.22 | 7% |
| NP 45 | 137 | 41% | 0.25 | 18% |

(7)

Een zwaarder spoorstaafprofiel heeft een grote invloed op de spanningsreductie in de spoorstaaf. Het effect op de ballastspanning bedraagt ongeveer de helft van de invloed op de spoorstaafspanning.

Daarenboven bevinden zich in de spoorstaaf residuele spanningen, in de orde van 100-300 N/mm², als gevolg van het richtproces.

2.4 Hoogfrequente belastingen

Naast deze spanningen als gevolg van laagfrequente dynamische belastingen moet men nog rekenen met hoogfrequente dynamische belastingen als gevolg van vlakke plaatsen op wielbanden en ter plaatse van slechte lassen, welke in dezelfde orde liggen als eerder genoemde spanningen. Figuur 3 toont een voorbeeld van de wielbelasting tijdens passage van wiel met een vlakke plaats met een lengte van 100 mm en een diepte van 1.5 mm.

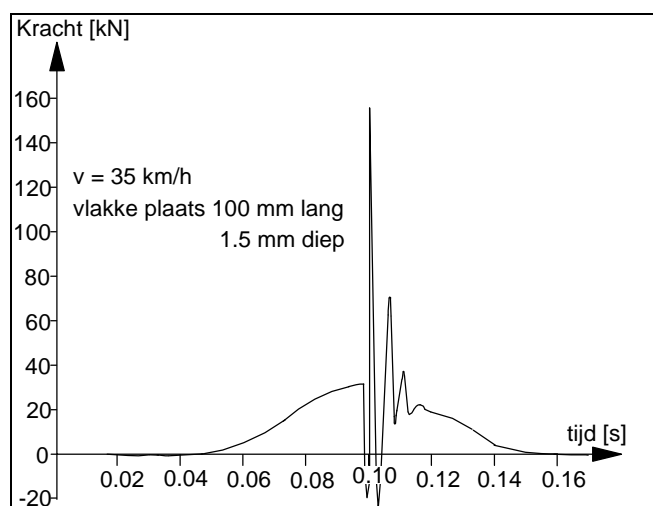


Fig. 3 Kracht tussen rail en dwarsligger tijdens passage van een wiel met een vlakke plaats

2.5 Samenvatting spanningen in de spoorstaaf

De verschillende spanningen die in de spoorstaaf kunnen optreden hebben onderstaande orde van grootte:

- buigspanningen onder invloed verticale belasting 100 N/mm²
- temperatuurbelastingen 100 N/mm²
- eigenspanningen 150 N/mm²

Voor een spoorstaafkwaliteit van 900 N/mm² ligt de vloeigrens ongeveer bij 525 N/mm², dat wil zeggen dat de som van bovenstaande spanningen al aardig in deze buurt komt. Indien door beschadigingen aan spoorstaaf of wielbanden daaraan nog eens hoogfrequente dynamische belastingen worden toegevoegd dan zal de vloeigrens al snel worden overschreden en zal het spoorstaafmateriaal vloeien. Bij hardere spoorstaven ligt de vloeigrens hoger, bij 1300 N/mm² bedraagt deze ongeveer 750 N/mm². De eigenspanningen liggen echter ook hoger, zodat het netto effect maar weinig stijgt.

3. ERRI-D161-onderzoek 22.5 t aslasten

3.1 Aftakelingsmodellen

Door de ERRI Commissie D161 is eind tachtiger jaren een onderzoek uitgevoerd naar de invloeden op de bovenbouw van een aslastverhoging van 20 t naar 22.5 t, waarbij de dynamische belastingen zijn gemeten aan goederenwagens met 20 en 22.5 t aslasten bij diverse snelheden. Met behulp van deze meetgegevens en een model voor de aftakeling van het spoor zijn de kosten geschat voor de aspecten spoorkwaliteit, aslast en snelheid.

Het aftakelingsmodel maakt gebruik van de formule:

$$E = kT^a P^b \quad (7)$$

met:

E = Aftakelingsverhouding

T = gepasseerde tonnage

P = aslast statisch plus dynamisch

k = constante

Voor de verdeling van het onderhoud zijn aannames gedaan waarbij onderstaande exponenten zijn gehanteerd:

| α | b | type |
|----------|-----|--|
| 3 | 3 | vermoeiing spoorstaven en spoorcomponenten |
| 1 | 3.5 | oppervlaktegebreken spoorstaven |
| 1 | 3 | spoorgeometrie |

De vorm van de aftakelingskromme E in relatie tot aslast en gepasseerd tonnage wordt weergegeven in figuur 4. Het equivalente tonnage voor een 22.5 t aslast volgt uit:

$$\begin{aligned} T_{eq22.5} &= \left[\frac{P_{20}}{P_{22.5}} \right]^{\frac{b}{a}} T_{20} \\ &= \left[\frac{E_{20}}{E_{22.5}} \right]^{\frac{1}{a}} T_{20} \end{aligned} \quad (8)$$

De kosten zijn omgekeerd evenredig met het gepasseerde tonnage op het moment van onderhoud en derhalve is de kostenratio voor beide aslasten gelijk aan:

$$\frac{K_{22.5}}{K_{20}} = \left[\frac{P_{22.5}}{P_{20}} \right]^{\frac{b}{a}} \quad (9)$$

Daar in de praktijk slechts een gedeelte van de aslasten een waarde van 20, c.q. 22.5 ton heeft, dienen de berekeningen te worden gemaakt met aslastverdelingen. In het algemeen geldt dat de kostenverhouding voor twee aslastverdelingen kan worden bepaald volgens:

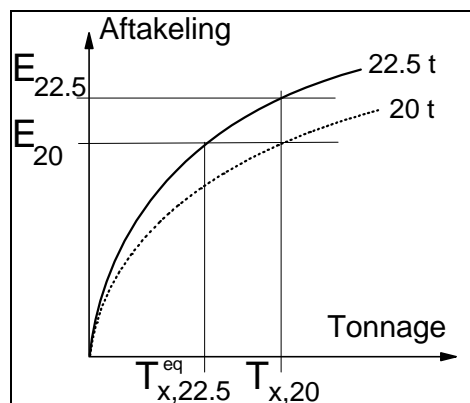


Fig. 4. Aftakelingskromme volgens ORE D141

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{\sum_i n_{2i} P_i^a}{\sum_i n_{1i} P_i^a} \quad (10)$$

waarin:

n_{2i}, n_{1i} = de dichtheid (fractie voor de klasse) behorend bij P_i ;
 P_i = aslastniveau, c.q. gemiddelde waarde per aslastklasse;

Door de ERRI commissie D161 zijn berekeningen gemaakt van kostenverhogingen als gevolg van verschillende aslastverdelingen [4], waarvan de het volgende voorbeeld daarvan zal worden besproken. De referentieverdeling bestaat uit 30 % aslasten met een waarde van 20 ton. Indien de spoorqualiteit verslechtert van 1 mm naar 2 mm standaardafwijking dan leidt dit tot een verhoging van de onderhoudskosten van 23%. Een snelheidsverhoging van 80 naar 100 km/h geeft 15% meer onderhoud. Indien de 20 t aslasten voor 2/3 worden verhoogd tot 22.5 t, dat wil zeggen 20% 22.5 t en 10% 20 t, dan stijgen de onderhoudskosten volgens het gehanteerde model met slechts 8%. De spoorqualiteit blijkt dus een relatief grote invloed te hebben.

3.2 Meetresultaten

Uit het ERRI-onderzoek kwamen snelheid en spoorqualiteit als belangrijkste parameters naar voren. Tevens blijkt een 20 tons aslast op slecht spoor aanzienlijk hogere krachten te veroorzaken dan een 22.5 tons aslast op goed spoor.

3.3 Conclusies ERRI-onderzoek

De resultaten van dit onderzoek hebben ertoe geleid dat thans in Europa de volgende criteria voor de toelating van 22.5 t aslasten bij een snelheid van 100 km/h worden gehanteerd:

- verkantingstekort kleiner dan 130 mm ($a_{nc} < 0.9 \text{ m/s}^2$);
- standaardafwijking geometrie in golfband 0 - 25 m kleiner dan 2 mm.

Hiermee blijft men tenminste 20% onder de grenswaarde van Prud'homme. Wat de eis van 2 mm standaardafwijking in de praktijk voorstelt, kan worden geïllustreerd aan de hand van de resultaten van de geometriemetingen die eveneens tijdens de D161-campagne zijn uitgevoerd. Globaal varieerde de bandbreedte van 10 % tot 90 % van de standaardafwijking tussen 0.5 mm en 3 mm. Voor het totale NS-net bedroegen deze waarden respectievelijk 0.5 mm en 1.75 mm.

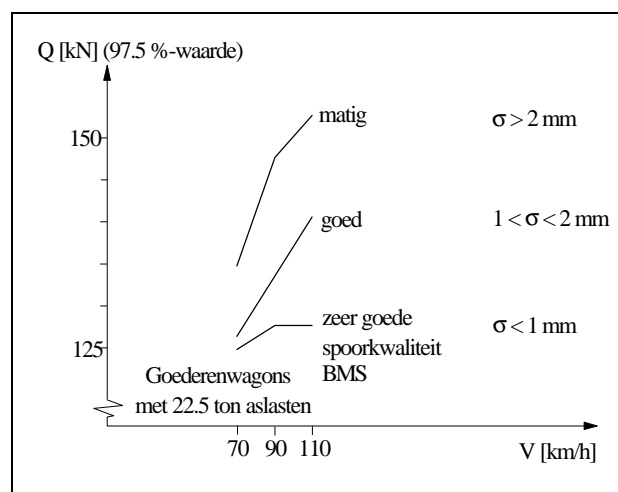


Fig. 5. Q-krachten opstellen op snelfoto van aslastenwagens

4. Hoge snelheden

4.1 Relevante parameters

Bij hoge snelheden dienen zeer nauwe toleranties in acht genomen te worden, niet alleen voor de spoorgeometrie, maar met name ook voor de spoorstaven en de wielbanden. Een goede conformiteit van wielband- en railprofiel is van groot belang, enerzijds voor de rustige loop van een voertuig, en anderzijds ter beperking van slijtage en vergroting van de standtijd van de profielen. De conformiteit is uitermate gevoelig voor kleine geometrische afwijkingen, zoals moge blijken uit de hier geschetste contactgeometrie.

Het principe van de spoorgeleiding ontleent zich aan de zogenaamde sinusloop van een wielstel in het spoor, waarbij de zijdelingse verplaatsingen beperkt blijven binnen het zogeheten spoorkanaal. Het hiervoor verantwoordelijke terugstelmechanisme bestaat dankzij de coniciteit van de wielbanden, en wordt geactiveerd bij laterale verplaatsing van een wielstel uit de middenstand.

De werkelijkheid is echter aanzienlijk gecompliceerder dan deze in 1883 door Klingel geformuleerde theorie. Met name bij hoge snelheden vormt de kritische snelheid, waarbij de stabiele loop van een voertuig verandert in een instabiele beweging, een essentiële factor welke voornamelijk afhangt van de volgende elementen:

- draaistel-massa en traagheidsmomenten welke bepalend zijn voor de eerder genoemde sinusloop;
- equivalente coniciteit;
- langs- en dwarsstijfheid van een wielstel in het draaistel-frame;
- wielbasis.

Met het spoor kan alleen de equivalente coniciteit (figuur 7) worden beïnvloed via de vorm van het dwarsprofiel van de spoorstaven, waarop impliciet de spoorstaafhelling en de spoorwijdte van invloed zijn. Spoorwijdtevergroting leidt tot een verlaging van de equivalente coniciteit. Eenzelfde effect kan worden bereikt met de inbouwelling van de spoorstaaf, waarbij een hellingsverandering van bijvoorbeeld 1 : 40 naar 1 : 20 globaal hetzelfde effect heeft als een spoorwijdtevergroting van 4 à 5 mm.

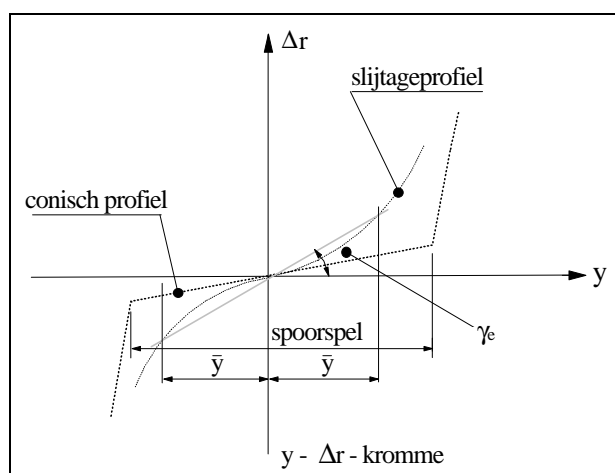


Fig.7. Y-Dr kromme, bepalend voor de coniciteit

4.2 Voertuigreacties

Waar het bij de kwaliteitsnormering om gaat, en specifiek bij hoge snelheden, is dat voertuigreacties bepaalde kritische waarden niet overschrijden. Het veiligheidsaspect komt hierbij natuurlijk op de eerste plaats. Veiligheidsnormen spitsen zich toe op incidentele gebeurtenissen waarbij piekwaarden worden begrensd. In feite gaat het hier om twee criteria:

$$\text{Prud'homme: } SY_{2m} < 0.85 [10 + 2Q/3] \quad (11)$$

$$\text{Ontsporing: } Y/Q < 1.2 \quad (12)$$

Deze basiscriteria zijn geformuleerd in termen van krachten en wel de totale krachten, dat wil zeggen statisch plus dynamisch. Hierbij is echter sprake van laagfrequente

krachten, oorspronkelijk als componenten met een golflengte groter dan 2 m. Dit wil niet zeggen dat de hogere frequenties buiten beschouwing kunnen blijven. Wel voor de veiligheid maar zeker niet als het gaat om materiaalspanningen in diverse bovenbouwcomponenten.

Voor de som van de statische en laagfrequent dynamische wiellast Q houdt de DB een maximum waarde aan van 170 kN [1,2]. In feite wordt een statische waarde gehanteerd, de zogenaamde 97,5%-waarde, waarvoor geldt dat 97.5% van de actuele waarde kleiner is.

Bij het ontwerpen van de TGV is uitgegaan van een Q-kracht van 137 kN [3,4], bestaande uit de statische waarde plus tweemaal de standaard afwijking. Wanneer men deze 67%-waarde omrekent naar een 97.5%-waarde resulteert dit in 166 kN hetgeen nageen overeenkomt met de Duitse waarde voor de ICE.

4.3 Traceringsnormen

Voor wat betreft het reizigerscomfort zijn quasi-statische versnelling en laagfrequente dynamische versnelling van belang. In extreme gevallen wordt een quasi-statische versnelling van 1.5 m/s^2 toegelaten. Zowel voor de TGV als de ICE wordt als absoluut maximum voor de totale versnelling een piekwaarde van 2.5 m/s^2 gehanteerd. Onder normale omstandigheden komen de standaardafwijkingen van bakversnellingen zelden boven 0.2 m/s^2 . Bij het ontwerp van een HSL gaat men uit van relatief lage waarden welke een goed reizigerscomfort dienen te waarborgen. Bij de tracering van ICE- en TGV-lijnen is uitgegaan van de volgende waarden in tabel 1.

| | TGV (SNCF) uniform verkeer | ICE (DB) gemengd verkeer | HSL-zuid (NS) uniform verkeer |
|---------------------------|--|---|---|
| snelheden | reizigers: TGV-SE: 270 km/h TGV-A: 300 km/h geen goederen | reizigers: ABS: 200 km/h NBS: 250 km/h goederen: 100-160 km/h | reizigers: 300 km/h minimum: 220 km/h |
| aslasten | 165 kN | 225 kN | 170 kN |
| boogstralen | 4000 m (uitz 3250 m) | ABS: gegeven NBS: 7000 m (uitz 5100 m) | 4900 m (uitz. 4250 m) |
| verkanting | 180 mm | ABS: 160 mm^1 (was 150 mm) NBS: 45 mm (uitz 65 mm) | 165 mm (toek. 180 mm) |
| verkantingstekort | 100 mm (270 km/h) 130 mm (300 km/h) | ABS: 150 mm^1 (was 130 mm) NBS: 60 mm (uitz 80 mm) | max. 70 mm (uitz. 85 mm) |
| hellingen | TGV-SE: 35 ‰ TGV-A : 25 ‰ | NBS: 12,5 ‰ | 25 ‰ |
| verticale afrondingsbogen | dalboog: 12000 m topboog: 16000 m | NBS: 25000 m | dalboog: 18000 m topboog: 20000 m |
| overgangsboog | 300 m | | 495 m (toek. 540 m) |
| spoorafstand | 4,20 m | NBS: 4,70 m | 4,5 m |
| wissels | overloopwissel 1:46 (160 km/h) splitsing 1:65 (220 km/h) | NBS: overloop 1:24,5 (130 km/h) splitsing 1:42 (200 km/h) | overloopwissel 1:47 (160 km/h) splitsing 1:62 (220 km/h) |
| kunstwerken | TGV-SE: niet nodig TGV-A : tunnels | NBS: tunnels en viaducten ²⁾ | tunnels en viaducten |

4.4 Onderhoudsnormen

Bij het spooronderhoud gaat er om de afwijkingen van de ontwerpgeometrie te corrigeren. Bij de controle van de actuele spoorligging zou het wenselijk zijn om een aantal eenvoudige criteria voor wiel/railkrachten en bakversnellingen te kunnen hanteren. Helaas is er geen eenduidige relatie tussen voertuigreacties en geometrie. Er is een onbepaald aantal geometrie-combinaties mogelijk om eenzelfde reactie te krijgen. Daarom zijn de in de praktijk gehanteerde geometrienormen grotendeels empirisch bepaald. Deze blijven doorgaans beperkt tot de 0 - 25 m golfband en luiden globaal:

- standaardafwijkingen 1 - 1.5 mm;
- piekwaarden voor hoogteligging: norm 7 mm, limiet 10 mm;
- piekwaarden andere signalen: norm 5 mm, limiet 7 mm.

De standaardafwijkingen voor conventioneel spoor liggen doorgaans in dezelfde orde, doch voor piekwaarden worden veel grotere waarden toegelaten in de orde van: norm 15 mm, limiet 20 mm. Er vinden thans internationale studies plaats om de verbanden tussen spoorgeometrie en voertuigreacties beter te modelleren teneinde instrumenten te ontwikkelen voor een meer realistische beoordeling van de spoorkwaliteit.

5. Literatuur

- [1] Esveld C.: "Modern Railway Track", MRT-Productions, ISBN 90-800324-1-7.
- [2] Esveld C.: "Principles of track Quality Recording and Assessment", Rail International/Schienen der Welt, januari 1992.
- [3] Esveld C.: "Compute-Aided Maintenance and Renewal of Track", Rail International/Schienen der Welt, juni 1991.
- [4] Esveld C. A. Jourdain, G. Kaess and M.J. Shenton: "The consequences on track maintenance of increasing axle loads from 20 to 22.5 t", Rail Engineering International, 1989/2.
- [5] Esveld C.: "In track quality control and assessment of rails", Proceedings Rail Maintenance Conference, Delft, juni 1992.
- [6] Kaess G. and Ebersbach D.: "Schnelle Züge, schwere Lasten, was sagt der Oberbau dazu?", ETR, januari 1986.
- [7] ERRI D187 RP1: "Decision Support Systems", Utrecht, najaar 1992.