

## **Geometrisch wegontwerp: oude theorieën, nieuwe inzichten**

Patrick Broeren  
ARCADIS Nederland BV  
[Patrick.broeren@arcadis.nl](mailto:Patrick.broeren@arcadis.nl)

Peter Ruijs  
TNO Defence, Security and Safety  
[peter.ruijs@tno.nl](mailto:peter.ruijs@tno.nl)

Gerald Uittenbogerd  
Rijkswaterstaat, Grote Projecten en Onderhoud (GPO)  
[Gerald.uittenbogerd@rws.nl](mailto:Gerald.uittenbogerd@rws.nl)

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk  
21 en 22 november 2013, Rotterdam**

## Samenvatting

### *Geometrisch wegontwerp: oude theorieën, nieuwe inzichten*

Centraal bij het geometrisch wegontwerp staan de karakteristieken van het voertuig, de weg en de mens, de weggebruiker. Net zoals het CVS, kennen ook de Nederlandse richtlijnen voor het wegontwerp hun oorsprong in de jaren '70 van de vorige eeuw. Voor de meeste ontwerpelementen is er sindsdien niet veel veranderd: de theorieën zijn nog identiek, de parameterwaardes ongewijzigd.

Als we kijken naar de ontwikkelingen op het gebied van voertuigtechniek, dan is het op zijn minst twijfelachtig dat we nog steeds ontwerpen met richtlijnen uit de jaren '70: de hedendaagse voertuigen zijn uitgerust met talrijke moderne veiligheidssystemen, zoals ABS en ESP, en leveren prestaties die in de vorige eeuw voor slechts het topsegment van het wagenpark haalbaar waren. Ook de gemiddelde weggebruiker van nu, kan niet meer vergeleken worden met de weggebruiker uit de vorige eeuw; de tegenwoordige weggebruiker is gewend aan grote verkeersdrukke, filerijden, hogere snelheden en complexe wegconfiguraties.

In deze bijdrage lichten we er één geometrisch ontwerpelement uit, waarvan de basis nog steeds stamt uit de jaren '70: de horizontale boog. Voor dit ontwerpelement proberen we de totstandkoming van de huidige richtlijn voor autosnelwegen te reconstrueren en beoordelen we of de vigerende richtlijn nog wel representatief is voor de huidige situatie.

Wellicht is het mogelijk om horizontale bogen krapper te ontwerpen, zonder dat de verkeersveiligheid afneemt; in perioden van economische tegenslag een interessante optie, omdat op infrastructuur veel te bezuinigen is.

In deze bijdrage wordt ingegaan op twee criteria die bepalend zijn voor de dimensionering van horizontale bogen: het slipcriterium en het kantelcriterium. Uit literatuuronderzoek en praktijkmetingen naar de dwarsstroefheid blijkt inderdaad dat de eigenschappen van de hedendaagse banden en verhardingen aanleiding geven om bogen krapper te ontwerpen. Ook onderzoek naar het kantelcriterium laat zien dat mogelijk kleinere boogstralen kunnen worden toegepast.

Om te bepalen of dit daadwerkelijk kan, is vervolgonderzoek nodig naar de verkeersveiligheid in horizontale bogen en human factors: het rijgedrag van de weggebruikers bepaalt uiteindelijk het veiligheidsniveau van een horizontale boog.

Op basis van in 2013 uit te voeren verkeersveiligheidsanalyses en onderzoek naar het rijgedrag in verbindingswegen in knooppunten zullen veiligheidsfactoren bepaald worden en kan er een nieuwe richtlijn voor het ontwerpen van horizontale bogen worden vastgesteld.

## 1. Inleiding

Centraal bij het geometrisch wegontwerp staan de karakteristieken van het voertuig, de weg en de mens, de weggebruiker. Op basis van deze kenmerken moet met een goed geometrisch wegontwerp de veiligheid en doorstroming gewaarborgd worden.

Net zoals het CVS, kennen ook de Nederlandse richtlijnen voor het wegontwerp hun oorsprong in de jaren '70 van de vorige eeuw. Voor de meeste ontwerpelementen is er sindsdien niet veel veranderd: de theorieën zijn nog identiek, de parameterwaardes ongewijzigd.



Figuur 1- De auto's uit de vorige eeuw zijn in geen enkel opzicht vergelijkbaar met de huidige...

Als we kijken naar de ontwikkelingen op het gebied van voertuigtechniek, dan is het op zijn minst twijfelachtig dat we nog steeds ontwerpen met richtlijnen uit de jaren '70: de hedendaagse voertuigen zijn uitgerust met talrijke moderne veiligheidssystemen, zoals ABS en ESP, en leveren prestaties die in de vorige eeuw voor slechts het topsegment van het wagenpark haalbaar waren. Ook de gemiddelde weggebruiker van nu, kan niet meer vergeleken worden met de weggebruiker uit de vorige eeuw; de tegenwoordige weggebruiker is gewend aan grote verkeersdrukte, filerijden, hogere snelheden en complexe wegconfiguraties.

In deze bijdrage lichten we er één geometrisch ontwerpelement uit, waarvan de basis nog steeds stamt uit de jaren '70: de horizontale boog. Voor dit ontwerpelement proberen we de totstandkoming van de huidige richtlijn voor autosnelwegen te reconstrueren en beoordelen we of de vigerende richtlijn nog wel representatief is voor de huidige situatie.

Wellicht is het mogelijk om horizontale bogen krapper te ontwerpen, zonder dat de verkeersveiligheid afneemt; in perioden van economische tegenslag een interessante optie, omdat op infrastructuur veel te bezuinigen is.

Daarnaast liggen en ook interessante vragen op het gebied van verkeersveiligheid voor: welke horizontale bogen hebben een bovengemiddeld risicocijfer en is er een relatie te leggen met de dimensionering van deze bogen?

## 2. De horizontale boog

De basis voor de dimensionering van een horizontale boog wordt gevormd door de ontwerpsnelheid: dit is de snelheid waarmee de weg veilig en vlot bereden moet kunnen worden. In een goed ontworpen boog, komen de gereden snelheden overeen met de ontwerpsnelheid. Hierbij is het belangrijk om te beseffen dat de gereden snelheden per weggebruiker sterk kunnen verschillen. Hierbij is niet zo zeer de gemiddelde snelheid interessant, maar zegt de snelheidsverdeling en bijvoorbeeld de 85-percentiel waarde van deze verdeling, veel meer over het veiligheidsniveau van de boog.

Bij het dimensioneren van bogen spelen drie criteria een rol, alle drie gerelateerd aan de ontwerpsnelheid (en de gereden snelheden):

- 1) Het slipcriterium
- 2) Het kantelcriterium
- 3) Het comfortcriterium

Per criterium volgt nu een korte toelichting, met daarbij specifieke aandacht voor de uitgangspunten en de representativiteit voor het huidige voertuigenpark en bestuurderskenmerken.

### 2.1 Het slipcriterium

De dynamica van het slipcriterium in horizontale bogen wordt beschreven met behulp van de evenwichtsformule.

$$R_h \geq \frac{\left(\frac{V_o}{3,6}\right)^2}{\left(fz + \frac{i}{100}\right)g} = \frac{V_o^2}{127\left(fz + \frac{i}{100}\right)}$$

Met:

- R<sub>h</sub> = de straal van de horizontale boog [m]
- V<sub>o</sub> = de ontwerpsnelheid [km/u]
- g = valversnelling [m/sec<sup>2</sup>]
- fz = zijdelingse wrijvingsweerstand(scoëfficient) [-]
- i = verkanting [%]

Hierin is het verband tussen de boogstraal, ontwerpsnelheid, zijdelingse wrijvingsweerstand en verkanting beschreven. De boogstraal en verkanting zijn vastgelegd in een ontwerp en vaak gebaseerd op de ontwerpsnelheid van een boog. De daadwerkelijke gereden snelheid bij bogen waar sprake is van benodigde aanpassing van de snelheid, wordt in de Nederlandse ontwerpfilosofie 'afgedwongen' door middel van de

herkenbaarheid van de boog te vergroten middels het vergroten van de verkanting. Dit in tegenstelling tot sommige situaties in het buitenland waarbij een advies- of zelfs maximumsnelheid wordt aangegeven bij scherpere (verbindings)bogen.

De maximaal beschikbare wrijvingsweerstand is afhankelijk van een aantal factoren. In normale situaties zijn de belangrijkste twee factoren de weerstand van het wegdek (afhankelijk van de stroefheid van het wegdek en externe factoren zoals een waterlaag of ijzel) en de weerstand van band. Aanspraak op de zijdelingse wrijvingsweerstand gaat ten koste van de langswrijving die nodig is voor acceleratie en deceleratie van het voertuig. Door het toepassen van een verkanting hoeft er minder aanspraak te worden gemaakt op de zijdelingse wrijvingscoëfficiënt.

Verkanting is een scheefstand van het wegdek en wordt toegepast om:

- Te voorzien in een voldoende afwatering ten tijde van neerslag
- De aanspraak op de dwarswrijving te verminderen in bogen.

Daarnaast kan (sterke) verkanting een indruk geven van de krapheid van de boog zodat gebruikers hun naderingsnelheid hierop aan kunnen passen. Deze belangen kunnen tegenstrijdig zijn zodat een afweging of optimalisatie moet worden gemaakt ten behoeve van de veiligheid.

De stroefheid van het wegdek is van groot belang voor de maximale wrijving die door het voertuig kan worden gebruikt om door de boog te komen. De stroefheid is echter niet door de weggebruiker in te schatten zodat de gebruiker vanuit moet kunnen gaan van dat de stroefheid voldoet aan een bepaalde minimumnorm. In extreme situaties (grote waterlaagdikte of ijzel) waarbij de stroefheid ernstig daalt, wordt van de gebruiker verwacht deze de gewijzigde omstandigheden voldoende kan inschatten en de snelheid voldoende aanpast (wat niet altijd voldoende gebeurt).

Om in normale situaties te voldoen aan de verwachting van de gebruikers dient het wegdek in Nederland te voldoen aan een stroefheidsnorm. Indien de stroefheid onder deze norm ligt dienen maatregelen te worden genomen.

De waarde voor de stroefheid waarmee gerekend wordt, is in de huidige richtlijnen nog steeds gebaseerd op waarden die in de jaren '70 gemeten zijn [1]. Daarbij is het niet volledig duidelijk hoe de metingen hebben plaatsgevonden en hoe de meetwaarden zijn vertaald naar grenswaarden: is er rekening gehouden met veiligheidsfactoren en, zo ja, hoe groot zijn deze dan?

Vanwege het sterke vermoeden dat de stroefheid wel eens beduidend hoger zou kunnen zijn in huidige ontwerppraktijk dan in de jaren '70, is in 2012 een meetonderzoek uitgevoerd. De aanpak en resultaten zijn beschreven in paragraaf 3.

## *2.2 Het kantelcriterium*

Ten gevolge van het op het voertuig werkende krachten tijdens het rijden, kan een voertuig niet alleen slippen, maar ook kantelen of scharen. Door het contact tussen band en wegdek worden de op het voertuigwerkende krachten in evenwicht gehouden. Zodra het evenwicht echter wordt overschreden, dan kan het voertuig kantelen (overschrijding

rolmoment) of scharen (overschrijding van dwarskracht en/of rolmoment van een deel van het voertuig waardoor de combinatie 'knikt').

Of één van beide mechanismen optreedt, is afhankelijk van de relatie en interactie tussen mens, voertuig, weg en omgeving: snelheid, rijstrookwisselingen, uitwijken, remmen, voertuig karakteristieken (grootte/massa en samenstelling van het voertuig, veersysteem, soort banden, profiel diepte), weg (grootte van de boogstraal, verkanting, spoorvorming, oneffenheden, stroefheid), menselijk handelen en omstandigheden (rijnsnelheid, rijvaardigheden, reactievermogen – en afleiding chauffeur, overig verkeer enz.) en klimatologische omstandigheden (wind, regen, enz.).

Met name bij hoge zwaarbeladen voertuigen die een boog berijden kan stabiliteitsverlies optreden door kantelen (figuur 2, links). Door de belading wordt het zwaartepunt van de vrachtwagen namelijk omhoog gebracht, zodat kantelen eerder kan optreden. Bij het doorrijden van een boog zal de kantelneiging nog worden versterkt door de verplaatsing van het zwaartepunt naar buiten.

Combinatie van een hogere (ontwerp)snelheid en de invloeden van voorafgaande bogen, rijstrookwisselingen, verkantingsovergangen wind en dergelijke, kunnen het voertuig zodanig beïnvloeden dat dit leidt tot slingeren van het voertuig. In extreme gevallen kan dit leiden tot scharen van het voertuig (figuur 2, rechts).



*Figuur 2 – Kantelen (links) en scharen (rechts)*

Voor het kantelcriterium geldt hetzelfde als voor het comfortcriterium: ook hier is het de vraag of kenmerken van de hedendaagse vrachtauto's nog overeenkomen met de basis voor de richtlijnen.

### *2.3 Comfort*

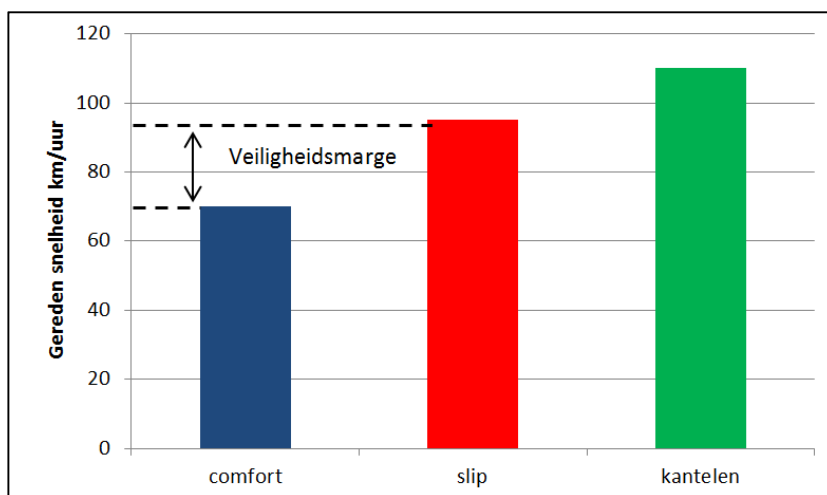
Bij het doorrijden van een boog treden krachten op in de dwarsrichting van het voertuig. Rekening houdend met de te verwachten voertuigsnelheden en wrijving dienen de boogstraal en de verkanting van de rijbaan in de boog daarom zodanig te worden gekozen dat deze dwarskrachten kunnen worden opgevangen zonder gevaar voor slippen of kantelen.

Daarnaast moeten boogstraal en verkanting zodanig op rijnsnelheden en wrijving afgestemd worden, dat het rijcomfort van de inzittenden gewaarborgd blijft. Dit betekent dat de versnelling in zijdelingse richting aan een maximum gebonden is. Het comfort dat

de inzittenden ervaren, wordt daarbij ook beïnvloed door voertuigeigenschappen zoals vering, stijfheid onderstel en de zijdelingse steun die de bestuurdersstoel biedt.

Door verbeterde wielophanging, autostoelen en tal van andere voorzieningen, is het comfort dat de inzittenden van een personenauto, maar zeker ook de vrachtwagenchauffeur, in vergelijking met de jaren '70 veel hoger. Het (mogelijke) neveneffect van het comfort van de moderne voertuigen is, dat bestuurders zich met een hogere snelheid over de weg begeven, waardoor zij niet meer in staat zijn om goed te beoordelen of de krachten op het voertuig of de band te groot worden. Daar staat tegenover dat andere moderne systemen als ABS en ESP weer een handje helpen als het mis dreigt te gaan.

In figuur 3 is het verband tussen de drie criteria bij een horizontale boog met een bepaalde straal en verkanting weergegeven, vanuit het perspectief van een individuele weggebruiker.



*Figuur 3 – Gereden snelheden waarbij de grenswaarden van de criteria optreden (fictieve waarden)*

- De snelheid waarmee de boog doorreden wordt, bepaald het veiligheidsniveau van de boog; alle criteria zijn immers gerelateerd aan de snelheid;
- In dit fictieve voorbeeld is het comfortcriterium maatgevend voor de snelheid. De weggebruiker vindt het, onder de gegeven omstandigheden, prettig om deze boog met een snelheid van ca. 70 km/uur door te rijden;
- Bij een snelheid van 95 km/uur zou het voertuig in deze omstandigheden geslipt zijn. Dit betekent dat deze bestuurder nog een aanzienlijke veiligheidsmarge heeft bij zijn gereden snelheid;
- Kantelen zou in theorie pas opgetreden zijn bij een snelheid van 105 km/uur. Met de karakteristieken van dit voertuig en in de gegeven omstandigheden dus onmogelijk, omdat het voertuig al eerder geslipt zou zijn.

In het vervolg van deze bijdrage gaan we in op de actuele situatie van de drie criteria: hoe verhouden de drie criteria zich ten opzichte van elkaar, is heden te dage de veiligheidsmarge groter dan vroeger en overdimensioneren we feitelijk? Of ligt de comfortgrens ook veel hoger waardoor er zelfs sprake is van onveiligere situaties?

### 3. Onderzoek dwarsstroefheid

#### 3.1 Inleiding

Als eerste wordt het slipcriterium nader toegelicht. In 2012 is door TNO onderzoek gedaan naar actuele waardes voor de dwarsstroefheid [2]. Het doel van deze metingen is te achterhalen of ontwikkelingen op het gebied van verharding en banden tot een bijstelling van de maatgevende dwarsstroefheid waardes moeten leiden en welke veiligheidsfactoren gehanteerd moeten worden.

Met deze actuele (maatgevende) waardes voor de dwarsstroefheid kan vervolgens bepaald worden of en in welke mate de richtlijn voor het dimensioneren van horizontale bogen aangepast moet worden.

#### 3.2 Opzet metingen

De dwarsstroefheidsmetingen zijn uitgevoerd met de TNO bandenmeetwagen. Hierbij is gevarieerd met de volgende parameters:

Type band	PIARC, Michelin 205/55R16 (afgedraaid), worst case versleten band (3 merken)
Conditie	Nat (waterlaag 0,5mm) en droog
Type wegdek	ZOAB, DAB
Conditie wegdek	Oud, nieuw
Snelheid	50, 70, 90 en 110 km/uur
Meting	Dwarsstroefheid, langsstroefheid

De testen zijn uitgevoerd op de A67; het wegtype ZOAB oud (2002) & nieuw (2010) is te vinden op delen van de A67 tussen afrit Geldrop en Asten. DAB oud komt vrijwel niet meer voor op hoofdrijbanen van autosnelwegen, wel op toe- en afritten en op Provinciale wegen. Een goede locatie, aansluitend aan de locaties voor ZOAB, is de Provinciale weg N612 tussen Helmond, Rochadeweg en de A67 toerit Someren met een weggedeelte met oud DAB (1995). Het weggedeelte met oud DAB op de N612 is vanwege de benodigde afstand om op snelheid te komen (kruising/rotonde bij begin/eind weggedeelte) en een bocht niet geschikt voor de maximum testsnelheid van 120 km/u. Daarom zijn de metingen alleen uitgevoerd bij 50, 70 & 90 km/u.

Uit praktische overwegingen is voor rechte weggedeeltes gekozen, omdat de meetsessies anders vrijwel onuitvoerbaar zijn. De tests vereisen namelijk behoorlijk weglengtes (resp. ca. 600 m & ca. 300 m) waardoor geschikte bochtlocaties niet gemakkelijk te vinden zijn. Daarnaast zijn krappe bogen bij de maximum snelheid van 120 km/u niet mogelijk uit veiligheidsoverwegingen (kantelrisico bandenmeetwagen). Om op rechte weggedeeltes de dwarsstroefheid te kunnen bepalen, is het wiel met de testband onder een hoek geplaatst.

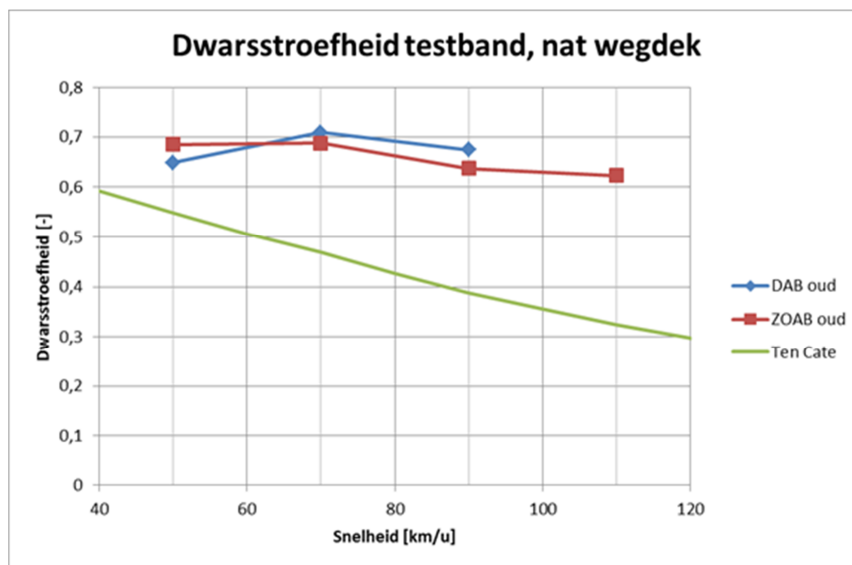
Een van de belangrijke factoren is de testband. Bij de langsstroefheidsmetingen van Rijkswaterstaat wordt een referentieband gebruikt: een niet geprofileerde PIARC band. Deze band wordt nog steeds volgens het oorspronkelijk ontwerp geproduceerd en gebruikt voor beoordeling van de langsstroefheid van auto(snel)wegen. Zoals eerder aangegeven zijn autobanden in de laatste 30 jaar aanzienlijk verbeterd en zijn we geïnteresseerd in de eigenschappen van huidige banden en minder in een band die decennia geleden is ontwikkeld.



Een keuze voor een mogelijke band is niet eenvoudig. In overleg met Rijkswaterstaat is gekozen is voor de meest voorkomende autoband met een profieldiepte waarbij een APK-aanmerking wordt gegeven. Een dergelijke aanmerking betekent een profieldiepte tussen 1.6 mm en 2.5 mm. Om tijdens de metingen geen band te verkrijgen die niet wettelijk is toegestaan (profiel diepte < 1.6 mm) wordt gekozen voor een initiële profieldiepte van 2.5 mm. Daarnaast zijn ook, ter vergelijking, metingen uitgevoerd met de PIARC-band en volledig versleten banden.

### 3.3 Resultaten

In figuur 4 zijn de meetresultaten weergegeven voor de standaard testband. Tevens zijn de karakteristieken opgenomen van het onderzoek uit de jaren '70 (Ten Cate [1]) dat nog steeds de basis is voor de hedendaagse richtlijnen.

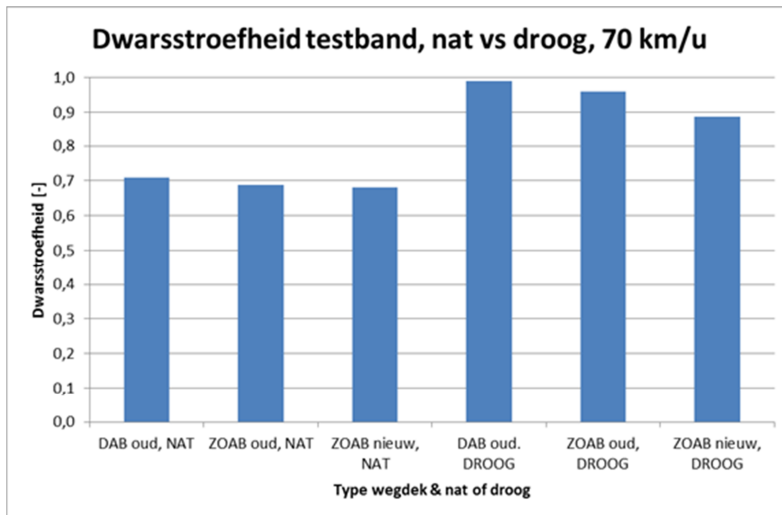


Figuur 4 – Gemeten dwarsstroefheden voor de standaard testband

#### Toelichting:

- De snelheid heeft ook invloed op de dwarsstroefheid, maar in veel minder mate dan volgens de karakteristiek van Ten Cate. Bij Ten Cate wordt een afname van 0,3 over een snelheidsgebied van 40 km/u tot 120 km/u aangegeven, terwijl dit bij de testband onder de 0,1 blijft. Vooral bij hoge snelheden worden aanzienlijk hogere dwarsstroefheden (verschil > 0,2) verkregen, waardoor grotere dwarsversnellingen en dus kleinere boogstralen realiseerbaar kunnen zijn.
- Opgemerkt moet worden dat deze hoge dwarsstroefheden op een nat wegdek alleen gerealiseerd kunnen worden, als er niet gelijktijdig geremd of aangedreven worden. De dwarsstroefheid voor de ontwerprichtlijn zal aanzienlijk lager komen te liggen doordat een groot deel van rempotentieel beschikbaar moet blijven om veilig in de bocht en in de rijstrook tot stilstand te komen.

Standaard wordt een nat wegdek gekozen als veelvoorkomende worst case voor een lage stroefheid. In dit onderzoek zijn ook metingen uitgevoerd op een droog wegdek om de invloed van het natte wegdek (=waterlaag) vast te stellen (figuur 5).



Figuur 5 – Dwarsstroefheden bij droog en nat wegdek, standaard testband

#### Toelichting:

- Op een nat wegdek liggen de stroefheden significant (0,15-0,3) lager.
- Echter de invloed van het type wegdek (DAB/ZOAB, oud/nieuw) is bij een nat wegdek verwaarloosbaar, zowel bij de dwars- als langstroefheid.
- Bij een droog wegdek is er wel een invloed van het type wegdek te zien. Opmerkelijk is dat de stroefheden bij droog DAB oud het hoogste is en dat de stroefheden van ZOAB oud hoger liggen dan die van ZOAB nieuw.
- Een ander resultaat van deze stroefheidsmetingen is dat de dwarsstroefheid hoger (ca. 0,2) is dan die van de langstroefheid. Ten Cate is bij zijn karakteristiek en toelaatbare dwarsstroefheid ervan uitgegaan dat de beide stroefheden (langs/dwars) even groot zijn. Dit fenomeen kan toegeschreven worden aan de eigenschappen van de toenmalige banden (ca. 1973).

#### 3.4 Vertaling naar richtlijnen

Nadrukkelijk dient vermeld te worden dat de waardes voor de dwarsstroefheid die uit dit onderzoek volgen, niet direct kunnen worden opgenomen in de formule waarmee minimale boogstralen in relatie tot verkanting worden bepaald:

- Van een aantal belangrijke variabelen is de invloed bepaald. Dit betekent echter niet dat de overige variabelen verwaarloosbaar zijn. Van elke variabele dient idealiter een veiligheidsfactor te worden bepaald.
- De waardes zijn gemeten bij bepaalde condities. Hierbij is zo veel mogelijk uitgegaan van condities conform de huidige richtlijnen of veel voorkomende condities. Omdat de uitgangspunten nog stammen uit de jaren '70 en op allerlei gebieden de uitgangspunten niet meer representatief zijn, dient de uitgangssituatie opnieuw vastgesteld te worden. Zo dient bijvoorbeeld de huidige maatgevende waterlaagdikte ter discussie gesteld te worden.
- Ook dient bij de interpretatie van de resultaten rekening gehouden te worden met meetonzekerheden en marges in de uitvoering van de proeven (bijvoorbeeld ten aanzien van de waterlaagdikte).
- De maximale dwarskracht en langskracht die door een band gegenereerd wordt, zijn niet geheel onafhankelijk van elkaar. Bij gelijktijdige aanwezigheid van beide

krachten, mag de vectoriële som de maximum bandkracht tussen band en wegdek niet overschrijden. Omdat een bestuurder in een boog altijd moet kunnen remmen (bijvoorbeeld voor een file), mag slechts met een deel van maximale dwarsstroeefheid gerekend worden.

- Zoals in paragraaf 2 vermeld, zijn er naast het slipcriterium nog andere criteria die bepalend zijn voor de dimensionering van een horizontale boog. Wellicht wordt bij hogere waarden voor het slipcriterium het kantelcriterium maatgevend. Hierover meer in paragraaf 3.
- Daarnaast is er een groep aspecten die gerelateerd is aan het rijgedrag, met name de snelheidskeuze, in een horizontale boog: gereden snelheden in relatie tot wegbeeld, wegkenmerken, type voertuig en omstandigheden. Om meer inzicht te verkrijgen in het effect van deze aspecten op de veiligheid in horizontale bogen, is onderzoek noodzakelijk naar het rijgedrag in horizontale bogen in combinatie met een ongevallenanalyse. Deze aspecten komen aan bod in paragraaf 5.

## **4. Onderzoek kantelen vrachtauto's**

### *4.1 Inleiding*

Voor personenwagens is slippen of glijden de meest kritische situatie in natte bogen waarbij tevens stevig geremd wordt. Voor andere voertuigtypen zoals vrachtwagens, opleggers en aanhangers is kantelen de meest kritische situatie en kan maatgevender zijn voor bogen. Door TNO is in 2012 een literatuuronderzoek uitgevoerd naar het kantelen van vrachtauto's [3].

### *4.2 Ongevallen met gekantelde vrachtwagens*

Om een indruk te krijgen van het aantal kantelongevallen met vrachtwagens in bogen, zijn diverse bronnen en onderzoeken bestudeerd: onder meer landelijke ongevallendatabase BRON, SWOV-onderzoek naar het kantelen van vrachtwagens, transport-online, het EU-project 'European Truck Accident Causation (ETAC)', vrachtwagenonderzoek DART en onderzoeken van Rijkswaterstaat.

Uit deze onderzoeken kan het volgende worden geconcludeerd:

- In Nederland komen op het totale wegennet circa twee ongevallen per week voor waarbij een kantelende vrachtwagen is betrokken. Hiervan vindt een beperkt deel plaats in de bocht.
- Nauwkeurige/betrouwbare cijfers hierover ontbreken omdat vele kantelongevallen niet geregistreerd worden.
- De vijf belangrijkste oorzaken van kantelongevallen met zware voertuigen zijn: bochten, uitwijken, bestuurder afgeleid, snelheid en berm. De combinatie "snelheid en bocht" is een belangrijke indicator voor het optreden van kantelongevallen.
- Bij de meeste kantelongevallen zijn geen andere voertuigen betrokken: éénzijdige ongevallen.

### *4.3 Kantelmechanisme*

Net zoals bij het slipcriterium, kan ook voor het kantelen van vrachtwagens een criterium worden vastgesteld. Door Pacejka [4] is hier onderzoek naar gedaan, wat de volgende formule heeft opgeleverd:

$$\frac{V^2}{g \cdot R} - i + \frac{W}{G'} = f_k$$

Met:

V	=	rijsnelheid [m/s];
g	=	zwaartekrachtsversnelling = 9.81 m/s <sup>2</sup> ;
R	=	boogstraal [m];
i	=	dwarsverkanting [-];
W	=	Zijwindkracht [N];
G'	=	gewicht voertuighelft (bak) [kg];
f <sub>k</sub>	=	kantelkental [-] (= minimum dwarsstroefheid voor kantelen).

De kantelgrens wordt bepaald door het kantelkental f<sub>k</sub> met de formule:

$$a_{y,k} = f_k \cdot g \text{ [m/s}^2\text{]}$$

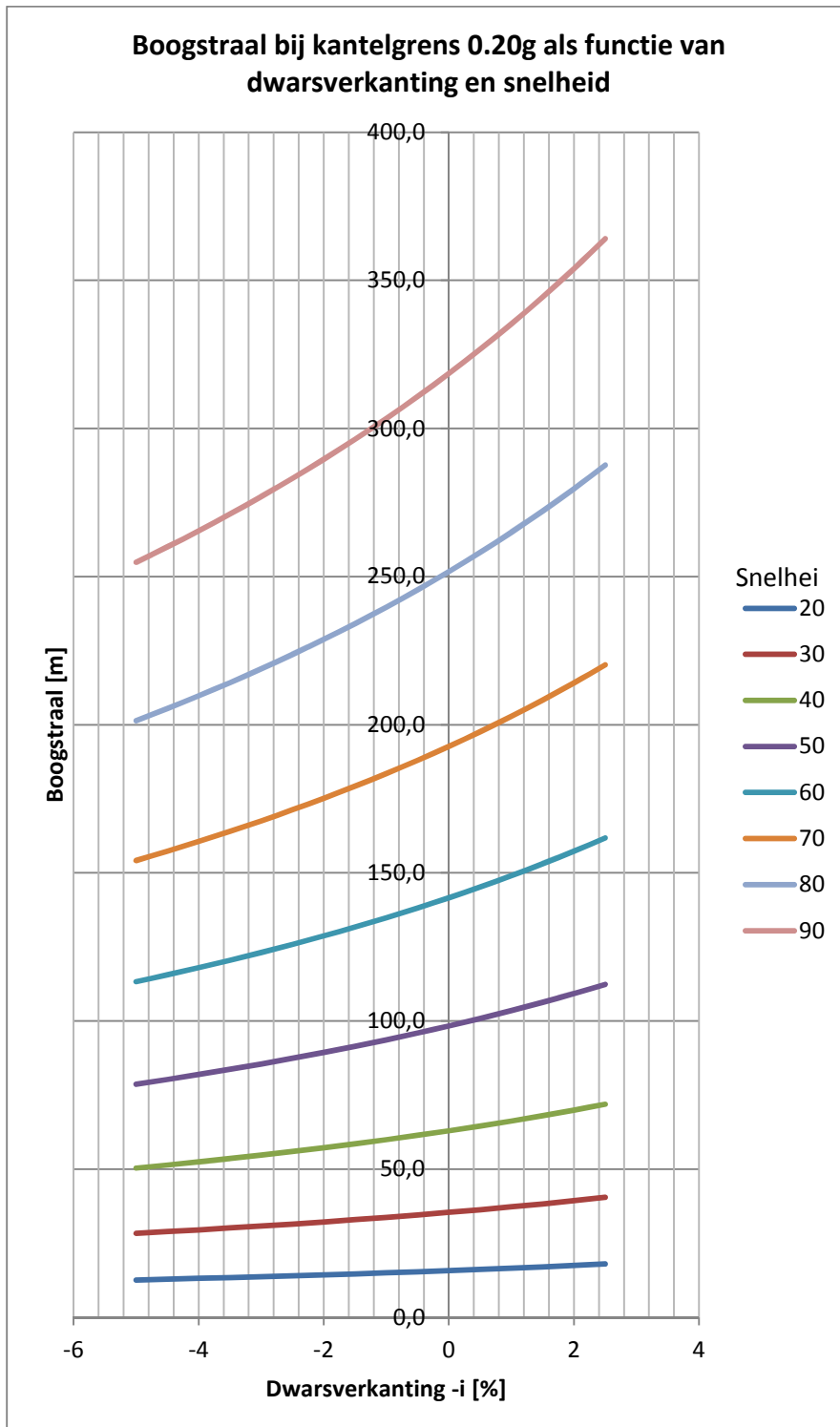
Pacejka heeft voor een hoog en zwaar beladen vrachtwagen een kantelgrens van 0.23g vastgesteld. Op basis van gegevens van huidige vrachtwagens (rolstijfheid, banden, etc.) wordt een iets hoger kantelgrens van 0.28g verkregen. De kans op kantelen bij een vrachtwagen is het grootste als het wegdek droog en stroef is, dus waarbij de dwarsstroefheid maximaal is. Wordt het kantelkental oftewel de minimum dwarsstroefheid waarbij kantelen optreedt (f<sub>k</sub>=μ<sub>k</sub>=0.23) vergeleken met de dwarsstroefheid van vrachtwagenbanden op een droge weg (μ<sub>y</sub>=0.70-0.80), dan blijkt overduidelijk dat kantelen en niet glijden maatgevend is voor vrachtwagens in bochten. Vrachtwagens met een lage kantelstabiliteit hebben vaak een extreem hoog zwaartepunt, bewegende lading, etc. Tijdens dynamische situaties kan de kantelgrens dan waarden hebben die net boven 0.20g liggen (bijvoorbeeld tankauto's).

#### 4.4 Kantelen vrachtwagens en richtlijn voor horizontale bogen

Met gebruikmaking van de formule van Pacejka is de boogstraal als functie van de dwarsverkanting en rijsnelheid weergegeven die behoort bij een worst case kantelgrens van 0.20g echter zonder zijwindkracht (zie figuur 6). De boogstralen zijn afgezet tegen de minimale boogstralen conform de ROA 1993, gebaseerd op het slipcriterium.

Toelichting:

- Volgens figuur 8 schrijft het slipcriterium van ROA 1993 grotere boogstralen voor dan volgens het kantelcriterium bij 0.20g. Uit de resultaten van het onderzoek naar dwarsstroefheid (zie paragraaf 3) lijken kleinere boogstralen mogelijk op basis van voertuigdynamisch gedrag: betere grip van huidige autobanden op natte wegdekken. Bij een actualisatie van het slipcriterium van personenwagens naar kleinere boogstralen dient rekening gehouden te worden dat een kantelcriterium van vrachtwagens inclusief een veiligheidsfactor mogelijk maatgevend kan zijn!
- Opgemerkt moet worden dat de worst case kantelgrens van 0.20g exclusief een veiligheidsfactor is. Uit de literatuur zijn ten aanzien van veiligheidsfactoren geen gegevens gevonden en zowel deze veiligheidsfactor als werkelijk worst case kantelgrens dient nader onderzocht te worden.



*Figuur 6 – Boogstraal bij kantelgrens 0.20g als functie van de dwarsverkanting en snelheid, exclusief zijwind en volgens Bijlage 1, ROA 1993 (slipcriterium)*

- De worst case kantelgrens van 0.20g kan echter wel beschouwd worden als een veilige waarde. Aan de ene kant omdat het overgrote deel van de vrachtwagens namelijk een hogere kantelgrens hebben (activeringsgrens stabiliteitssysteem ligt op 2.7 m/s<sup>2</sup>). Aan de andere kant omdat bij de vrachtwagens met kantelkritische lading zowel de producent als gebruiker rekening houden met de eigenschappen van deze speciale ladingen. Hierdoor zal het kantelrisico binnen aanvaardbare waarden blijven

terwijl de kantelgrens niet hoog is. Bij vrachtwagen met hangend vlees bijvoorbeeld door een voertuig met stijvere vering en/of borgen van de lading (vermijding slingeren). Voor tankauto's zijn er speciale chauffeurstrainingen. Ecocombi's worden alleen bestuurd door chauffeurs met bewezen jarenlange ervaring en zonder ongevallen.

- Kantelproblemen kunnen daarentegen optreden bij ladingen waarvan de werkelijke beladingsverdeling en borging onbekend zijn of niet bepaald kan worden door de chauffeur, zoals bij verzegelde containers/laadruimtes. Door asymmetrische belading of verschoven lading kan de kantelgrens namelijk significant lager zijn dan verwacht en kantelen in bogen en bij uitwijkmanoeuvres tot gevolg hebben.

## **5. Vervolgonderzoek**

### *5.1 Inleiding*

Bij zowel het slipcriterium als het kantelcriterium speelt de snelheid een belangrijke rol: wanneer de bestuurder van een personenauto of vrachtauto in de op dat moment heersende omstandigheden een te hoge rijsnelheid aanhoudt, dan bestaat het risico op slippen respectievelijk kantelen. Dit betekent dat bij het aanpassen van de richtlijnen voor horizontale bogen ook nadrukkelijk zal moeten worden gekeken naar human factors. In het verlengde hiervan is het ook interessant om te onderzoeken in welke horizontale bogen veel ongevallen optreden en welke weg-, verkeer- en omgevingskenmerken hierbij dominant zijn [5].

In 2013 worden een drietal deelonderzoeken uitgevoerd die ingaan op de verkeersveiligheid en het rijgedrag in horizontale bogen:

1. Literatuurstudie
2. Ongevallenanalyse
3. Praktijkonderzoek rijgedrag

### *5.2 Literatuurstudie*

De literatuurstudie gaat in de op de relatie tussen ontwerp-, verkeer- en omgevingskenmerken enerzijds en rijgedrag en ongevallen in horizontale bogen anderzijds. Omdat in dit onderzoek de nadruk ligt op horizontale bogen in autosnelwegen en het rijgedrag in horizontale bogen aanzienlijk kan afwijken van dat in bogen op niet-autosnelwegen, zal bij voorkeur literatuur van dit type horizontale bogen worden beschouwd. In het literatuuronderzoek worden nationale en internationale onderzoeken op het gebied van verkeersveiligheid, human factors en wegontwerp beschouwd.

### *5.3 Ongevallenanalyse*

Om de relatie tussen ongevallen en boogkenmerken te kunnen analyseren, is er met behulp van GIS een database gebouwd. In de database zijn alle verbindingswegen van Nederlandse autosnelwegknooppunten opgenomen. De database bevat per verbindingsweg de volgende kenmerken:

- Weggeometrie: boogstraal, booglengte, verkanting, type boog, etc.
- Verkeer: intensiteiten en aandeel vrachtverkeer
- Weginrichting en omgeving: geleiderail, verlichting, (geleidende bomenrijen), etc.
- Verkeersveiligheid: totaal aantal ongevallen, aantal letselongevallen, type ongevallen en omstandigheden (dag/nacht en nat/droog)

Uit de intensiteiten, de lengtes van de verbindingswegen (en bogen) en de aantallen ongevallen wordt het risicocijfer berekend: het aantal ongevallen per miljoen voertuigkilometers. Omdat we specifiek geïnteresseerd zijn in de relatie tussen de ontwerpparameters van de boog (onder meer boogstraal en verkanting), zijn de ongevallen geselecteerd die hiermee verband houden: de eenzijdige en vast-voorwerp ongevallen.

Door het risicocijfer af te zetten tegen de weg-, omgevings- en verkeerskenmerken, kan onderzocht worden of er een (statistisch betrouwbaar) verband is tussen een bepaald kenmerk en de verkeersveiligheid. Op deze wijze kan bepaald worden welke kenmerken in het ontwerp vermeden moeten worden of juist een positieve invloed hebben op de verkeersveiligheid.

#### *5.4 Praktijkonderzoek rijgedrag*

Op basis van de ongevallenanalyse zullen een aantal verbindingswegen in knooppunten worden geselecteerd, die nader onderzocht zullen worden op rijgedrag. Met behulp van video based monitoring (en mogelijk een groep proefpersonen uitgerust met een GPS-tracker), zullen snelheidsprofielen in horizontale bogen worden gemeten. Op deze wijze kan bepaald worden of de gereden snelheden (V85) overeenkomt met de ontwerpsnelheid (v0) en of er een verband is tussen ongevalsfrequenties en de snelheidsprofielen.

### **6. Afsluiting**

Door de informatie uit alle deelonderzoek te combineren, kunnen veiligheidsfactoren worden bepaald en uiteindelijk een nieuwe richtlijn voor het ontwerpen van horizontale bogen worden vastgesteld. Pas dan weten we of verbeterde voertuigtechniek en banden het mogelijk maken om krappere bogen te ontwerpen zonder het veiligheidsniveau te verlagen.

### **Bronnen**

- [1] Ten Cate, A.J. Bruikbare stroefheids-cijfers voor het ontwerp van bogen. Rijkswegenbouwlaboratorium Delft, rapport SV 72-6, 1972.
- [2] Ruijs, P.A.J., Coo, P.J.A. de, Broeren, P.T.W., Groot, J. Stroefheidscijfers en horizontale bogen, in opdracht van RWS DVS, Delft, augustus 2012.
- [3] Ruijs, P.A.J., Broeren, P.T.W. Kantelen vrachtwagens in bogen, literatuurstudie. In opdracht van RWS DVS, augustus 2012, Delft, december 2012.
- [4] Pacejka, H.B. Criteria te stellen aan de verkanting van een bocht met een constante straal. Vakblad Wegen, augustus 1974.
- [5] Broeren, P.T.W., Ruijs, P.A.J., Van der Horst A.R.A. Ontwerpen van horizontale bogen, plan van aanpak voor het bepalen van veiligheidsfactoren voor het ontwerp van horizontale bogen. In opdracht van RWS DVS, Delft, december 201