

Ontwerpen van horizontale bogen

Plan van aanpak voor het bepalen van veiligheidsfactoren voor het ontwerpen van horizontale bogen.

Datum	19-12-2012
Status	Definitief

Ontwerpen van horizontale bogen

Colofon

Uitgegeven door	RWS DVS
Informatie	Jaap groot (RWS DVS) Jaap.groot@rws.nl
Telefoon	06-10417520
Fax	-
Uitgevoerd door	Peter Ruijs (TNO) Richard van der Horst (TNO) Patrick Broeren (ARCADIS)
Opmaak	Patrick Broeren (ARCADIS)
Datum	19-12-2012
Status	Definitief
Versienummer	1.0

Inhoud

1	Inleiding 6
1.1	Aanleiding 6
1.2	Probleembeschrijving 6
1.3	Doelstelling 7
1.4	Leeswijzer 7
2	Scenariobeschrijvingen 8
2.1	Inleiding 8
2.2	Virtuele rit door een boog 8
2.3	Mogelijke ongevalsscenario's 13
3	Ontwerpcriteria horizontale bogen 15
3.1	Ontwerpcriteria 15
3.1.1	Slipcriterium 15
3.1.2	Kantelcriterium 16
3.1.3	Comfortcriterium 17
3.2	Parameters 18
3.3	Modelbenaderingen 19
4	Ontwerprichtlijnen 21
4.1	Inleiding 21
4.2	Bestaande richtlijnen 21
4.2.1	ROA 1993 21
4.2.2	NOA 26
4.3	Opbouw nieuwe richtlijn 28
4.4	Veiligheidsfactoren 30
4.4.1	Inleiding 30
4.4.2	Theorie veiligheidsfactoren 30
5	Onderzoeksopzet 33
5.1	Inleiding 33
5.2	Onderzoeksvragen 33
5.3	Algemeen onderzoek 34
5.3.1	Ongevallenanalyse 34
5.3.2	Literatuurstudie buitenlandse ontwerprichtlijnen en ontwerphandboeken 34
5.4	Deel A: Inrijnsnelheid boog 35
5.4.1	Inleiding 35
5.4.2	Stappenplan onderzoek 35
5.4.3	Literatuurstudie bestaand onderzoek 36
5.4.4	Onderzoeksmethoden voor empirisch gedragsonderzoek 37
5.5	Deel B: Slipcriterium 40
5.5.1	Keuze en verantwoording onderzoeksmethode 40
5.5.2	Te onderzoeken parameters 40
5.5.3	Stappenplan 41
5.5.4	Uitvoeringstechnische aspecten onderzoek 41
5.5.5	Resultaat 41
5.6	Deel C: Kantelcriterium 42

5.6.1	Keuze en verantwoording onderzoeksmethode	42
5.6.2	Te onderzoeken parameters	42
5.6.3	Stappenplan	42
5.6.4	Uitvoeringstechnische aspecten onderzoek	43
5.6.5	Resultaat	43
5.7	Deel D: Comfortcriterium	44
5.7.1	Bestaand onderzoek en richtlijnen	44
5.7.2	Onderzoeksmethode	45
5.8	Prioritering onderzoek	46
5.8.1	Inleiding	46
5.8.2	Stappenplan	47

6 Bronnen 49

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Uit de praktijk blijkt dat de ontwerpeisen met betrekking tot de vormgeving en inrichting van horizontale bogen tot grote misverstanden en fouten leiden. De huidige situatie leidt tot onduidelijke regelgeving, kans op fouten, verkeerde afwegingen, onnodige verkeersonveiligheid of mogelijk tot inefficiënt ruimtegebruik. Ook is het van belang om de veiligheidsmarges in de ontwerpparameters van het boogontwerp te kennen, omdat steeds vaker afgeweken wordt van de voorgeschreven minimale boogstralen.

Door de CROW-werkgroep 'herziening NOA' is dit probleem bevestigd en is het als witte vlek erkend op de witte vlekkenlijst¹. Hierbij is geconstateerd dat naast een nieuwe beschrijving ook onderzoek op het gebied van stroefheid en human-factors noodzakelijk is om de gedateerde uitgangspunten/scenario's te herzien en te valideren.

1.2 Probleembeschrijving

Het ontwerpen van (verbindings)bogen op autosnelwegen zoals in hoofd/parallelbanen, bij een klaverblad of een op- of afrit, gebeurt op basis van de ontwerprichtlijn NOA (Nieuw Ontwerprichtlijn Autosnelwegen [1]) en de toekomstige herziening hierop ROA 2010 (Richtlijn Ontwerp Autosnelwegen 2010). De verantwoording voor de inhoud van deze richtlijnen ligt in gedateerd onderzoek (onder andere uit de jaren '70 Pecejka [2] en ten Cate [3]).

De filosofie, uitgangspunten en afwegingen die ten grondslag lagen aan deze richtlijnen zijn echter inmiddels niet meer te achterhalen, waardoor een verantwoording voor de ontwerprichtlijnen ontbreekt. Daarnaast leidt de inhoud van de huidige richtlijnen tot onduidelijkheden voor de ontwerper en is het niet mogelijk om, indien nodig, gefundeerd van de richtlijn af te wijken. In de CROW-werkgroep die de NOA herziet is een inventarisatie gemaakt van kennisleemten in de richtlijnen van ontwerp van autosnelwegen, de *Witte Vlekken lijst*. De herziening van de ontwerprichtlijnen voor autosnelwegen (ROA 2010) wordt daarom aangegrepen om de kennis die nodig is voor het veilig ontwerpen van horizontale bogen in autosnelwegen te updaten zodat onderbouwde en bruikbare ontwerpeisen kunnen worden geformuleerd.

Een veilig ontwerp van bogen gebeurt op basis van een integrale beschouwing en afweging van veel verschillende aspecten die voortkomen uit zowel de weg, het voertuig en de bestuurder. In het document '*Kennisupdate veilig ontwerp horizontale bogen autosnelwegen*'² staat een uitgebreidere beschrijving van de problematiek die speelt rondom deze *witte vlek*.

Op basis van de probleemanalyse is geconcludeerd dat het hebben van betrouwbare en bruikbare stroefheidscoëfficiënten een essentiële eerste stap is bij het kunnen

¹ Rws, 5 februari 2010. *Meerjarig onderzoeksprogramma tbv. Dossier NOA*

² DVS, afdeling veiligheid, *Voorstel onderzoeksprogramma - kennisupdate veilig ontwerp horizontale bogen ASW.doc*

toepassen van het slipcriterium in bogen en is daarom als beginstap gekozen voor de kennisupdate veilig ontwerp van (verbindings)bogen op autosnelwegen.

Begin 2012 zijn de onderzoeksresultaten opgeleverd van het onderzoek naar de dwarsstroefheid in horizontale bogen [4]. Op basis van metingen met de TNO-bandenwagen en literatuuronderzoek zijn actuele stroefheidscoëfficiënten herleid. Omdat stroefheid door een groot aantal factoren wordt bepaald, was het niet mogelijk om de invloed van alle factoren op basis van metingen (of literatuur) te onderbouwen.

Daarnaast is geconstateerd dat mogelijk niet in alle gevallen het slipcriterium maatgevend zal zijn voor de dimensionering van horizontale bogen; ook het kantelcriterium en human factor aspecten (bijvoorbeeld comfort en wegbeeld) zullen onderzocht moeten worden om tot een sluitende onderbouwing van de ontwerpparameters voor horizontale bogen te komen.

In dit plan van aanpak wordt beschreven welke stappen doorlopen moeten worden om tot een gefundeerde nieuwe richtlijn voor het ontwerpen van horizontale bogen te komen.

1.3 Doelstelling

Het doel van deze studie is om te komen tot een onderzoeksopzet waarmee een volledige en transparante onderbouwing van de ontwerprichtlijn voor horizontale bogen kan worden vastgesteld, gebaseerd op actuele inzichten ten aanzien van (de variatie in) voertuigkenmerken, wegkenmerken, omstandigheden en human factors.

1.4 Leeswijzer

Vanwege de complexiteit van de materie wordt in dit plan van aanpak eerst uitgebreid stilgestaan bij (de onderlinge relaties tussen) de aspecten die een rol spelen bij het ontwerpen van horizontale bogen. In hoofdstuk 2 wordt aan de hand van scenariobeschrijvingen ingegaan op de verschillende parameters, ontwerpcriteria en ongevalstypen. De ontwerpcriteria worden vervolgens nader toegelicht in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 gaan wij in op de bestaande richtlijnen en een nieuwe richtlijn voor het ontwerpen van horizontale bogen. Tenslotte wordt in hoofdstuk 5 het plan van aanpak behandeld om de veiligheidsfactoren en de nieuwe richtlijn vast te stellen.



Figuur 1 – Boog in knooppunt Grijsoord

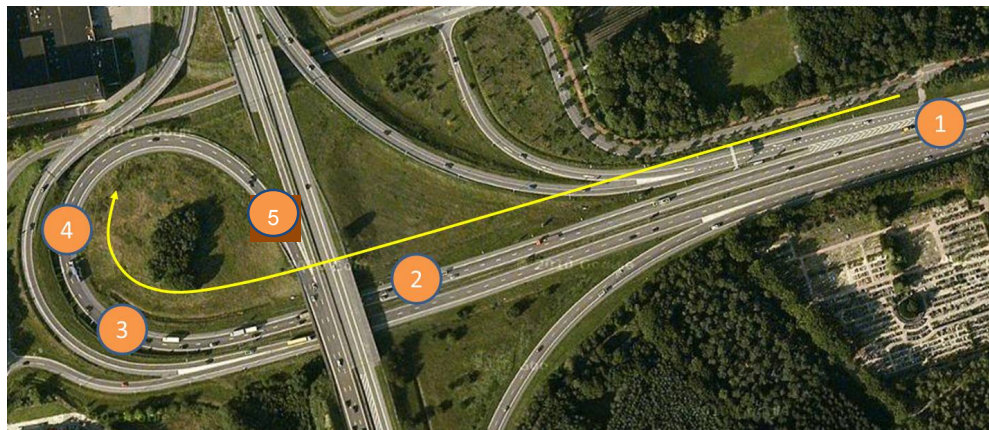
2 Scenariobeschrijvingen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op het berijden van een horizontale boog. In de eerste paragraaf gebeurt dit door virtueel een rit door een horizontale boog en het wegvak dat voorafgaat aan de horizontale boog, te beschrijven. In de tweede paragraaf wordt ingegaan op ongevalsscenario's.

2.2 Virtuele rit door een boog

In deze paragraaf wordt door het virtueel berijden van een krappe horizontale boog in knooppunt Zoomland (zie figuur 2), ingegaan op de wijze waarop de verschillende parameters het rijgedrag van de weggebruiker beïnvloeden. Hiertoe wordt de horizontale boog en het stroomopwaarts gelegen wegvak ingedeeld in een aantal secties. Er zijn vele type bogen, waarbij op onderdelen ook andere scenario's horen; deze situaties zullen hier niet behandeld worden. Dit voorbeeld is alleen bedoeld om de aspecten die een rol spelen bij het rijgedrag in horizontale bogen toe te lichten. Het definiëren van verschillende situaties is wel onderdeel van het onderzoek om te komen tot een nieuwe richtlijn voor het ontwerpen van horizontale bogen.



Figuur 2 – Boog in knooppunt Grijsoord

Sectie 1: nadering boog

In de eerste sectie nadert de weggebruiker de horizontale boog. De snelheidskeuze stroomopwaarts van de boog, wordt in sterke mate bepaald door de ontwerp-, inrichtings- en wegkarakteristieken van het wegvak dat voorafgaat aan de horizontale boog. Deze aspecten samen bepalen het verwachtingspatroon waarmee de weggebruiker de boog benadert. Hierbij is het belangrijk om te onderkennen dat de weggebruiker niet bestaat; het rijgedrag van een regelmatige gebruiker van dit knooppunt zal verschillen van het gedrag van een bestuurder die voor de eerste keer door deze boog rijdt. Ook zal het gedrag bij de nadering van de boog afhankelijk zijn van het type voertuig en de voertuigkarakteristieken.

Vanwege de hoge ongevalsfrequentie voortkomend uit te hoge naderingssnelheden, is in dit specifieke voorbeeld het wegvak voorafgaand aan de horizontale boog uitgerust met diverse verkeersborden en waarschuwingen; bij een goed ontworpen (self-explaining) boog zou deze middelen niet nodig moeten zijn (zie figuur 3).



Figuur 3 – Beelden nadering boog

Sectie 2: snelheidsaanpassing

In de tweede sectie moet de weggebruiker zijn snelheid afstemmen op de boog. Hierbij zijn de boogstraal en de verkanting bepalend voor de benodigde snelheidsaanpassing, maar spelen ook de eerdergenoemde aspecten uit sectie 1 een rol. Het verwachtingspatroon in combinatie met het wegbeeld, bepalen uiteindelijk in hoeverre weggebruikers hun snelheid daadwerkelijk aanpassen. In het wegbeeld spelen met name verticale elementen zoals geleiderail, verkanting(overgang), beplanting en eventueel aanwezige bochtschilden een rol. Maar ook zichtbeperkende elementen, zoals een kunstwerk, kunnen van invloed zijn.

Bij de snelheidsaanpassing kunnen twee situaties optreden:

- De weggebruiker schat de boogstraal te ruim in, waardoor de gekozen snelheid te hoog is. Afhankelijk van de kenmerken van het voertuig en de weggebruiker, bestaat de kans het slip-, kantel- of comfortcriterium in de horizontale boog wordt overschreden;
- De weggebruiker schat de boogstraal te krap in, waardoor zijn feitelijk gekozen snelheid in de boog hoger had kunnen zijn. Er is geen sprake van een verhoogd risico.

In deze sectie is niet alleen een te hoge naderingssnelheid van invloed op het risicocijfer, maar ook de variatie in naderingssnelheid. Wanneer weggebruikers de horizontale boogstraal sterk wisselend interpreteren, zal dit tot grotere onderlinge snelheden leiden, met een verhoogde kans op kop-staart ongevallen als resultaat.



Figuur 4 – Beelden sectie snelheidsaanpassing voor de boog

Sectie 3: overgang naar de boog

In sectie 3 vindt de overgang naar de horizontale boog plaats. In deze sectie zijn de overgangsboog en de verkantingsovergang gesitueerd. De overgangsboog is bedoeld om de stuurverdraaiing geleidelijk te doen plaatsvinden. De verkantingsovergang is bedoeld om het verloop naar een tegengesteld gerichte verkanting (of een ander verkantingspercentage) mogelijk te maken. Door een korte verkantingsovergang en een grote verkanting kan een krappe horizontale boog extra worden geaccentueerd.

De meeste weggebruikers zullen in deze sectie nog steeds hun snelheid verlagen. Geleidende objecten in de boog, zoals bochtschilden, attenderen de weggebruikers op de aanwezigheid van een krappe boog.

De aanwezigheid van voorliggers, met name vrachtverkeer, kan het zicht op het verloop van de horizontale boog belemmeren.



Figuur 5 – Beelden overgang naar de boog

Sectie 4: de horizontale boog

De laatste sectie bevat de horizontale boog. Hier kunnen de volgende scenario's voorkomen:

- a) De weggebruiker heeft in de voorgaande secties voldoende snelheid geminderd en kan in de horizontale boog een constante snelheid aanhouden;
- b) De weggebruiker heeft onvoldoende snelheid geminderd en moet opnieuw snelheid aanpassen.

In het laatste geval is het belangrijk of de weggebruiker tijdig bemerkt dat zijn of haar snelheid te hoog is en er nog mogelijkheden zijn om te voorkomen dat het kantel- of slipcriterium wordt overschreden. Hierbij is een belangrijke rol weggelegd voor het comfort: indien de weggebruiker de snelheid in de boog als onaangenaam ervaart, dan zal dit een prikkel zijn om de snelheid aan te passen. Hoe verder de comfortgrens onder de kantel- en slipgrens ligt, hoe lager het risico is dat er kantelen of slippen optreedt.

Het ervaren comfort wordt beïnvloed door voertuigkarakteristieken, zoals vering en type bestuurdersstoel. De mate van comfort die weggebruikers acceptabel vinden, is afhankelijk van de persoonskenmerken van de bestuurder (of inzittenden): het stereotype jonge BMW-rijder zal hogere krachten in de boog acceptabel vinden dan een oudere Toyota-Verso rijder.

Ongunstige weg- en omgevingsomstandigheden (zoals spoorvorming, dikke waterlaag, zijwind) kunnen een negatieve invloed hebben op de kans op kantelen of slippen.



Figuur 6 – Beeld in de boog

Sectie 5: verlaten van de horizontale boog

In de laatste sectie verlaten de weggebruikers de horizontale boog. Het rijgedrag in deze sectie wordt mede bepaald door de manoeuvres die op het stroomafwaarts gelegen wegvak: accelereren, van rijstrook wisselen, tot stilstand komen (voor een VRI), etc.

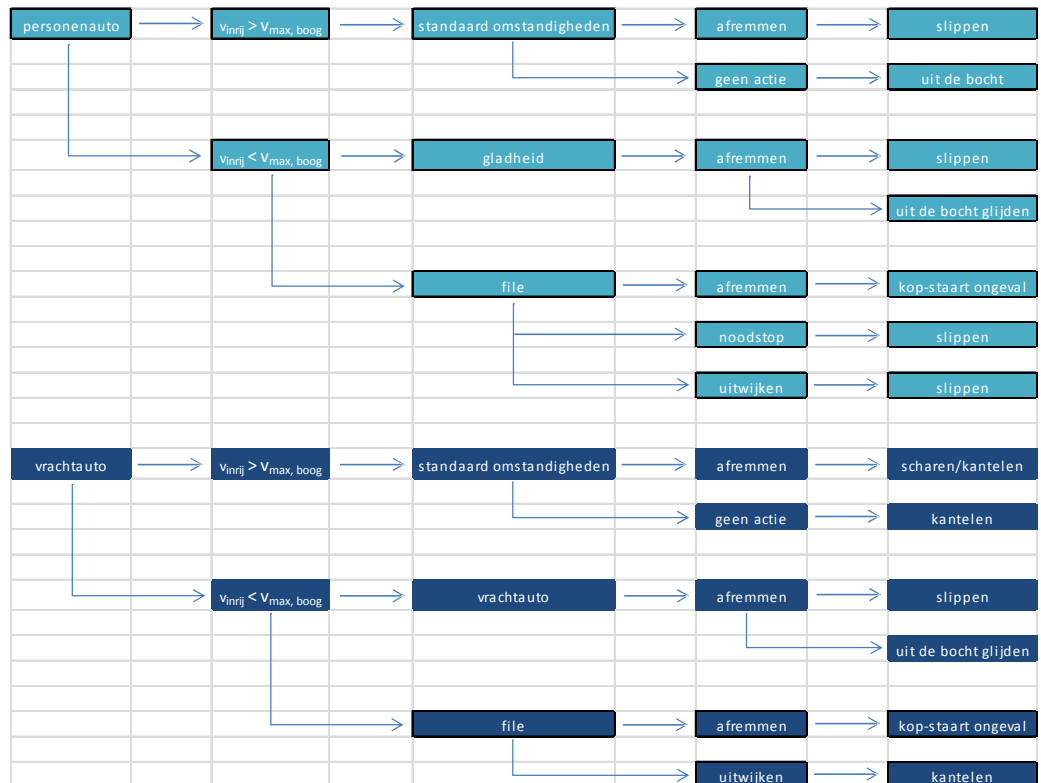
In dit geval blijven weggebruikers op een autosnelweg, kunnen ze hun rijstrook blijven volgen en zullen ze weer accelereren naar hun wensnelheid.



Figuur 7 – Beeld bij het verlaten van de boog

2.3 Mogelijke ongevalsscenario's

In deze paragraaf beschrijven we de voornaamste ongevalsscenario's die kunnen optreden in of nabij een horizontale boeg:



Figuur 8 – Meest voorkomende ongevalsscenario's

Toelichting:

- Het ongevalsscenario is afhankelijk van het voertuigtype: personenauto of vrachtauto. Binnen deze categorieën voertuigtypen, verschilt het risico ook nog per subtype (onder meer met of zonder aanhanger, oplegger), het zwaartepunt van het voertuig en de belading (vloeistof, hangend vlees, vaste lading, etc.);
- Vervolgens is de snelheid waarmee de bestuurder de boeg inrijdt (v_{rij}), bepalend voor de kans dat een ongevalsscenario optreedt. De inrijnsnelheid wordt bepaald door het verwachtingspatroon van de weggebruiker (inclusief het effect van bebording), het wegbeeld en de omstandigheden. Hierbij is de maximale veilige snelheid in de boeg als criterium gedefinieerd ($v_{max, boog}$);
- Wanneer in standaard omstandigheden (droog of nat wegdek), de weggebruiker de boeg inrijdt met een te hoge snelheid (voor het betreffende voertuig met lading), dan is actie vereist om een ongeval te voorkomen;
- Om de te hoge snelheid te corrigeren, zal de weggebruiker remmen, wat de kans op slippen verhoogt (zie ook onderzoek naar dwarsstroefheid);
- Indien de bestuurder niet tijdig detecteert dat een snelheidsaanpassing noodzakelijk is, kan het voertuig ook uit de bocht vliegen (bijvoorbeeld in de nacht bij een onverlichte en onverwachte krappe boeg).

- In bijzondere omstandigheden, zoals bij gladheid of een file in een boog, kan het voorkomen dat de inrijnsnelheid die in standaard omstandigheden als veilig kan worden geclassificeerd, te hoog is.
- In deze omstandigheden is dan toch een handeling noodzakelijk om niet bij een ongeval betrokken te raken.
- Voor een stilstaande file in een boog geldt, wanneer deze laat wordt gedetecteerd, dat een weggebruiker een grotere remvertraging hanteert dan wanneer het alleen een snelheidsaanpassing betreft vanwege een onjuiste inschatting van de boog. Dit vergroot de kans op slippen.
- Bij de vrachtauto gelden dezelfde principes, alleen zijn er andere ongevalstypen van toepassing; een vrachtauto zal in 'standaard omstandigheden' bij een te hoge snelheid in een boog kantelen en niet slippen.
- Er is sprake van een verhoogd risico, wanneer een vrachtauto in een boog moet uitwijken (bijvoorbeeld voor een file op één rijstrook). Door een abrupte uitwijkmanoeuvre zal het risico op kantelen toenemen, zeker wanneer de zwaartepunt van de lading verschuift (halfvolle tanker bijvoorbeeld).

3 Ontwerpcriteria horizontale bogen

3.1 Ontwerpcriteria

Bij het ontwerpen van horizontale bogen spelen drie criteria een rol:

1. Het slipcriterium
2. Het kantelcriterium
3. Het comfortcriterium

Naast deze criteria speelt het wegbeeld een belangrijke rol in het feitelijke rijgedrag dat weggebruikers vertonen bij de nadering van de boog en in de boog. Hiermee ligt er ook een relatie met de drie genoemde criteria.

3.1.1 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_h = de straal van de horizontale boog [m]
- V_o = de ontwerpsnelheid [km/u]
- g = valversnelling [m/sec²]
- fz = zijdelingse wrijvingsweerstand(scoëfficiënt) [-]
- 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

Verkanting is een scheefstand van het wegdek en wordt toegepast om (1) te voorzien in een voldoende afwatering ten tijde van neerslag en (2) 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 naderingssnelheid hierop aan kunnen passen. Deze belangen kunnen tegenstrijdig zijn zodat een afweging of optimalisatie moet worden gemaakt ten behoeve van de veiligheid.

De verkanting kan ook negatief zijn. Dit wil zeggen dat in bogen de verkanting 'verkeerd om' is zodat een negatief effect van de verkanting op de dwarswrijving ontstaat.

Stroefheid

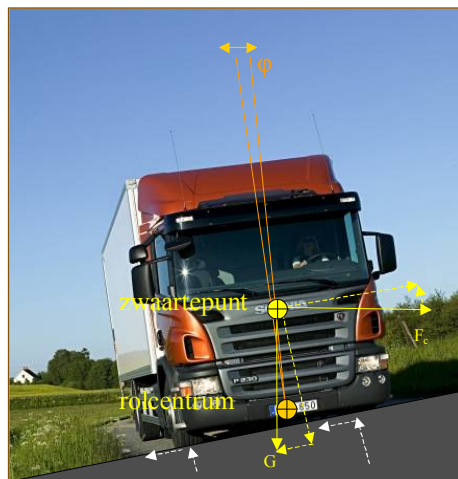
De stroefheid van het wegdek is van groot belang voor de maximale wrijving die door het voertuig kan worden gebruikt om door de boog te komen. De stroefheid is echter niet door de weggebruiker in te schatten zodat de gebruiker vanuit moet kunnen gaan van dat de stroefheid voldoet aan een bepaalde minimumnorm. 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.

3.1.2

Kantelcriterium

Tengevolge van het op het voertuig werkende krachten (figuur 9) tijdens het rijden, kan een voertuig niet alleen slippen maar ook kantelen en/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) en/of scharen (overschrijding van dwarskracht en/of rolmoment van een deel van het voertuig waardoor de combinatie 'knikt').



Figuur 9 - Kantelmechanisme vrachtwagen

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 10, 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 ed. 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 9 rechts).



Figuur 10 – Kantelen (links) en scharen (rechts)

3.1.3

Comfortcriterium

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.

3.2 Parameters

In de voorgaande paragraaf zijn al een aantal parameters aan de orde gekomen. In tabel 1 zijn alle parameters samengevat.

<i>Categorie</i>	<i>Parameter</i>	<i>Waarde</i>
Voertuig	Type voertuig	Personenauto , vrachtauto, motor, aanhanger
	Voertuigeigenschappen	Wielophanging, vering, wielbasis/spoorbreedte, bandeigenschappen, belading, zwaartepuntshoogte, ABS, ESP, anti-kantelsysteem
Wegontwerp	Ontwerpsnelheid	
	Boogstraal	
	Verkanting	Postief, negatief, overgangen
	Verticaal alignement	
	Deceleratielengtes	
	Combinatie van bogen	
	Overgangsbogen	
	Bebakening en bebording	
	Markering	
	Bewegwijzering	
	Zichtafstanden	
Omstandigheden	Type verharding	DAB/ZOAB
	Wegcondities	Droog/nat, vervuiling, rafeling, spoorvorming
	Zijwind	
	Bijzondere omstandigheden	IJzel, sneeuw, dikte waterlaag
Weggebruiker	Gereden snelheid	
	Remgedrag	

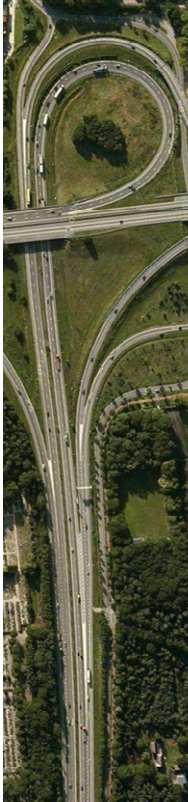
Tabel 1 – overzicht parameters

In tabel 1 zijn de verschillende invloedsfactoren op de veiligheid in een horizontale boog slechts opgesomd, zonder daarbij de relaties met de ontwerpcriteria te leggen.

In de volgende paragraaf wordt aan de hand van een scenariobeschrijving vanuit het perspectief van de weggebruiker, nader ingegaan op de relatie tussen de parameters en de ontwerpcriteria.

3.3 Modelbenaderingen

Op basis van de scenariobeschrijving van het berijden van een horizontale boog, worden de parameters gekoppeld aan de verschillende secties uit de vorige paragraaf.

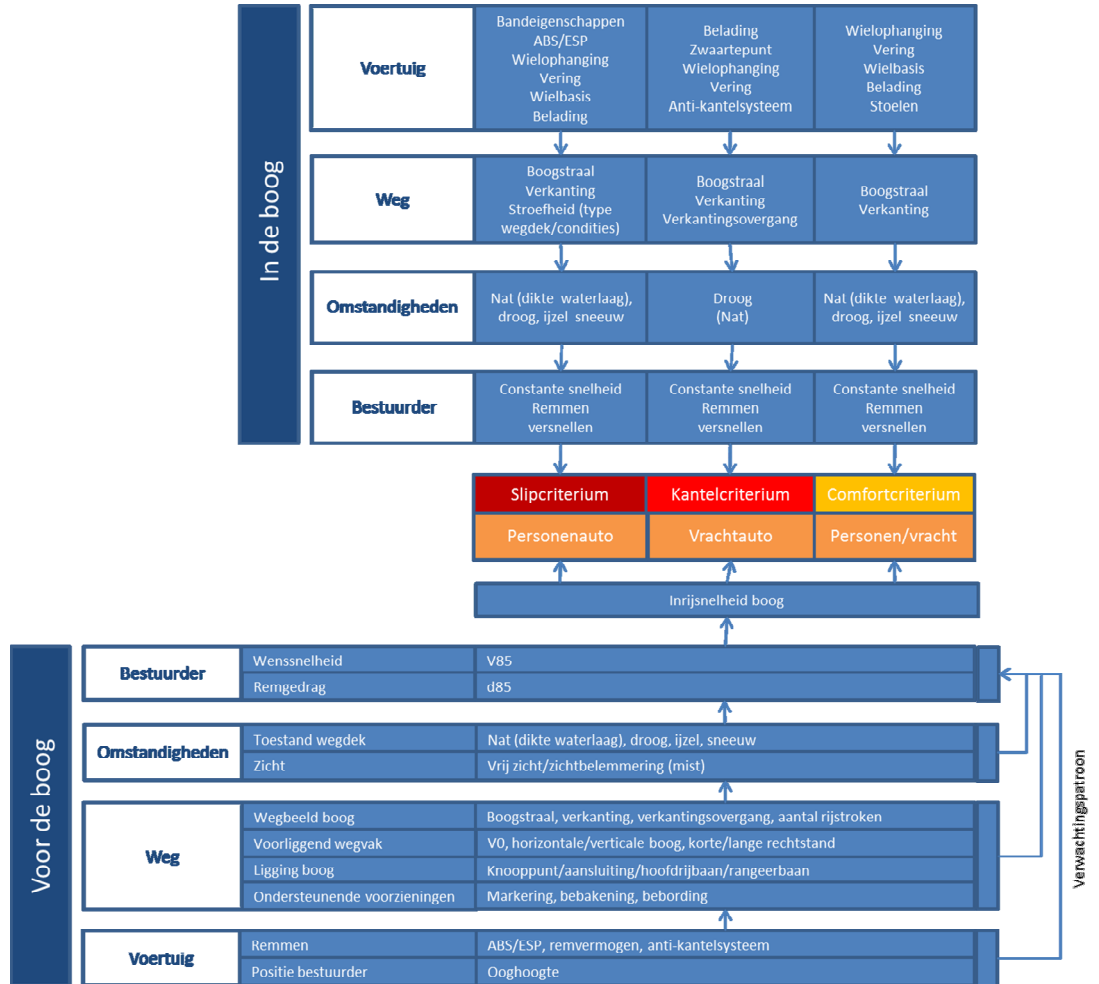
			voertuig	weg	bestuurder	omstandigheden
	Sectie4	↑ Boog berijden	Type voertuig Wielophanging Vering Wielbasis Bandeigenschap. Belading Zwaartepunt ABS/ESP	Boogstraal Verkanting Verticaal alignement Type wegdek (DAB/ZOAB) Wegcondities	Type bestuurder Comfortgrens	Nat/droog/ijsel/sneeuw Dikte waterlaag Mist Zijwind
	Sectie3	↑ Boog indraaien/snelheid aanpassen	Type voertuig ABS/ESP	Boogstraal Verkanting Verkantings-overgang Overgangsboog Bebording Bebakening Markering Geleiding	Type bestuurder Remgedrag	Nat/droog/ijsel/sneeuw Mist
	Sectie2	↑ Snelheid aanpassen	Type voertuig ABS/ESP Zicht	Deceleratielengte Aantal rijstroken Bebording Bebakening Wegverloopzicht (geleiding/belemmering)	Type bestuurder Remgedrag	Nat/droog/ijsel/sneeuw Mist
	Sectie1	↑ Boog naderen	Type voertuig: ABS/ESP Zicht	Wegvak stroomopwaarts boog (v0, rechtstand, boog) Bewegwijzering Convergentie- of divergentiepunt Overgang autosnelweg	Type bestuurder Snelheidskeuze	Nat/droog/ijsel/sneeuw Mist

Figuur 11 – Parameters per sectie en per categorie

Toelichting:

- Zoals uit figuur 11 is op te maken, spelen diverse factoren in meerdere secties een rol. Zo speelt de verkanting in de boog een rol bij het inschatten van de boog en de mate van vertraging voor de boog. Maar de verkanting heeft ook effect op het gedrag en de gebeurtenissen in de boog (al dan niet slippen, of kantelen en het ervaren comfort);
- Ook moeten verschillende factoren in onderlinge samenhang worden beschouwd: zo zal het verwachtingspatroon van de horizontale boog worden bepaald door de mate van bochtigheid van het stroomopwaarts gelegen wegvak, maar ook bijvoorbeeld door de ligging: in een knooppunt, een aansluiting of een doorgaande rijbaan. Hierbij spelen uiteraard ook voertuig- en bestuurderskenmerken een rol (type voertuig, bekendheid met de situatie, etc.);
- Kortom: er zijn ontzettend veel combinaties van parameterwaardes het gedrag in en vlakbij een horizontale boog beïnvloeden.

Ook kunnen de parameters gekoppeld worden aan de ontwerpcriteria (figuur 12).



Figuur 12 – Parameters gekoppeld aan de ontwerpcriteria

Toelichting:

- In figuur 12 zijn de parameters gekoppeld aan de ontwerpcriteria: het slipcriterium, kantelcriterium en het comfortcriterium;
- Aan de onderzijde van het figuur zijn de parameters opgenomen die bepalen met welke snelheid de bestuurder de boog inrijdt. Al deze factoren bepalen het verwachtingspatroon van de bestuurder ten aanzien van de gewenste snelheid in de boog;
- Aan de bovenzijde van de figuur zijn de parameters gekoppeld aan de criteria. Hierbij is in het midden van de figuur aangegeven welk type voertuig maatgevend is.

4 Ontwerprichtlijnen

4.1 Inleiding

In de bestaande richtlijnen wordt op basis van een keuze voor ontwerpsnelheid een minimaal te gebruiken combinatie van boogstraal, overgangsboog en verkanting gegeven. De voorgeschreven ontwerpeisen zijn daarbij gebaseerd op (onbeschreven) aannames van wegdek-, voertuig-, omstandigheden- en gebruikereigenschappen. Daarnaast is er gebruik gemaakt van veiligheidsfactoren, maar ook deze zijn niet (makkelijk) inzichtelijk. Vooral nog speelt de veiligheidsfactor mee bij de dwarswrijving, verkanting en het feit of de ontwerpsnelheid voorafgaand aan de boog groter of gelijk is aan de ontwerpsnelheid in de boog (met andere woorden: of er geremd moet worden in de (aanloop naar) de boog).

Deze ontwerpeisen gelden voor de personenauto, maar het is onduidelijk of ook voor andere typen voertuigen (vrachtwagen, motor) de uitgangspunten zijn meegenomen. Daarnaast zou, zoals ook in de Duitse richtlijn gebeurt, vanaf bepaalde ontwerpsnelheid/boogstraal/verkanting-combinaties kunnen worden gekozen om niet het slip- en kantelcriterium maatgevend te laten zijn, maar ook een minimaal comfortniveau in de bocht te handhaven, bijvoorbeeld op basis van G-krachten.

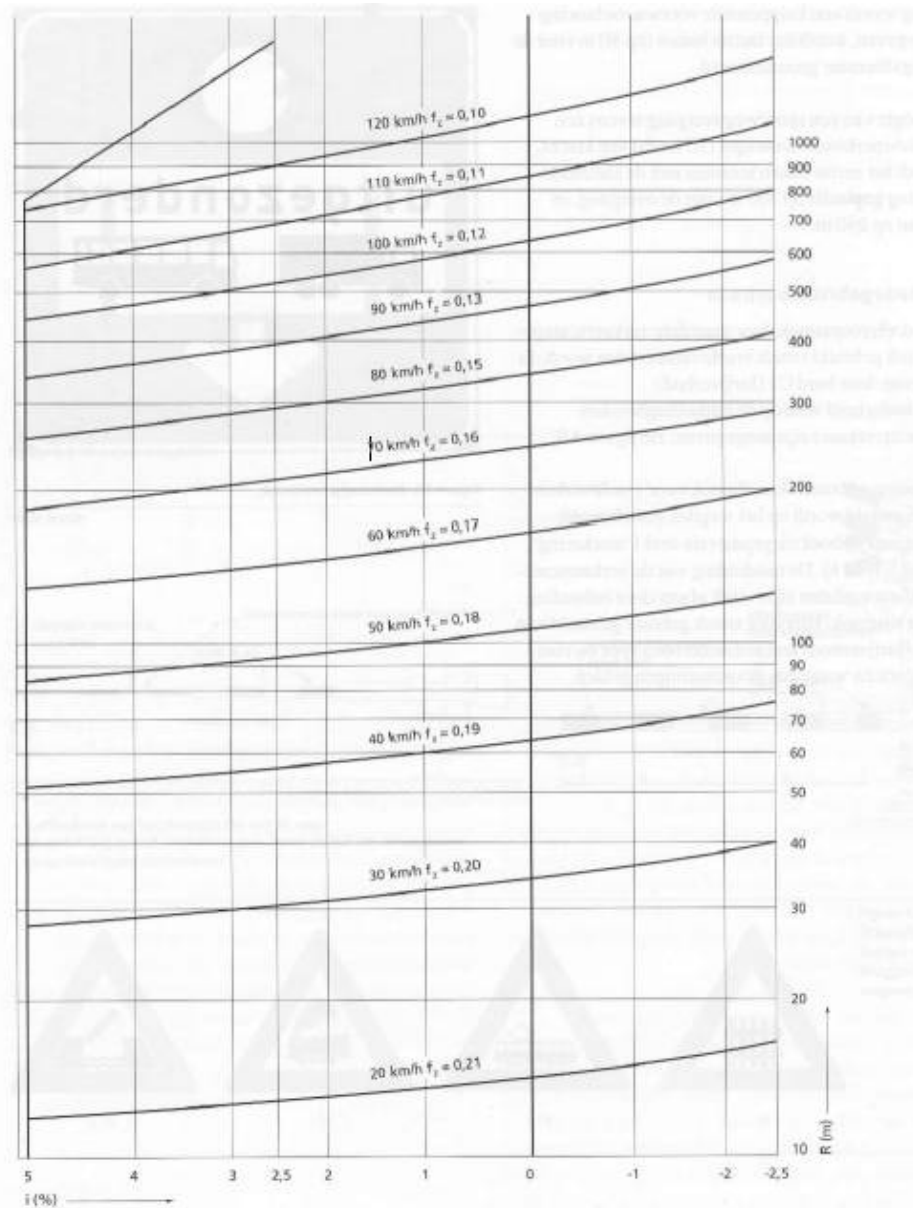
Voor wat betreft de ontwerpfilosofie wordt in Nederland het uitgangspunt gehanteerd dat de weggebruiker aan de hand van verwachtingen en het boogontwerp moet kunnen inschatten wat een veilige snelheid is om door de boog te gaan. Daarnaast wordt de boog ingeleid door een overgangsboog op basis van een clothoïde. Indien de snelheid (veel) lager ligt dan de snelheid in het voorgaande traject, dan moet het ontwerp (alignement) aanleiding en mogelijkheid geven tot een geleidelijke snelheidsafname (stappentheorie).

4.2 Bestaande richtlijnen

4.2.1 ROA 1993

Slipcriterium

In ROA 1993 [5] staat een karakteristiek die het verband aangeeft tussen de boogstraal, de ontwerpsnelheid en de dwarsverkanting (zie figuur 13).



Figuur 13 – Bijlage I, Het verband tussen de boogstraal, de ontwerpsnelheid en de verkanting bij nat wegdek

Toelichting:

- De gepresenteerde minimale boogstralen zijn alleen gebaseerd op het slipcriterium: ze zijn een functie van de ontwerpsnelheid en de dwarsstroefheid (zoals destijds aangenomen bij een nat wegdek en stevig remmen).

Relatie boogstraal en verkanting

De positieve verkanting bedraagt minimaal 2,5% uit overwegingen van waterafvoer. Zonodig worden grotere verkantingen toegepast, enerzijds om een deel van de middelpuntvliedende krachten op te vangen en anderzijds om de zichtbaarheid van

de boog te verbeteren. Uit een oogpunt van continuïteit van wegkenmerken zal bij een gekozen ontwerpsnelheid aan een krappere boog een evenredig grotere verkanting worden gegeven. Door deze evenredigheid tussen boogstraal en verkanting zal de inschatting van de boog worden ondersteund.

Ter voorkoming van ongewenst kleine boogstralen in horizontale bogen wordt voor de hoofdrijbanen een verkantingsmaximum van 5% aangehouden. Op de overige rijbanen – waar de ontwerper dikwijls geconfronteerd wordt met de noodzaak kleinere boogstralen te kiezen – dient uit veiligheidsoogpunt de verkanting zo lang mogelijk in evenredigheid met de boogstraal te zijn. De bovengrens wordt hier bepaald door het probleem van het afglijden van langzaam rijdende of stilstaande voertuigen op een glad wegdek en is 7%, in uitzonderingssituaties 8%.

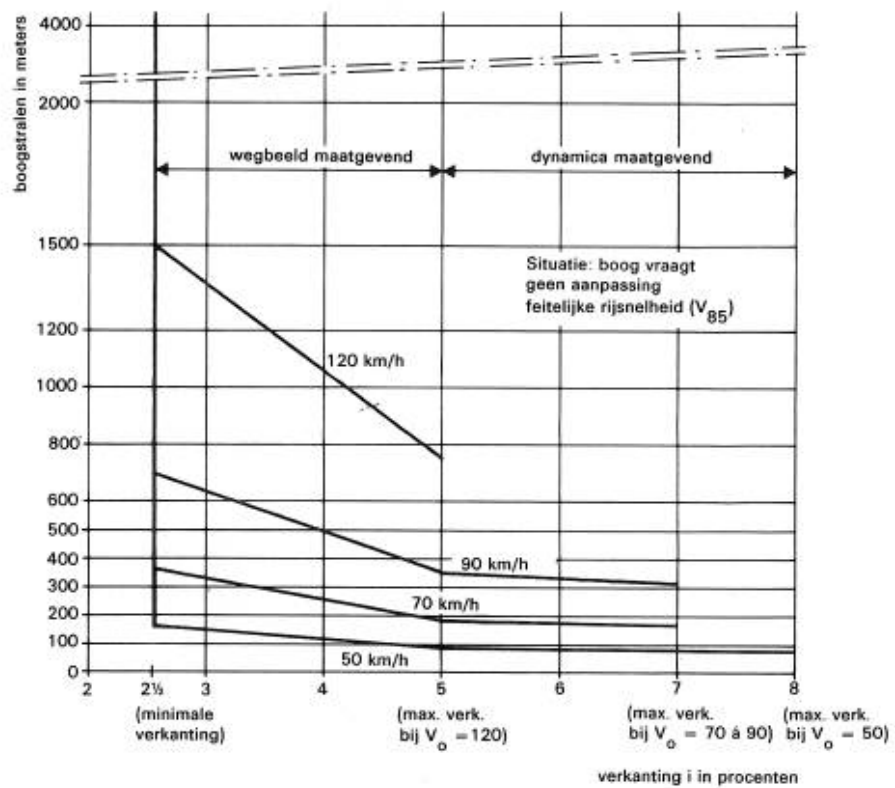
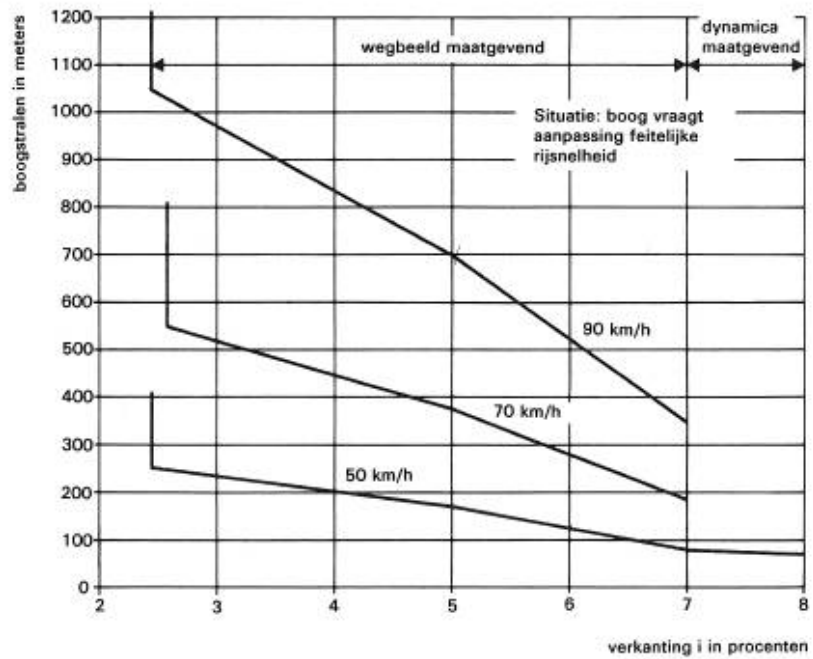
Indien de ontwerpsnelheid van de boog en de boogstraal bekend zijn, kan de aan te brengen positieve verkanting worden bepaald met behulp van figuur 14. Hierbij speelt de verhouding tussen de rijnsnelheid in de boog en die op voorgaande wegelementen een rol. Zo zal een krappe lus een grotere verkanting moeten krijgen indien die wordt opgereden vanaf de hoofdrijbaan dan vanaf een weg met een lagere ontwerpsnelheid. Daarbij zal niet altijd uitgegaan kunnen worden van de ontwerpsnelheid van het voorgaande weggedeelte. Er zal rekening moeten worden gehouden met de te verwachten rijnsnelheden.

Naast een stuurverdraaiing wordt in het eerste geval ook een snelheidsaanpassing van de automobilist gevergd; dan is extra verkanting noodzakelijk opdat de boog er in het wegbeeld duidelijker "uit zal springen".

Het onderste deel van figuur 14 dient te worden gehanteerd indien de ontwerpsnelheid van de boog gelijk is aan de snelheid op het voorgaande weggedeelte. In het gebied waar $i=2,5\%$ tot 5% is de zichtbaarheid maatgevend voor de keuze van de verkanting. Voor de waarden van $i \geq 5\%$ is de voertuigdynamica maatgevend.

Het bovenste deel van figuur 14 moet worden gehanteerd indien de ontwerpsnelheid van de boog kleiner is dan de snelheid op het voorgaande weggedeelte. Ten opzichte van het onderste deel van de figuur wordt – bij krappere bogen – bij gelijke boogstraal steeds 2-2,5% extra verkanting gegeven.

Plan van aanpak veiligheidsfactoren horizontale bogen



Figuur 14 – Minimale boogstralen bij bogen met snelheidsaanpassing (boven) en zonder snelheidsaanpassing (onder)

Een algemeen overzicht van toe te passen waarden voor R_h is opgenomen in tabel 2. Waar voldoende ruimte aanwezig is, dienen de boogstralen uit dit overzicht te worden toegepast.

<i>Toepassingsmogelijkheden</i>	<i>Horizontale boogstraal (m)</i>	
	$V_0=120$ km/h	$V_0=90$ km/h
Rechte tracégedeelten - Bij voorkeur toe te passen boogstralen ter vervanging van rechtstanden	40.000 < R < 100.000	
<i>Gebogen tracégedeelten</i> - Negatieve verkanting toepasbaar - Voldoende royaal wegbeeld - Zichtproblemen mogelijk - Minimum boogstraal, rijtechnisch	$R > 4.000$ $R > 1.500$ $R < 2.000$ $R = 750$	$R > 2.000$ $R > 1.500$ $R < 800$ $R = 350$
<i>Hoofdrijbanen bij knooppunten en aansluitingen</i> - Parallax bij waarneming van informatie boven rijbaan - Uitvoegen bij linksdraaiende boog - Uitvoegen bij rechtsdraaiende boog	$R < 3.000$ $R > 10.000$ $R > 2.000$	

Tabel 2 – overzicht bij voorkeur toe passen boogstralen

In tabel 3 zijn de minimum boogstralen aangegeven. Deze boogstralen dienen bij hoge uitzondering te worden toegepast; ze zijn uit een oogpunt van verkeersveiligheid en wegbeeldkwaliteit niet gewenst.

<i>Ontwerpsnelheid (km/h)</i>	<i>Absolute minima (rijtechnische overwegingen)</i>	
	<i>Hoofdrijbaan, $i=5\%$</i>	<i>Overige rijbanen, $i=7\%$</i>
120	750	n.v.t.
90	350	320
70	185	170
50	85	80

Tabel 3 – overzicht minimale boogstralen

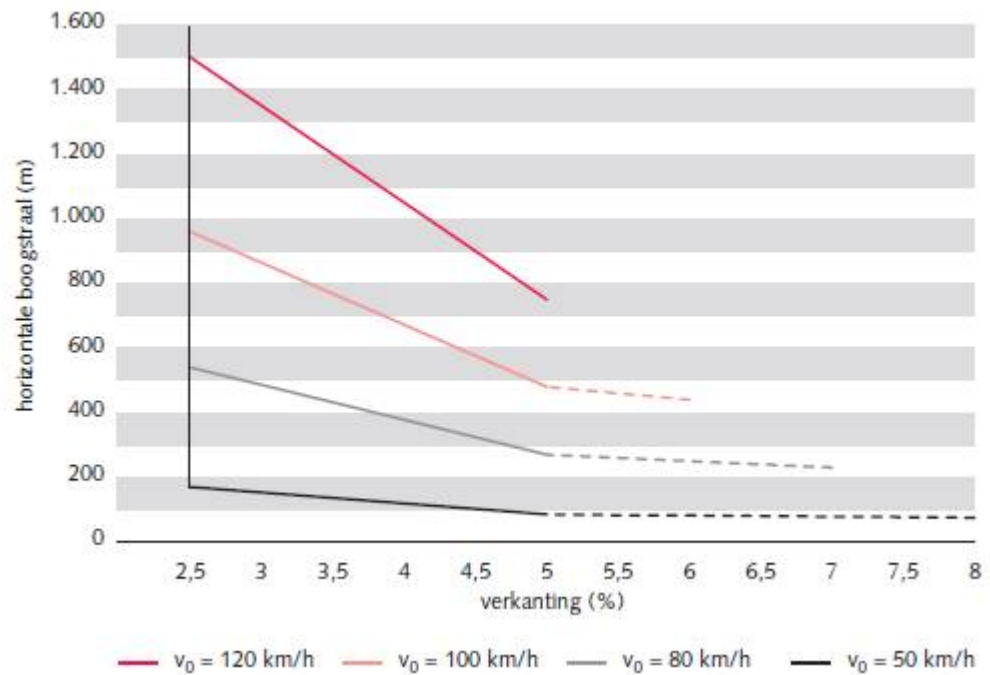
Deze minima mogen niet worden toegepast:

- Bij horizontale bogen in combinatie met krappe verticale elementen (in verband met inschattingsproblemen)
- In situaties waar ten gevolge van de krappe boogstralen het niet mogelijk is voldoende zichtlengte te realiseren
- In de hoofd- en parallel rijbanen van knooppunten en aansluitingen ter plaatse van con- en divergentiepunten.

4.2.2

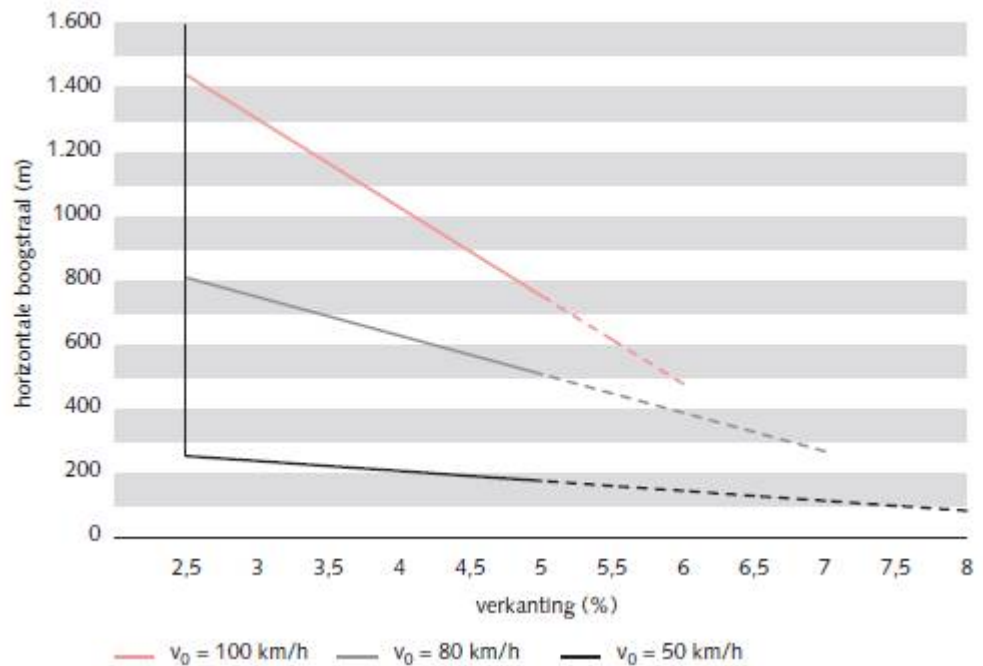
NOA

Voor de bepaling van de gewenste straal van de horizontale boog en de verkanting die daarmee correspondeert, worden de figuren 15 en 16 en de bijbehorende tabellen gebruikt.



verkanting (%)	120 km/h	100 km/h	80 km/h	50 km/h
2,5	1.500	960	540	170
3	1.350	864	486	153
3,5	1.200	768	432	136
4	1.050	672	378	119
4,5	900	576	324	102
5	750	480	270	85
5,5		460	260	83
6		440	250	82
6,5			240	80
7			230	78
7,5				77
8				75

Figuur 15 – Minimale boogstralen bij bogen zonder snelheidsaanpassing



verkanting (%)	100 km/h	80 km/h	50 km/h
2,5	1.440	810	255
3	1.303	750	240
3,5	1.166	690	224
4	1.029	630	209
4,5	891	570	193
5	754	510	178
5,5	617	450	162
6	480	390	147
6,5		330	131
7		270	116
7,5			100
8			85

Figuur 16 – Minimale boogstralen bij bogen met snelheidsaanpassing

Bepalend voor de keuzemogelijkheden binnen de figuren is de zijdelingse wrijvingsweerstand waarmee in een boog centrifugaalkrachten worden opgenomen. Het uitgangspunt bij de figuren 15 en 16 is, dat bij een verkantingswaarde van 2,5 procent in horizontale bogen de centrifugaalkracht wordt opgenomen door niet meer dan 10 procent van de zijdelingse wrijvingsweerstand. De standaardwaarden voor horizontale boogstralen komen hieruit voort. Dit betekent dat, bij afwijking van de standaardwaarden voor horizontale boogstralen, de verkanting groter wordt naarmate de boogstraal kleiner wordt. Daarbij dient wel rekening te worden gehouden met de eisen aan de verkanting.

De twee figuren (met hun bijbehorende tabellen) gelden elk voor een andere situatie:

- Figuur 15 wordt gebruikt wanneer de boog geen aanpassing vraagt van de feitelijke rijsnelheid. Hierbij is de ontwerpsnelheid van de boog gelijk aan de ontwerpsnelheid van het voorgaande weggedeelte.
- Figuur 16 wordt gebruikt wanneer, in lijn met de stappentheorie, de ontwerpsnelheid van de boog kleiner is dan de ontwerpsnelheid op het voorgaande weggedeelte.

Figuur 16 is daardoor niet van toepassing op hoofdrijbanen. Voor figuur 15 geldt dat de nog net toe te passen boogstralen (bij afwijking van de standaardwaarden voor de boogstraal) voortkomen uit het verkeersveiligheidsuitgangspunt dat in de horizontale boog de centrifugaalkracht wordt opgenomen door maximaal 25 procent van de zijdelingse wrijvingsweerstand.

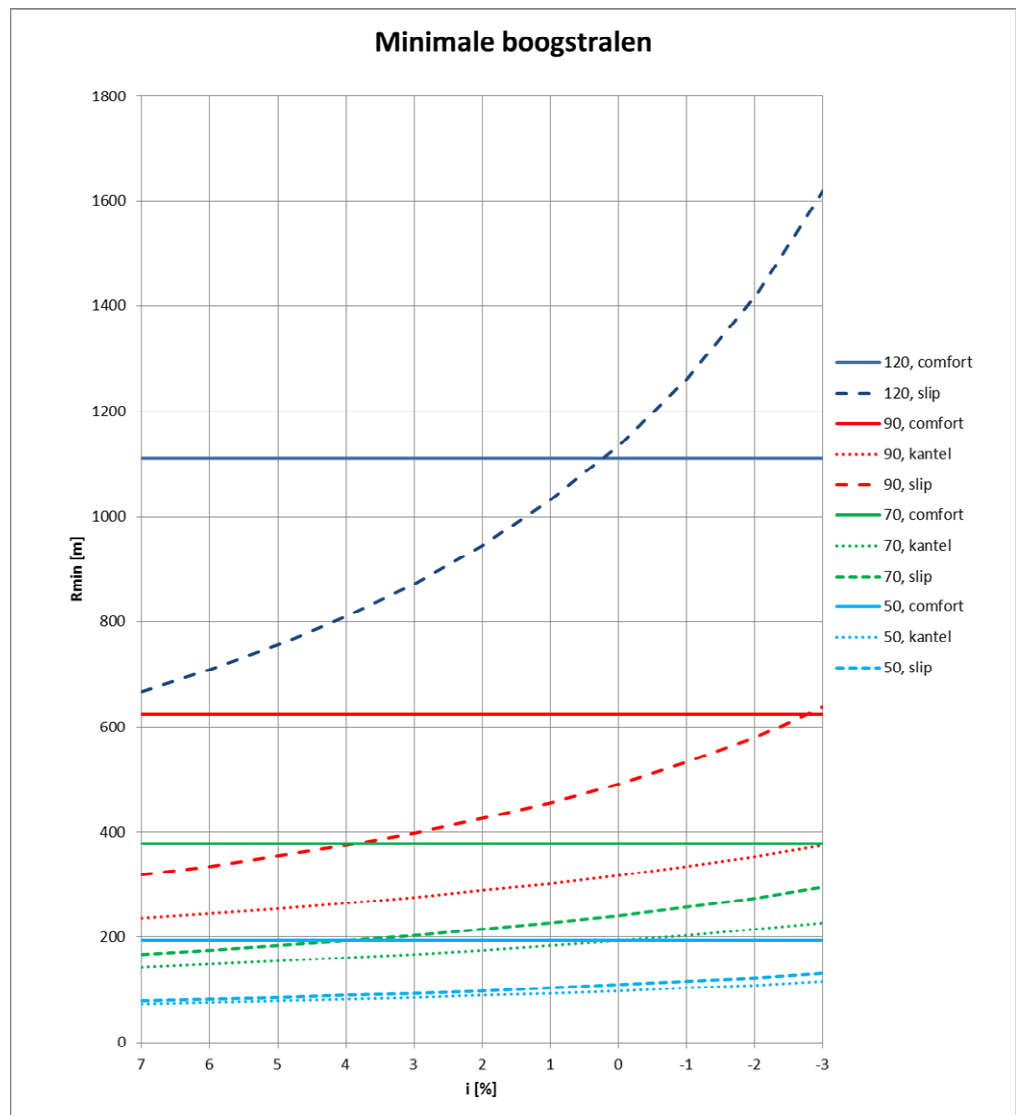
Deze boogstralen zijn niet toepasbaar in de volgende gevallen:

- bij horizontale bogen in combinatie met krappe verticale elementen (in verband met inschattingsproblemen, zie de relatie zichtafstand – horizontale boog – verticale boog in § 7.3.3 van de NOA)
- in situaties waar ten gevolge van de krappe stralen het niet mogelijk is om voldoende zichtafstand te realiseren (zie de relatie zichtafstand – horizontale boog – verticale boog in § 7.3.3 van de NOA)
- Ter plaatse van convergentie- en divergentiepunten, in zowel de hoofd-, rangeer- en parallelbanen van knooppunten als in aansluitingen. Voor figuur 16 geldt dat de nog net toe te passen boogstralen voortkomen uit het (verkeersveiligheids)uitgangspunt, dat in de horizontale boog de centrifugaalkracht wordt opgenomen door maximaal 15 procent van de zijdelingse wrijvingsweerstand.

4.3 Opbouw nieuwe richtlijn

Op basis van de drie ontwerpcriteria voor horizontale bogen, wordt nu een beeld geschetst van de opbouw van een nieuwe (geactualiseerde) richtlijn voor horizontale bogen.

In figuur 17 zijn de contouren van de nieuwe richtlijn visueel weergegeven.



Figuur 17 – Minimale boogstralen als functie van ontwerpcriteria en verkanting

Toelichting:

- De in figuur 17 weergegeven waarden zijn fictief en alleen bedoeld ter ondersteuning van het ontwerp principe;
- Omdat voor het kantelcriterium de vrachtauto (al dan niet met aanhanger of oplegger) maatgevend is, is bij ontwerpsnelheid 120 km/uur het kantelcriterium niet afgebeeld;
- Voor elke ontwerpsnelheid moeten de drie ontwerpcriteria (minimale horizontale boogstralen als functie van de verkanting) op basis van actuele inzichten van de parameterwaarden worden bepaald;
- Uiteindelijk leidt dit per ontwerpsnelheid tot een minimale boogstraal als functie van de verkanting. Hierbij kan het maatgevende criterium afhankelijk zijn van de verkanting: in het bovenstaande voorbeeld is bij $v_0=120$ km/uur bij verkantingen van +7% tot 0% het comfortcriterium maatgevend en bij verkantingen kleiner dan 0% (negatieve verkanting) het slipcriterium.

- Ook wanneer de ontwerpsnelheden onderling worden vergeleken bij eenzelfde verkanting, kan het maatgevende criterium verschillen.
- De grafiek in figuur 17 gaat uit van een continue verloop van de criteria en één maatgevende situatie. In de oude richtlijnen (ROA en NOA) wordt echter onderscheid gemaakt in bogen met eenzelfde ontwerpsnelheid als het voorafgaande wegvak en bogen met een lagere ontwerpsnelheid. Op basis van de bevindingen uit het eerder uitgevoerde onderzoek naar stroefheid, kan geconcludeerd worden dat dit een noodzakelijk onderscheid is. Maar wellicht is het wenselijk om meer verschillende situaties te onderscheiden. Dit onderzoek moet hier meer inzicht in verschaffen.

4.4 Veiligheidsfactoren

4.4.1 Inleiding

De verticale ligging van de lijnen in figuur 17 wordt bepaald door de parameterwaardes en veiligheidsfactoren die voor elk criterium worden gehanteerd. In deze paragraaf gaan wij nader in op het gebruik van veiligheidsfactoren.

4.4.2 Theorie veiligheidsfactoren

In het onderzoek naar dwarsstroefheid is een aantal parameters gevarieerd: onder meer de rijsnelheid, de weersgesteldheid (droog/nat wegdek), type verharding (DAB/ZOAB, oud/nieuw) en de kwaliteit van de testband. Niet alle parameters zijn echter onderzocht.

De waardes van de onderzochte parameters zijn gekozen op basis van representativiteit (de meest voorkomende waarde in de praktijk) of extreme waardes (een minimum of een maximum waarde die voorgeschreven is). Om de maatgevende dwarsstroefheid voor een nieuwe richtlijn vast te stellen, is echter inzicht nodig in:

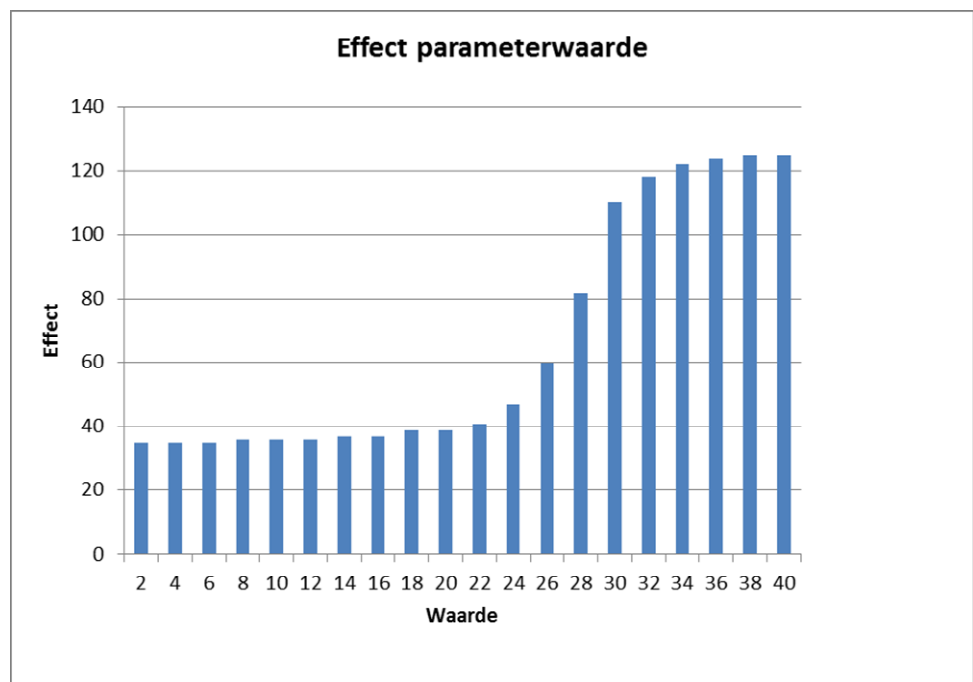
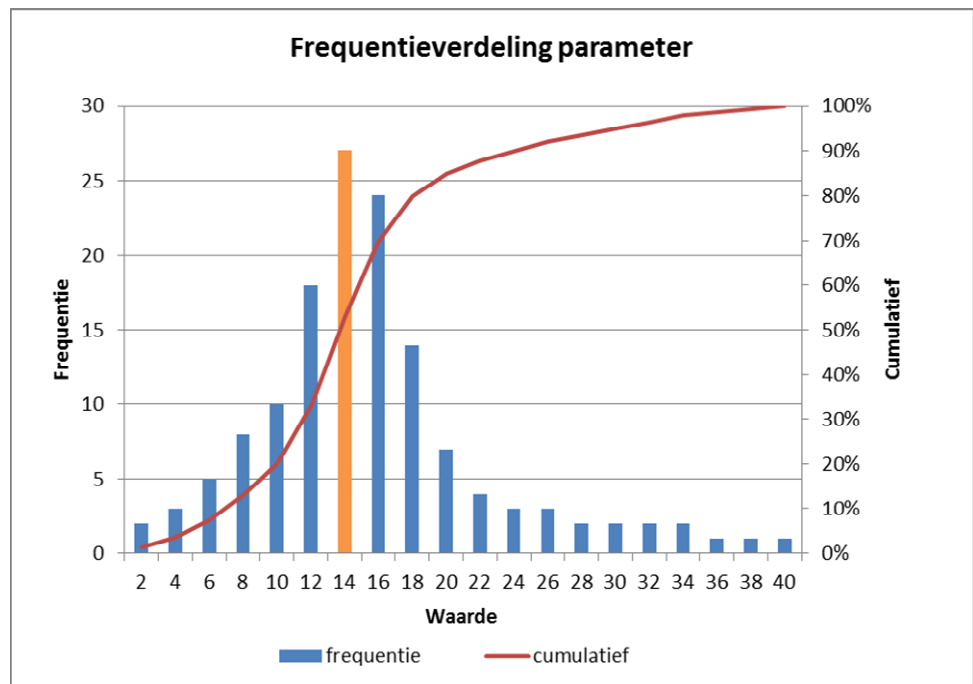
- a) Het effect van de volledige range aan parameterwaardes op dwarsstroefheid;
- b) Het effect van niet-onderzochte parameters op dwarsstroefheid.

In een ideale situatie wordt van alle niet-onderzochte parameters alsnog het effect bepaald. Dit kan (in volgorde van afnemende wenselijkheid) door praktijkmetingen, simulaties of een expert-guess.

Uiteindelijk zal voor elke parameter moet worden bepaald met welke uiterste waarde rekening gehouden wordt: gebruikelijk zijn een 85,- 95,- of een 100-percentiel waarde (de laatste bijvoorbeeld bij de doorrijhoogte die gebaseerd is op een wettelijke maximum hoogte van een voertuig dat zonder ontheffing op de weg mag).

Bij de keuze van het percentiel wordt ook gekeken naar het verband tussen de parameterwaarde en het effect (in dit geval dwarsstroefheid).

In figuur 18 is de basis voor de keuze van veiligheidsfactoren visueel weergegeven voor een fictieve parameter.

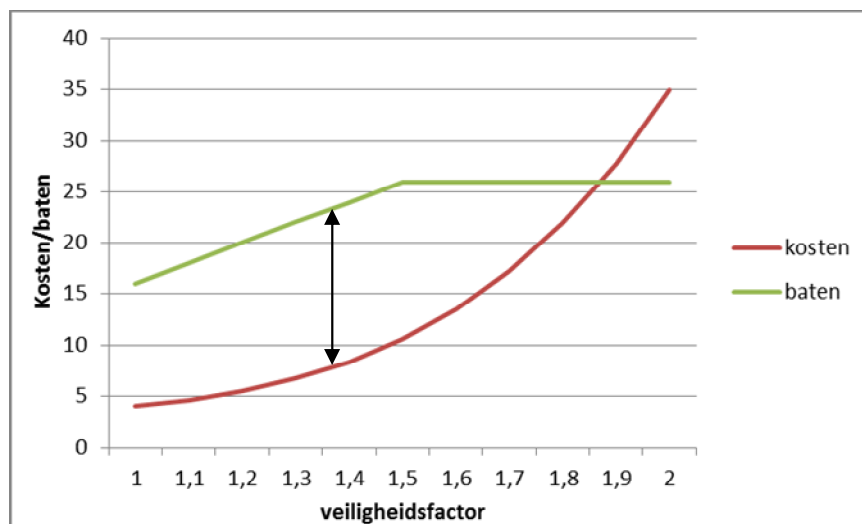


Figuur 18 – Principes bij keuze percentielwaarde als basis voor veiligheidsfactor

Toelichting:

- In figuur 18 is de frequentieverdeling van de parameter weergegeven zoals deze in de praktijk voorkomt;
- Voor de meest voorkomende waarde (14, in de oranje staaf weergegeven) is een praktijkmeting uitgevoerd;

- In de praktijk komen waarden tot 40 voor; met welk percentiel moet rekening worden gehouden voor de maatgevende parameterwaarde?
 - In de onderste grafiek is het verband tussen de parameterwaardes en het effect weergegeven. Hieruit blijkt dat er boven de parameterwaarde een sterke stijging van het effect optreedt en dat het effect boven de 32 stabiliseert;
 - Met behulp van deze informatie kan (gemotiveerd) een keuze worden gemaakt voor een percentiel en daarmee de veiligheidsfactor worden afgeleid.
 - Hierbij geldt het uitgangspunt dat er voor een economisch optimum gekozen moet worden:
 - een te hoge veiligheidsfactor leidt tot overdimensionering en erg hoge kosten;
 - een te lage veiligheidsfactor leidt tot een te hoog risico;
- In figuur 19 is (fictief) het verloop van de kosten en baten voor een veiligheidsfactor voor een parameter weergegeven.



Figuur 19 – Keuze veiligheidsfactor op basis van verhouding koste en baten

In de nieuwe richtlijn is het wenselijk om onderscheid te maken in parameters die specifiek zijn voor een te ontwerpen boog (zoals v_0 , type boog, verkanting, aantal rijstroken, ect.) en parameters die niet per ontwerp variëren:

- Voor de eerste categorie geldt, dat ze idealiter als element van de ontwerpcriteria meegenomen moeten worden (voor zover ze onderscheidend zijn voor de toe te passen boogstralen). Wanneer het effect moeilijk te kwantificeren is, kan besloten worden om hier (voorlopig) een veiligheidsfactor voor aan te nemen.
- Voor de tweede categorie geldt, dat hier een keuze gemaakt moet worden voor de maatgevende parameterwaarde en de bijbehorende veiligheidsfactor moet worden afgeleid (geldt bijvoorbeeld voor het voertuigtype, lading en de voertuigkenmerken bij het kantelen van vrachtauto's).

5 Onderzoeksopzet

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we in op de opzet voor de verschillende deelonderzoeken om de richtlijn voor het ontwerpen van horizontale bogen te actualiseren. Hiertoe worden eerst een aantal onderzoeksvragen gedefinieerd die met het onderzoek beantwoord moeten worden. Na de beschrijving van de mogelijkheden voor verschillende deelonderzoeken, wordt in 5.4 aan de hand van een stappenplan aangegeven welke deelonderzoeken prioriteit hebben.

5.2 Onderzoeksvragen

Op basis van de informatie uit de voorgaande hoofdstukken, kan een aantal onderzoeksvragen worden gedefinieerd. Deze onderzoeksvragen geven een nadere invulling aan het doel van het onderzoek:

- A. Welke parameters moeten in de modellen voor het slip-, kantel- en comfortcriterium worden opgenomen?
- B. Welke parameterwaardes zijn representatief voor de parameters die in de modellen voor het slip-, kantel- en comfortcriterium worden opgenomen?
- C. Welke veiligheidsfactoren moeten worden gehanteerd in de modellen voor het slip-, kantel- en comfortcriterium?
- D. Welke parameters zijn bepalend voor de inrijnsnelheid in horizontale bogen, gedifferentieerd naar type boog, voertuigtype en omstandigheden?
- E. Met welke situaties en scenario's moet rekening worden gehouden bij het bepalen van de veiligheidsfactoren?
- F. Hoe moet het 'model' voor de geactualiseerde richtlijn voor het ontwerp van horizontale bogen eruit zien?
- G. Met welke eventuele externe randvoorwaarden moet rekening worden gehouden bij het bepalen van de geactualiseerde richtlijn?
- H. Is het mogelijk om de minimale boogstralen ten opzichte van de vigerende richtlijnen te verkleinen zonder het veiligheidsniveau te verlagen? Levert het vergroten van de minimale boogstralen een hoger veiligheidsniveau op?

5.3 Algemeen onderzoek

Naast onderzoek naar de verschillende ontwerpcriteria en de inrijnsnelheid, is het wenselijk om algemeen onderzoek uit te voeren; dit onderzoek dient als kader voor de deelonderzoeken.

5.3.1 *Ongevallenanalyse*

Op basis van de informatie uit het ongevallenbestand BRON een onderzoek gedaan naar de relatie tussen diverse parameters en de ongevalsfrequentie. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in onder meer het type boog, de ontwerpsnelheid, het type voertuig en het type ongeval.

Voor horizontale bogen in doorgaande rijbanen van autosnelwegen is een soortgelijk onderzoek door DVS en TNO al uitgevoerd [6].

Indicatie kosten: €10.000,- tot €15.000,-

5.3.2 *Literatuurstudie buitenlandse ontwerprichtlijnen en ontwerphandboeken*

Uit buitenlandse richtlijnen en ontwerphandboeken kan (mogelijk) informatie over de ontwerpcriteria worden herleid. Wellicht zijn ook onderbouwende onderzoeken te traceren. Daarnaast is het interessant om te onderzoeken hoe buitenlandse richtlijnen zijn opgebouwd en hoeveel verschillende typen bogen worden onderscheiden.

Gedacht kan worden aan het onderzoeken van de Amerikaanse richtlijnen (AAHSTO Green Book [7]), Duitse richtlijnen (RAL [8]), Scandinavische richtlijnen, de Highway Safety Manual [9], Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook (Lamm, et al. [10]) en het NCHRP Report 600 Human factors Guidelines for Road Systems [11].

Indicatie kosten: €10.000,-

5.4 Deel A: Inrijnsnelheid boog

5.4.1 Inleiding

Vanuit de verwachtingen van weggebruiker bezien, is het belangrijk om onderscheid te maken in:

- a) Boog in de doorgaande route van een ASW zonder dat er een routekeuze beslissing genomen hoeft te worden: men vervolgt zijn/haar weg op de autosnelweg en normaal gesproken is er geen snelheidsaanpassing noodzakelijk, de ontwerpsnelheid is maatgevend, de weggebruiker verwacht geen noodzakelijke aanpassing gedrag
- b) Als onder a) maar dan bij een knooppunt waar de bestuurder zijn/haar weg moet vervolgen: normaal geen snelheidsaanpassing en de ontwerpsnelheid is maatgevend;
- c) Bij een knooppunt/rijbaansplitsing moet een routekeuze worden gemaakt voor een afslaande richting (andere autosnelweg) en is een geringe snelheidsaanpassing noodzakelijk; belangrijk daarbij is dat de niveaus van de rijtaak goed gescheiden gehouden kunnen worden en de verschillende taken in de goede volgorde en na elkaar kunnen worden uitgevoerd.
- d) Bij een boog van een afrit waar een forse snelheidsaanpassing noodzakelijk is. Hoe eenduidiger en uniformer afritten vormgegeven worden, hoe beter de situatie die men nadert overeenstemt met de a-priori verwachtingen van de weggebruiker en hoe meer hij zijn gedrag adequaat kan aanpassen.

5.4.2 Stappenplan onderzoek

Om richtlijnen betere onderbouwing te geven, is onderzoek naar rijgedrag van weggebruikers bij de nadering en het nemen van bogen vereist. Afwijkingen van wat standaard toegepast wordt, vereisen compenserende maatregelen. Effectiviteit van bepaalde compenserende maatregelen vereist wellicht apart onderzoek.

Algemene stappen:

1. Literatuurstudie naar relevante parameters en reeds verricht relevant onderzoek elders ten aanzien van inrijnsnelheid boog en comfortcriterium, aangevuld met een wegbeeldanalyse voor een aantal prototypische (probleem)bogen in het Nederlandse hoofdwegennet. Op basis van de resultaten van het literatuuronderzoek en wegbeeldanalyses, opstellen van een gedetailleerde onderzoeksopzet met de keuze van te onderzoeken condities en parameters. Hierbij horen ook keuzes ten aanzien van de te meten variabelen en onderzoeksmethodes;
2. Uitvoeren empirisch gedragsonderzoek;
3. Interpretatie resultaten voor richtlijnen wegontwerp.

In het onderzoek zal aandacht worden besteed aan de volgende vragen:

- Wat zijn de kenmerkende weggebruikers: bestuurders vrachtwagen en bestuurders personenauto? Voor wie wanneer?
- Wat zijn bepalende boogkenmerken die door weggebruikers waargenomen moeten kunnen worden?
- Hoe is het gedrag van weggebruikers tijdig en adequaat te beïnvloeden?

5.4.3 *Literatuurstudie bestaand onderzoek*

In het verleden is door Riemersma in de jaren '80 [12, 13] redelijk wat fundamenteel perceptief onderzoek gedaan naar het waarnemen van boogkenmerken met vectordisplay, maar hierbij is:

- Geen onderscheid gemaakt naar dag/nacht
- Geen onderzoek gedaan naar 'aangeklede' bogen
- Geen toetsing aan praktijk uitgevoerd.

Ook naar het aspect 'afstand tot het begin van de boog' is door Riemersma onderzoek gedaan. Hierbij maakte hij onderscheid in

- 3 trajecten: 240m-160m, 160m-80m, 80m-0m;
- Boogstraal R (80, 225, 578, 1700, 8400) (of boogkromming 1/R)
- en Booghoek (hoekverdraaiing) (3.58, 7, 14, 20, 26 gr)/lengte van het gebogen weggedeelte.

De hoekverdraaiing heeft invloed op de beoordeling gekromdheid van een boog en moet bij de berekening minimale boogstraal worden meegenomen (Riemersma, 1988). Overgangsbogen maken het discrimineren tussen grotere booghoeken moeilijker en positieve verkanting verbetert de kwaliteit van preview op een boog (Riemersma, 1989).

Voor beoordelen inrijnsnelheid boog neemt Human Factors Guidelines for Road Systems [11] een gebied van circa 4 s (75-100 m), Riemersma vindt overzichtelijkheid van de boog in het gebied 160-80 m voor het begin van de boog het grootst voor bogen met een boogstraal tussen 578 en 1700 m en overzichtelijkheid voor alle onderzochte booghoeken goed in gebied 80-0 m.

De grootte van het te overbruggen snelheidsverschil is belangrijk voor gebied van snelheidsaanpassing. De overgangsboog geeft als het goed is een geleidelijke overgang naar de boog en maakt tevens geleidelijke snelheidsaanpassing mogelijk. Hierbij speelt de Jerk (afgeleide van versnelling) een rol; de maximum jerk is 0.3 – 0.9 m/s³ (AASHTO).

De snelheid in de boog is tevens afhankelijk van het beschikbare rijzicht.

De bovenstaande aspecten zullen aan de hand van een literatuurstudie naar human factors onderzoek naar het gedrag in bogen en een wegbeeldanalyse van een aantal prototypische (probleem)bogen in het Nederlandse hoofdwegennet nader worden uitgewerkt.

Wegbeeldanalyse

Bij een wegbeeldanalyse inventariseren en beoordelen twee experts (met kennis van menselijk functioneren in het verkeer en met kennis over de manier waarop mensen informatie verwerken en hoe ze beslissingen nemen) wat weggebruikers op het onderhavige traject tegenkomen en hoe dat hun gedrag en het nemen van beslissingen op een bepaald moment en bepaalde plaats kan beïnvloeden. Dit heeft tot doel om specifieke wegbeeldelementen op te sporen die mogelijk aanleiding geven tot aarzelend of onveilig gedrag [14]. Hierbij wordt de rijtaak van een weggebruiker onderscheiden in een drietal hiërarchische niveaus, te weten; het strategisch niveau, het manoeuvre niveau en het regel niveau. Taken op het strategisch niveau bestaan uit de planning en het volgen van een route naar een bestemming. Op het manoeuvre niveau worden taken uitgevoerd die betrekking hebben op de interactie met zowel de omgeving (wegverloop, verkeersborden, verkeerssignalering, etc.) als de andere weggebruikers (inhalen, voorrang geven, stoppen, etc.). Dit taakniveau bevat ook elementen zoals snelheids- en rijstrookkeuze. Op het regel niveau wordt de beweging van het voertuig in longitudinale en laterale richting gemonitord en uitgevoerd. Elk niveau vereist een specifieke input aan informatie voor de opeenvolgende informatieverwerkingsprocessen van waarneming, verwerken, beslissen en handelen. De complexiteit en urgentie van de verschillende niveaus van de rijtaak verschillen. Routekeuze is relatief complex en vergt veel aandacht van de bestuurder, terwijl activiteiten op het controle niveau het minst complex zijn en minder bewuste aandacht vergen. De mate van complexiteit van de verschillende rijtaakniveaus hangt overigens wel af van de ervaring van de bestuurder, zowel met het rijden zelf als met de betreffende rijomgeving. Ook verschillen de rijtaakniveaus in de mate van urgentie. Aangezien bestuurders slechts een beperkte hoeveelheid informatie kunnen verwerken is het van belang informatie en actie voor de bestuurder op elk niveau zoveel mogelijk van elkaar te scheiden in plaats en tijd. Dit maakt de interactie met de wegomgeving en het overige verkeer beter hanteerbaar voor de bestuurder. Een voorbeeld van een recent uitgevoerde wegbeeldanalyse bij een boog in het hoofdwegenet betreft de wegbeeldanalyse bij een verbindingsboog in knooppunt De Stok [15].

Doel is om op basis van de resultaten van de literatuurstudie en de wegbeeldanalyse een gedetailleerde onderzoeksopzet op te stellen met de keuze van te onderzoeken condities en parameters. Hierbij horen ook keuzes ten aanzien van de te meten variabelen en onderzoeksmethodes en –aanpak.

Indicatie kosten:

Literatuurstudie human factors onderzoek: : €10.000,- tot €15.000,- (excl. BTW)Wegbeeldanalyse per locatie inclusief rapportage: ca. € 5.000,- (excl. BTW), bij drie locaties komen de totale kosten op ca. € 13.000,-, bij vijf locaties op ca. € 21.000,- (excl. BTW).

5.4.4

Onderzoeksmethoden voor empirisch gedragsonderzoek

Voor het onderzoek naar het rijgedrag, moet het relevante onderzoeksgebied worden vastgesteld (het gebied waarin het rijgedrag van de weggebruiker wordt beïnvloed). Het relevante gebied bestaat uit:

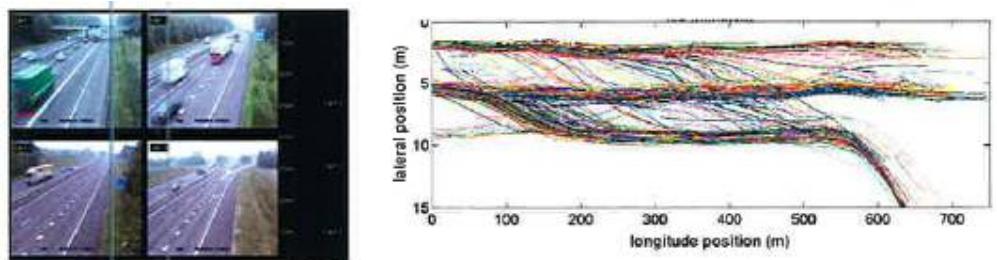
- Het weggedeelte dat begint 160 m voor het begin van de (overgangs)boog
- De overgangsboog

- De boog
- Het traject na de boog (circa 80 m).

Voor het onderzoek naar de inrijsnelheid van bogen kunnen de volgende onderzoeksmethoden worden ingezet:

Op de weg

- *Gedragsobservaties met video (VBM)*
Om het werkelijke gedrag van grote groepen weggebruikers te observeren en te analyseren en in relatie te brengen met bepaalde wegkenmerken, is in het verleden in nauwe samenwerking tussen RWS en TNO een procedure van automatische video analyse ontwikkeld, genaamd Video Based Monitoring (VBM) [16]. Voor toepassing bij horizontale bogen zijn meer camera's noodzakelijk waarbij met een multicamera VBM aanpak voertuigen automatisch van het ene camerabeeld in het volgende beeld gevolgd worden en de trajectoriën van voertuigen over een grotere afstand bepaald kunnen worden. Een voorbeeld daarvan geeft de onderstaande figuur waarbij met 4 camera's voertuigen over een afstand van 700 m gevolgd worden.



Een automatische analyse is mogelijk van het snelheidsverloop (snelheid, versnelling), de dwarspositie, de gereden boog, e.d. De vraag is welke nauwkeurigheid voor de metingen gewenst is; er zijn veel voertuigen te meten. Bij de metingen moet onderscheid worden gemaakt in vrijrijdende/volgende voertuigen (kan op basis van volgtijd criterium van bijvoorbeeld 5 s) en verschillende typen voertuigen. Het nadeel van deze benadering is, dat er weinig bekend is over de bestuurders zelf. De combinatie van gewenste kenmerken van bogen (mede in relatie tot de drie niveaus van de rijtaak, zie ook [15]) moeten in de praktijk beschikbaar zijn.

Indicatie kosten: Multi-camera VBM op 1 locatie: € 26.000,- tot € 30.000,- (excl. BTW). Elke volgende locatie ca. € 18.000,- tot € 22.000,- (excl. BTW)

- *Met geïnstrumenteerd voertuig (bijv. INCA)*

Het voordeel van deze methode is een grote nauwkeurigheid voor het meten van de snelheid en de versnelling (longitudinaal, lateraal). Verder zijn de werkelijke boogstraal en de hoekverdraaiing van de boog te meten uit het camerabeeld. Ook de werkelijk gereden boogstraal, het gereden pad, het kijkgedrag van de bestuurder voor en in de boog en de momentane werkbelasting (PDT) kunnen worden bepaald. Er is een selectie van proefpersonen mogelijk. De kosten voor dit onderzoek zijn sterk afhankelijk van het aantal proefpersonen, het aantal te onderzoeken bogen en de te onderzoeken variabelen.

Indicatie kosten: Een typisch gedragsonderzoek met de INCA met 32 proefpersonen wordt geschat op €80.000 – tot 110 000, - (excl. BTW).

In het laboratorium

Voordeel van een onderzoek in een laboratoriumonderzoek is dat naderingstrajecten en boogkenmerken systematisch kunnen worden gevarieerd en vele combinaties mogelijk zijn:

Waarneembaarheid boogkenmerken bij naderen.

Proefpersoon zit voor display, krijgt met bepaalde naderingssnelheid en vanaf bepaalde naderingsafstand de nadering van een boog te zien en geeft beoordeling op negen 7-punts schalen (1. scherpe bocht – flauwe bocht; 2. Bocht vroeg in zicht – bocht laat in zicht; 3. Bocht overzichtelijk – bocht onoverzichtelijk; 4. hoekig geknikt – rond vloeiend; 5. Wegvervolg duidelijk – wegvervolg onduidelijk; 6. Grote boogkromming – kleine boogkromming; 7. Weg buigt veel af – weg buigt weinig af; 8. vooruitzicht op boog goed – vooruitzicht op boog slecht; 9. Grote afstand tot begin boog – kleine afstand tot begin boog. (zie ook [12, 13])

Indicatie kosten: €40.000,- tot € 60.000,- (excl. BTW).

Gedrag meten in TNO moving-base rijnsimulator,

vooral voor naderingstraject en snelheidsaanpassing tijdens nadering. Het rijgedrag in krappe bogen zelf kan het beste gemeten worden in het advanced motion platform DESDEMONA door een goede terugkoppeling dwarsversnelling in bocht. Voor calibratie en validatie is het gewenst van enkele prototypische bogen in werkelijkheid het rijgedrag beschikbaar te hebben. Aangenomen is dat deze gegevens uit een eerdere fase van het onderzoek beschikbaar zijn.

Indicatie kosten: typische rijnsimulatorexperiment van , €80.000,- tot – 120.000,- (ecl. BTW) (in DESDEMONA € 120.000,- tot 160.000,- (ecl. BTW)).

5.5 Deel B: Slipcriterium

5.5.1 *Keuze en verantwoording onderzoeksmethode*

Als onderzoeksmethode voor het slipcriterium worden simulaties met voertuigmodellen gebruikt om de invloed van parameters van het voertuig, weg en bestuurder vast te stellen. Bij de dwarsstroefheid zal als worst conditie een nat wegdek met een waterlaagdikte van 0.5 mm toegepast worden. Wegdekcondities zoals sneeuw en ijs zijn zeer extreem en er mag van de chauffeur verwacht worden dat rekening wordt gehouden met deze omstandigheden door langzamer te rijden.

Bij de simulaties wordt een gevalideerd model voor drie klassen van personenauto's gebruikt. Van elke autoklasse (conform EuroNCAP) wordt een representatieve auto uitgekozen en daarvan de voertuigparameters bepaald. Hierdoor wordt gesimuleerd met sets van voertuigparameters die overeenkomen met realistische voorkomende personenauto's in plaats van variatie van afzonderlijke voertuigparameters.

Bij remmen in de bocht kan ABS in werking treden, maar dit wordt niet verwacht voor ESP. Zodoende zal het model alleen ABS hebben.

Qua manoeuvres wordt gedacht aan constante bogen en overgangsbogen in combinatie met constante snelheid, remmen, accelereren en rijstrookwisseling. Optioneel kan het onderzoek uitgebreid worden met referentievoertuigen uit andere EuroNCAP klassen.

5.5.2 *Te onderzoeken parameters*

De volgende parameters worden in het simulatieonderzoek betrokken:

- Drie sets voertuigparameters conform EuroNCAP autoklassen. Optioneel één of meer extra EuroNCAP autoklassen;
- Boogstraal;
- Dwarsverkanting;
- Rijsnelheid (constant/vertraging/acceleratie);
- Rijstrookwisseling;
- Wegdektype: ZOAB oud & DAB oud.

De volgende parameters zijn uitgesloten van het onderzoek:

- Bandeigenschappen
Voor de bandeneigenschappen wordt uitgegaan van de metingen met een huidige versleten (APK-afkeur) referentieband op een nat wegdek met een waterdikte van 0.5 mm zoals vastgesteld met de TNO bandenmeetwagen begin 2012. Voor de overige voertuigen worden de bandeneigenschappen aangepast aan de auto klasse;
- Waterlaagdikte
Hiervoor ontbreken de benodigde bandgegevens. Dit vereist uitgebreide en langdurige metingen met de bandenmeetwagen.
- Sneeuw & ijs
Bij deze extreme omstandigheden wordt van de chauffeur verwacht ze te onderkennen met aanpassing van het rijgedrag: verlagen rijsnelheid, winterbanden, etc.;
- ABS: actief;
- ESP: niet aanwezig.

5.5.3 *Stappenplan*

In dit onderzoek worden in grote lijnen de volgende stappen doorlopen:

1. Bepalen van representatieve auto's uit de diverse EuroNCAP klassen;
2. Verzamelen van de voertuiggegevens van de representatieve auto's bij de twee beladingscondities;
3. Fitten van bandmodellen met behulp van de bandenmetingen met de TNO bandenmeetwagen in 2012 en aanpassen voor de verschillende auto's.
4. Beschikbare simulatiemodel geschikt maken voor de representatieve auto's;
5. Bestuurdersmodel (snelheid & sturen) om de gewenste manoeuvres uit te kunnen voeren;
6. Implementeren van een wegmodel waarmee dwarsverkantingen en ook langsverkantingen mogelijk zijn;
7. Implementeren van ABS;
8. Uitvoeren van de voertuigsimulaties;
9. Analyseren simulatieresultaten en bepalen invloed van de diverse parameters op het slipcriterium. Opstellen van de afzonderlijke veiligheidsfactoren;

5.5.4 *Uitvoeringstechnische aspecten onderzoek*

In onderstaande tabel is een globale inschatting van de doorlooptijd en kosten weergegeven.

Activiteit	Duur [wkn]	Kosten [€]
Algemeen		
Vaststellen referentie auto's	3	17250
Verzamelen voertuigdata		
Fitten en aanpassen bandmodellen		
Voor drie referentievoertuigen		
Aanpassen simulatiemodel inclusief bestuurdersmodel, wegmodel, ABS, etc.	6	34500
Uitvoeren simulaties	3	17250
Analyse & bepalen veiligheidsfactoren	3	17250
Voor elke extra referentievoertuig		
Aanpassen simulatiemodel	1	5750
Uitvoeren simulaties	1	5750
Analyse & bepalen veiligheidsfactoren		

5.5.5 *Resultaat*

Rapport met beschrijving van de veiligheidsfactoren van de verschillende parameters van het voertuig, de weg en het rijgedrag op het slipcriterium.

5.6 Deel C: Kantelcriterium

5.6.1 *Keuze en verantwoording onderzoeksmethode*

Het resultaat van de literatuurstudie, uitgevoerd ultimo 2012, is de basis van dit onderzoek. Als worst case vrachtwagen wordt een gevalideerde trekker-oplegger met een zware belading en hoog zwaartepunt gebruikt.

In eerste instantie wordt het kantelkental van dit voertuig bepaald en de minimum boogstralen als functie van de dwarsverkanting en rijnsnelheid in een stationaire bocht. Het voertuig zal voorzien zijn van ABS en een Anti-kantelsysteem.

Qua manoeuvres met het voertuigmodel van de trekker-oplegger wordt gedacht aan constante bogen, overgangsbogen en rijstrookwisselingen (extreem uitwijkmanoeuvres) al of niet in combinatie met remmen of accelereren.

Optioneel kan het onderzoek uitgebreid worden met een vrachtwagen-aanhanger en/of vrachtwagen-wipkar. Hiervoor dient een voertuigmodel te worden ontwikkeld en gevalideerd te worden met beschikbare meetdata van diverse manoeuvres.

5.6.2 *Te onderzoeken parameters*

De volgende parameters worden onderzocht:

- Boogstraal;
- Dwarsverkanting;
- Rijnsnelheid (constant/vertraging/acceleratie);
- Rijstrookwisseling, slalom.

De volgende parameters zijn uitgesloten van het onderzoek:

- Voertuigparameters; trekker-oplegger en optioneel één of twee combinaties;
- Bandeigenschappen: er zijn alleen bandmodellen beschikbaar die verkregen zijn d.m.v. metingen op een flat-track. Validaties van voertuigmodellen voorzien van deze bandmodellen geven goede resultaten. Omdat de dwarsstroefheid veelal aanzienlijk groter is dan het kantelkental wordt niet verwacht dat dit een significante invloed heeft op het kantelgedrag.
- Wegdektype, zie bandeigenschappen
- Wegdek conditie: droog;
- ABS: aanwezig;
- Anti-kantelsysteem: aanwezig;
- Wegdekconditie: alleen droog.

5.6.3 *Stappenplan*

De volgende stappen worden doorlopen in dit onderzoek:

1. Bepalen van de worst case vrachtwagen;
2. Verzamelen van de voertuiggegevens;
3. Bepalen kantelkental van worst case voertuig en bepalen van de minimum boogstralen;
4. Aanpassen beschikbare trekker-oplegger model. Optioneel ontwikkeling vrachtwagen-aanhanger en/of vrachtwagen-wipkar model;
5. Bestuurdersmodel (snelheid & sturen) om de gewenste manoeuvres uit te kunnen voeren;

6. Implementeren van een wegmodel waarmee dwarsverkantingen en ook langsverkantingen mogelijk zijn;
7. Implementeren van ABS en Anti-kantel;
8. Uitvoeren van de voertuigsimulaties;
9. Analyseren simulatieresultaten en bepalen invloed van de diverse parameters op het kantelcriterium. Opstellen van de afzonderlijke veiligheidsfactoren.

5.6.4 *Uitvoeringstechnische aspecten onderzoek*

In onderstaande tabel is een globale inschatting van de doorlooptijd en kosten weergegeven.

Activiteit	Duur [wkn]	Kosten [€]
Algemeen		
Bepalen worst case trekker-oplegger en vrachtwagen-aanhanger Verzamelen voertuigdata Bepalen kantelkental en minimum boogstralen	3	17250
Trekker-oplegger		
Aanpassen simulatiemodel inclusief bestuurdersmodel, wegmodel, ABS, Anti-kantel	8	46000
Uitvoeren simulaties Analyse & bepalen veiligheidsfactoren	4	23000
Extra Vrachtwagen-aanhanger	4	23000
Extra Vrachtwagen-wipkar	4	23000

5.6.5 *Resultaat*

Rapport met beschrijving van de veiligheidsfactoren van de verschillende parameters van de weg en rijgedrag op het kantelcriterium.

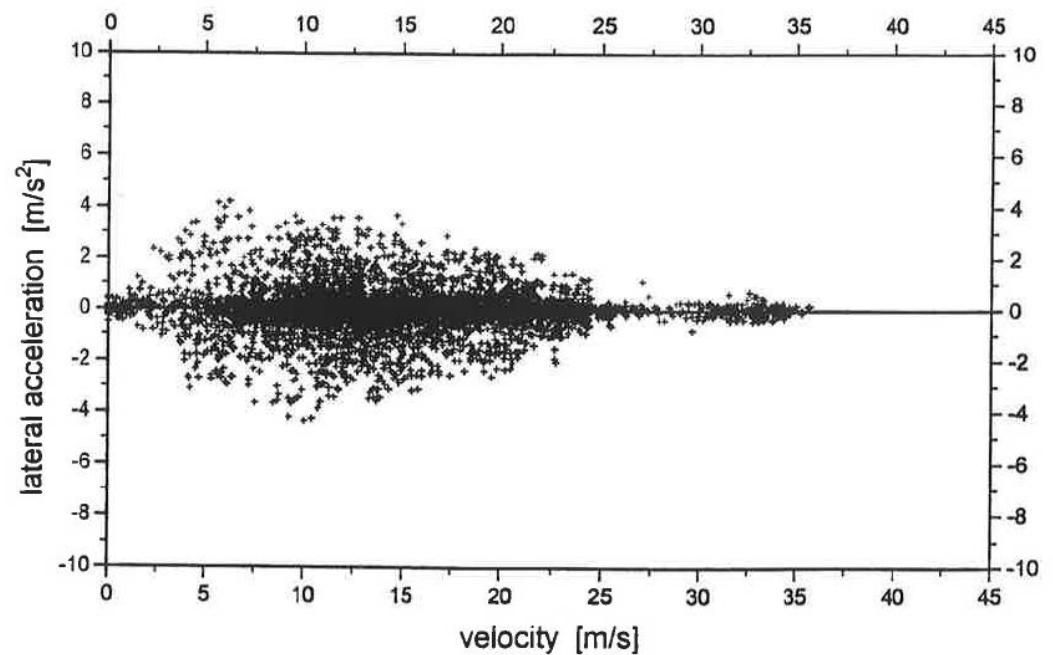
5.7 Deel D: Comfortcriterium

5.7.1 Bestaand onderzoek en richtlijnen

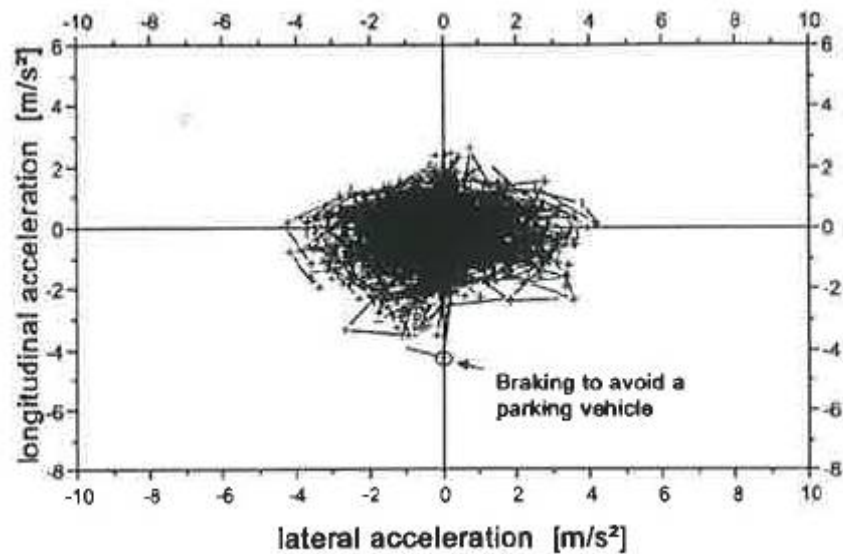
In de ROA uit 1993 wordt voor F_z een waarde van 0.10g bij 120 km/h gegeven, oplopend tot 0.18g bij 50 km/h. Is deze zijdelingse wrijvingsweerstand gebaseerd op comfort?

Wertheim & Hogema [17] hebben comfort metingen gedaan in laboratorium en komen in zijdelingse richting op 0.1g voor constante beweging, voor sinusbeweging ligt de comfortgrens op circa 0.16g.

Een paper over 'Advisory speeds' [18] komt voor snelheden > 35 mph (56 km/h) op een acceptabele laterale acceleratie van 0.21g. De laterale acceleratie is ook afhankelijk van gereden snelheid. Zie bijvoorbeeld onderstaande figuur, uit onderzoek van Van der Horst et al.



Uit dezelfde studie blijkt de laterale versnelling maximaal bij longitudinale versnelling nul, zie onderstaande figuur.



5.7.2

Onderzoeksmethode

Onderzoek naar het comfortcriterium valt goed te combineren met het gedragsonderzoek naar de inrijnsnelheid met een geïnstrumenteerd voertuig en/of met rijnsimulatoronderzoek in DESDEMONA. Dat kan dan plaatsvinden met beperkte extra kosten (20-40k). Bij het rijden met de INCA op de weg is er dan tevens de optie om 2 proefpersonen tegelijk mee te nemen, terwijl de een rijdt, geeft de ander als passagier een beoordeling van het ervaren comfort in bepaalde bogen (beoordelingsschaal zoals bijvoorbeeld gebruikt door Wertheim & Hogema) en vice versa. Elke proefpersoon moet het traject (of een selectie van te onderzoeken bogen) tweemaal rijden, eenmaal met eigen te kiezen (comfortabele) snelheid en eenmaal met een per boog opgelegde snelheid.

Andere mogelijkheid is het rijden met de INCA op een testtrack afgesloten voor ander verkeer, waarbij proefpersonen (virtueel) uitgezette bogen moeten naderen en nemen, eveneens met eigen te kiezen of opgelegde snelheid. Ook hier kan proefpersoon ook als passagier meerijden en oordeel geven over ervaren (dis)comfort.

Deze aanpak is vooralsnog niet nader uitgewerkt, omdat onze inschatting is dat er in het Nederlandse hoofdwegennet voldoende variatie in bogen beschikbaar is om met de INCA op de openbare weg te rijden.

5.8 Prioritering onderzoek

5.8.1 Inleiding

Op 10 december 2012 is dit onderzoeksplan in een bijeenkomst met de klankbordgroep besproken. Bij deze bijeenkomst waren de volgende personen aanwezig:

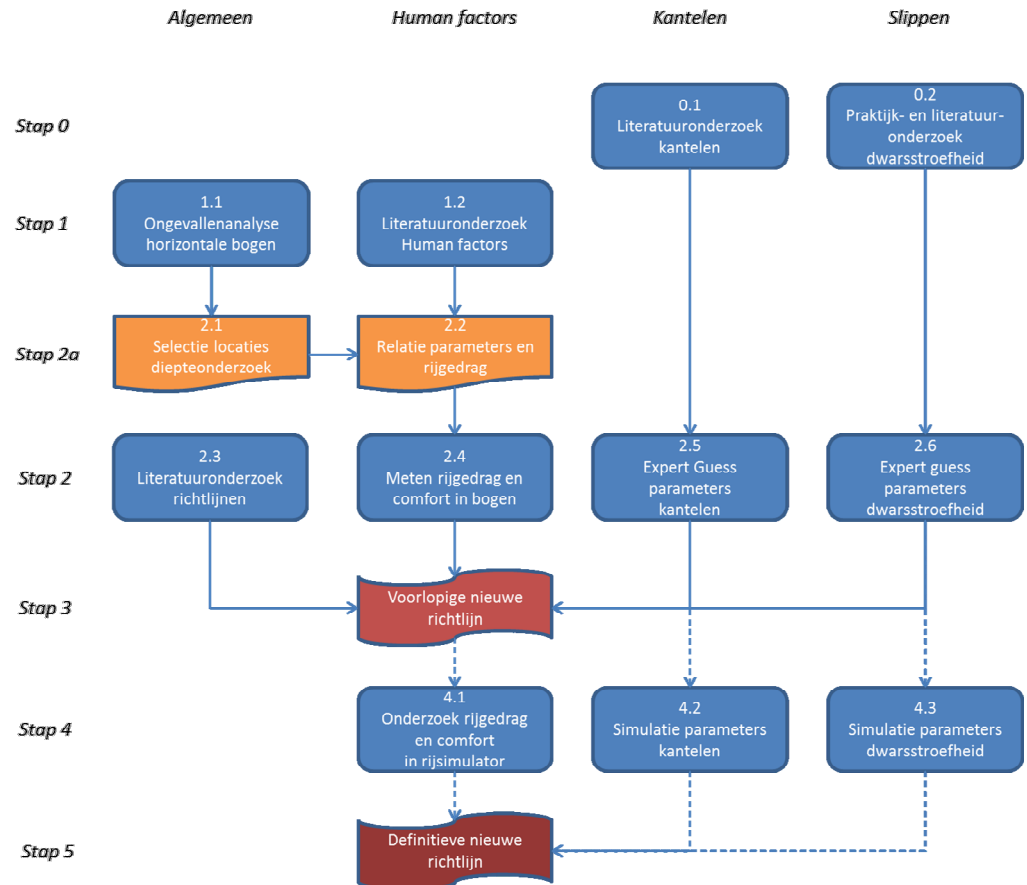
<i>Naam</i>	<i>Organisatie</i>	<i>Discipline</i>
Jaap Groot	RWS DVS	Verkeersveiligheid en wegontwerp
Gerald Uittenbogerd	RWS DVS	Wegontwerp en verkeersveiligheid
Thijs Bennis	RWS DVS	Stroefheid
Erik Vos	RWS DVS	Stroefheid
Paul Schepers	RWS DVS	Human Factors en verkeersveiligheid
Zoran Kenjic	RWS Limburg	Wegontwerp en verkeersveiligheid
Peter Ruijs	TNO	Voertuigtechniek
Richard van der Horst	TNO	Human Factors
Hessel de Jong	ARCADIS	Verkeersveiligheid en wegontwerp
Patrick Broeren	ARCADIS	Verkeersveiligheid en wegontwerp

Tijdens deze bijeenkomst is gediscussieerd over de aanpak van een onderzoek naar de onderbouwing van een nieuwe richtlijn voor horizontale bogen. De in deze paragraaf gepresenteerde aanpak, kan gezien worden als de voorkeursaanpak van de klankbordgroep.

5.8.2

Stappenplan

In figuur 20 is het stappenplan voor het vervolgonderzoek weergegeven.



Toelichting:

- Onder stap 0 zijn de onderzoeken weergegeven die al uitgevoerd zijn: het onderzoek naar stroefheid (metingen met de TNO-bandenmeetwagen en literatuuronderzoek) en het onderzoek naar kantelen van vrachtauto's (literatuuronderzoek). Deze beide onderzoeken zijn de basis voor de keuzes ten aanzien van het slip- en kantelcriterium;
- In stap 1 worden twee voorbereidende onderzoeken uitgevoerd voor een praktijkonderzoek: een ongevallenanalyse voor horizontale bogen en een literatuuronderzoek naar het rijgedrag:
 - De ongevallenanalyse richt zich op het achterhalen van ongevallenpatronen in relatie tot het type horizontaal boog (doorgaande rijbaan, knooppunt, aansluiting, etc.) en ontwerpparameters (boogstraal, verkanting, aantal rijstroken, etc.)
 - Het literatuuronderzoek naar human factors heeft als doel om de relaties tussen parameters en rijgedrag in en rond horizontale bogen (vooral de inrijnsnelheid) in kaart te brengen.
- Op basis van de resultaten van de onderzoeken 1.1 en 1.2 wordt een aantal locaties geselecteerd voor een diepteonderzoek naar human factors (2.4).

- Het diepteonderzoek bestaat uit metingen met behulp van een geïnstrumenteerd voertuig (met proefpersonen) en gedragsmetingen (longitudinaal en lateraal gedrag met behulp van camera's en geautomatiseerde video analyse (VBM)). Het literatuuronderzoek en wegbeeldonderzoek geven input voor het gedetailleerde onderzoeksplan voor het locatieonderzoek: welke parameters zijn interessant te meten? Het diepteonderzoek moet inzicht geven in het werkelijke gedrag en de factoren die de inrijnsnelheid en de snelheidskeuze in horizontale bogen (en daarmee het risico) bepalen. Voor wat betreft de verklarende factoren, moet gedacht worden aan de elementen die bepalend zijn voor de snelheidskeuze: boogstraal en verkanting, geleiderail, verlichting, bebording, etc. Dit levert per onderzochte boog onder meer snelheids- en dwarspositieprofielen op voor verschillende omstandigheden, type weggebruikers en voertuigcategorieën. Door de verschillende bogen met elkaar te vergelijken, worden overeenkomsten en verschillen in beeld gebracht.
- Parallel aan het diepteonderzoek wordt een literatuuronderzoek gedaan naar richtlijnen. Dit onderzoek moet inzicht geven in de structuur en opbouw van buitenlandse richtlijnen. Ook kunnen parameterwaardes die in het buitenland worden gehanteerd, worden vergeleken met parameterwaardes die uit de onderzoeken volgen die in dit kader worden uitgevoerd (en de bestaande Nederlandse richtlijnen).
- Voor het slip- en kantelcriterium worden de veiligheidsfactoren in eerste instantie bepaald aan de hand van een expert guess (onderbouwd door uitgevoerd literatuuronderzoek). Omdat human factors aspecten bepalender zijn voor het veiligheidsniveau in bogen, worden diepteonderzoeken voor deze twee aspecten in een (eventuele) vervolgstudie uitgevoerd.
- De resultaten van de eerste twee stappen worden samengenomen om een voorlopige nieuwe richtlijn vast te stellen. Hierbij komen de volgende aspecten aan bod:
 - Verschillende scenario's. Nu bestaat de richtlijn uit twee verschillende scenario's (wel of niet snelheidsaanpassing), het onderzoek moet uitwijzen in welke scenario's onderscheid moet worden gemaakt;
 - Maatgevende ontwerpcriteria (kantel-, slip-, comfortcriterium) per scenario;
 - Parameters;
 - Parameterwaardes;
 - Gehanteerde veiligheidsfactoren.

Het tweede deel van het onderzoek (stap 4 en 5) is optioneel en bedoeld om aannames die gedaan zijn bij het vaststellen van de voorlopige richtlijn, nader te onderbouwen.

- In stap 4.1 wordt onderzoek gedaan naar het rijgedrag (en comfort) in de rijnsimulator onder strikt gecontroleerde omstandigheden. Met dit onderzoek kunnen alle mogelijke scenario's onderzocht worden en kan gericht per parameter worden bepaald wat de invloed is op de snelheids- en padkeuze.
- De stappen 4.2 en 4.3 bevatten de onderzoeksvoorstellen zoals opgenomen in paragraaf 5.5. en 5.6. Met behulp van simulatie wordt het effect van de meest bepalende parameters (geselecteerd op basis van literatuuronderzoek) vastgesteld. Vervolgens kunnen de veiligheidsfactoren onderbouwd worden.

6 Bronnen

- [1] Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer. *Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen (NOA)*. Rotterdam, januari 2007.
- [2] Pecejka, H.B. *Criteria te stellen aan de verkanting van een bocht met een constante straal*. Vakblad Wegen, augustus 1974.
- [3] Ten Cate, A.J. *Bruikbare stroefheidscijfers in bogen*. Vakblad Wegen, augustus 1973.
- [4] Ruijs, P.A.J., Coo, P.J.A de, Broeren P., Groot, J. *Stroefheidscijfers en horizontale bogen*. i.o.v. RWS DVS, 2012.
- [5] Rijkswaterstaat Dienst Verkeerskunde. *Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA)*. Rotterdam, 1992/1993.
- [6] Schepers J.P. *Een accident prediction model voor horizontale bogen van autosnelwegen*. RWS DVS, mei 2012.
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Policy on Geometric Design of Highways and Streets ('Green book')*. 6th edition. Washington, 2011.
- [8] Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)*. ISBN: 978-3-939715-51-1. Köln, 2008.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Highway Safety Manual (HSM)*. Washington, 2010.
- [10] Lamm, R., Psarianos B., Mailaender, T. *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. McGraw-Hill Professional Publishing 1999.
- [11] Campbell, J.L., Lichty, M.G., Brown, J.L, Richard, C.M., Graving, J.S., Graham, J., O'Laughlin, M., Torbic, D. & Harwood, D. (2012). *Human factors Guidelines for Road Systems Second Edition*. (NCHRP Report 600). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- [12] Riemersma, J.B.J. (1988). *De waarneming van boogkenmerken*. (TNO rapport IZF 1988 C-8). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.
- [13] Riemersma, J.B.J. (1989). *The effects of transition curves and superelevation on the perception of road-curve characteristics*. (TNO report IZF 1989 C-18). Soesterberg: TNO Institute for Perception.
- [14] Horst, A.R.A. van der & Martens, M.H. (2007). *Wegbeeldanalyse Integrale Aanpak Analyse Verkeersongevallen (IAAV)*. (TNO-rapport TNO-DV 2007 D068). Soesterberg: TNO Defensie en Veiligheid.

- [15] Horst, A.R.A. van der & Schepers, J.P. (2012). *Wegbeeldanalyse Verbindingsboog Knooppunt De Stok A58*. (Memo TNO 2012 M10383). Soesterberg: TNO.
- [16] Van Rest, J.H.C., Baan, J., Hogema, J.H., & Hoogendoorn, S. (2010). *Rijgedrag rijbaanindelingen ASW in de praktijk* (TNO rapport MON-RPT-2010-02877). Delft: TNO Industrie en Techniek.
- [17] Wertheim, A.H. & Hogema, J.H. (1997). (TNO Rapport TM-97-C003). *Thresholds, comfort and maximum acceptability of horizontal accelerations associated with car driving*. Soesterberg: TNO Human Factors.
- [18] Horst, A.R.A. van der, Hogema, J.H., Breuer, B., Bielaczek, Chr., Präckel, J., Rohmert, W., Breuer, J. & Bruder, R. & de Vos, A. (1993). *Driver Behaviour under Normal and Bad Weather Conditions* (Deliverable No. 7, Workpackage A1, DRIVE II project ROSES). Soesterberg: TNO Institute for Human Factors.