

## **DEEL 3: GEOMETRISCH WEGONTWERP**

In dit derde deel staat het geometrisch ontwerp van de weg centraal: hoe ziet de weg eruit? Het ontwerp van een weg is gericht op de verkeersfuncties en de verkeersveiligheid. Aan de andere kant wordt het ook sterk beïnvloed door het gedrag van de bestuurders. Ook eenvoudige fysica speelt bij het wegontwerp een rol. Het ruimtelijk ontwerp wordt weergegeven in drie projecties op het platte vlak: dwarsdoorsnede, horizontaal en verticaal alignement. Achtereenvolgens komen aan bod:

- De hoofdprincipes in het ontwerp
- Dwarsprofiel
- Horizontaal alignement
- Verticaal alignement
- Knooppunten en kruispunten

In deze tweede versie is meer het Handboek Wegontwerp gevolgd. Bij Duurzaam Veilig is voor de voornaamste principes een kort voorbeeld toegevoegd. De zichtafstanden zijn bij elkaar gezet en waar relevant is de toelichting iets uitgebreid. In de formules is systematisch onderscheid gemaakt tussen hoeken uitgedrukt in radialen, in procenten of dimensieloos (verhouding). De bijbehorende vergelijkingen zijn daarop aangepast.

<b>DEEL 3: GEOMETRISCH WEGONTWERP</b>	<b>1</b>
<b>1 INLEIDING</b>	<b>3</b>
<b>2 HOOFDPRINCIPES ONTWERP</b>	<b>5</b>
2.1 Verkeersfunctie .....	5
2.1.1 Wegfuncties .....	5
2.2 Veiligheid .....	6
2.2.1 Duurzaam-Veilig-filosofie .....	6
2.2.2 Wegtypes volgens Duurzaam Veilig .....	7
2.3 Zichtafstanden .....	9
2.3.1 Wegverloopzicht .....	10
2.3.2 Stopzicht .....	10
2.3.3 Uitwijkzicht .....	11
2.3.4 Inhaalzicht .....	12
2.3.5 Oprijzicht .....	13
2.3.6 Ooghoogte en objecthoogte .....	14
2.4 Wegcapaciteit .....	15
2.4.1 Veilige volgafstanden .....	15
2.4.2 Capaciteit en intensiteit .....	17
<b>3 ONTWERPELEMENTEN</b>	<b>21</b>
3.1 Dwarsprofiel .....	21
3.1.1 Inleiding .....	21
3.1.2 Verkeersfunctie .....	22
3.1.3 Veiligheid .....	22
3.1.4 Fysieke verschijnselen .....	24
3.1.5 Gedrag van bestuurders .....	24
3.2 Horizontaal alignement: rechtstand, boog en overgangsboog .....	26
3.2.1 Verkeersfunctie .....	26
3.2.2 Veiligheid .....	27
3.2.3 Fysieke verschijnselen .....	28
3.2.4 Gedrag van bestuurders .....	37
3.3 Horizontaal alignement: zichtafstand in de boog .....	37
3.4 Verticaal alignement: langshelling en afrondingsbogen .....	39
3.4.1 Verkeersfunctie .....	39
3.4.2 Veiligheid .....	40
3.4.3 Fysieke verschijnselen .....	41
3.4.4 Gedrag van bestuurders .....	44
3.5 Verticaal alignement: algemeen .....	45
3.5.1 Ontwerp verticaal alignement .....	45
3.5.2 Wegbeeld .....	51
3.6 Knooppunten, kruispunten, aansluitingen en rotondes .....	51
3.6.1 Verkeersfunctie .....	51
3.6.2 Veiligheid .....	64
3.6.3 Fysieke verschijnselen .....	66
3.6.4 Gedrag van bestuurders .....	67

## 1 INLEIDING

Wegontwerp is een ontwerpprobleem dat gaat om de interactie tussen de bestuurder, het voertuig en de weg. Een weg wordt zodanig ontworpen, dat deze op veilige wijze de verkeersfunctie kan vervullen. De weggebruiker reageert op het ontwerp met zijn rijgedrag. Het voertuig van de bestuurder reageert op dit rijgedrag en bepaalt dus de fysieke verschijnselen op de weg.

Het ontwerpprobleem kan je splitsen in twee delen:

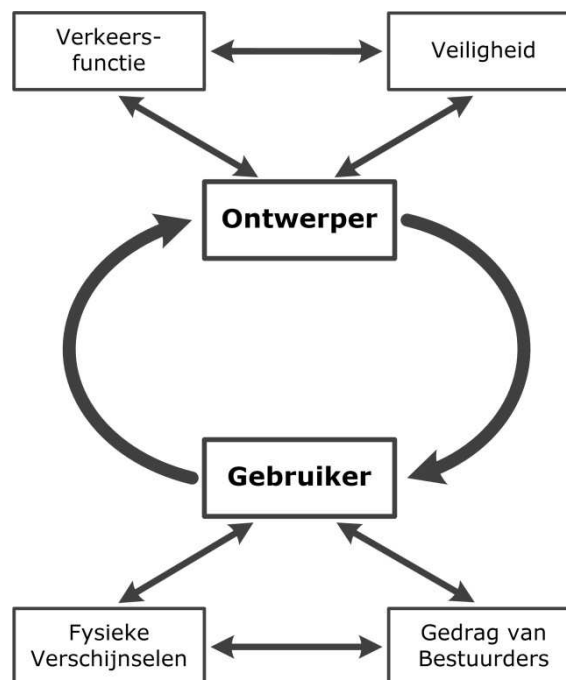
1. De ontwerper die kijkt naar zijn doelstellingen
2. De gebruiker die reageert op het ontwerp

Aan de zijde van de ontwerper zijn vooral de verkeersfunctie en veiligheid van de weg van belang. Aan de zijde van de gebruiker wordt hierop gereageerd door het gedrag van de bestuurder en de fysieke verschijnselen van het voertuig. Met deze gebruikersaspecten dient de ontwerper rekening te houden in het ontwerp.

Bij het wegontwerp kunnen dus vier belangrijke aspecten worden onderscheiden:

1. De verkeersfunctie van de weg
2. De veiligheid van de weg
3. De fysieke verschijnselen van het voertuig
4. Het gedrag van de bestuurders

In Figuur 1.1 is de samenhang tussen de ontwerpaspecten schematisch weergegeven.



FIGUUR 1.1: SAMENHANG TUSSEN ONTWERPASPECTEN

In het volgende hoofdstuk zijn de hoofdpunten van het wegontwerp per ontwerpaspect beschreven. Daarna is voor de basiselementen uit het wegontwerp (rechtstand, boog, kruispunt etc.) aangegeven hoe de vier aspecten het ontwerp beïnvloeden.

Zoals in het schema uit Figuur 1.1 is weergegeven staan de ontwerpaspecten niet op zichzelf, maar beïnvloeden ze elkaar. Zo heeft de verkeersfunctie van een weg invloed op de veiligheid en andersom. Deze samenhang van de ontwerpaspecten wordt hieronder toegelicht met een voorbeeld.

De verkeersfunctie van een autosnelweg is het creëren van een snelle verbinding over een relatief grote afstand. Vanuit de verkeersfunctie zijn dus hoge snelheden op een autosnelweg gewenst, maar dit heeft invloed op het veiligheidsaspect. Om veiligheidsredenen worden daarom op wegen met de functie van een autosnelweg maatregelen genomen, zoals gescheiden rijbanen, brede rijstroken en de plaatsing van vangrails.

Het concrete wegontwerp moet in de regel overeenkomen met de in de richtlijnen genoemde kenmerken. Voor autosnelwegen is dit de NOA (Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen). Deze vervangt sinds 2007 de ROA (Richtlijnen voor het Ontwerp van Autosnelwegen). De NOA is inmiddels geëvalueerd; de geplande nieuwe ROA, aangekondigd als ROA2014, zal binnenkort worden gepubliceerd.

Voor niet-autosnelwegen zijn door het CROW richtlijnen vastgesteld in een aantal verschillende publicaties. Voor deze publicaties geldt dat deze niet bindend zijn, maar dat een wegbeheerder hiervan (mits gemotiveerd) kan afwijken. In de praktijk is hierbij een onderscheid tussen publicaties die bestuurlijk zijn vastgesteld door het BKO (Bestuurlijk Koepel Overleg), zoals de Richtlijn Bewegwijzering en de publicatie Basiskennmerken wegontwerp, en het leeuwendeel van CROW-publicaties die niet bestuurlijk zijn vastgesteld.

De huidige richtlijn voor het ontwerp van niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom is het *Handboek Wegontwerp 2013*. Het oorspronkelijke Handboek Wegontwerp, dat in 2004 de RONA (Richtlijnen voor het Ontwerp van Niet-Autosnelwegen) verving, is niet bestuurlijk vastgesteld. Na afronding van de herziening bleek namelijk dat de juridische en financiële consequenties, alsmede de gevolgen voor leefbaarheid en bereikbaarheid van de in het Handboek voorgestelde nieuwe wegategorisering dermate groot waren dat de wegbeheerders (Rijk, provincies, waterschappen en gemeentes) de vaststelling van het document niet aandurfd. Daarom heeft het Handboek de status van een aanbeveling. In dit dictaat is veel gebruik gemaakt van de herziene versie van het Handboek Wegontwerp uit 2013.

Ook voor wegontwerp binnen de bebouwde kom zijn geen strikte richtlijnen, maar aanbevelingen (*ASVV 2012*) van toepassing. De ontwerper hoeft deze niet te volgen, maar hij mag aannemen dat de uitwerking ervan gunstig is. Daarin wordt tevens per maatregel expliciet onderscheid in vijf waarderingen gemaakt (voorschrift, richtlijn, aanbeveling, suggestie, mogelijkheid), zodat de vrijheidsgraad van het wegontwerp binnen de bebouwde kom veel groter is en dus een grote variatie plaatsvindt.

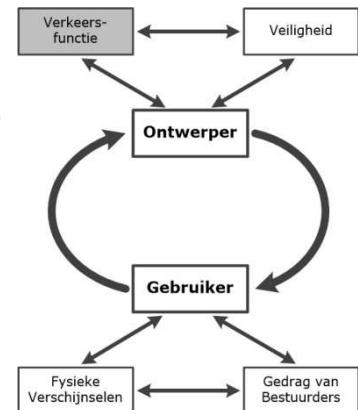
Een deel van de herziene versies van het Handboek Wegontwerp en het ASVV is echter wel bestuurlijk vastgesteld. Dit is het gedeelte dat integraal is overgenomen uit de publicatie Basiskennmerken Wegontwerp en betrekking heeft op de wegategorisering en de minimumstandaarden waaraan de verschillende wegtypen moeten voldoen. De Basiskennmerken wegontwerp zijn op 25 juni 2012 vastgesteld door het BKO, waarbij afgesproken is dat wegbeheerders vanaf 2013 bij voorkeur deze richtlijn gebruiken om de uniformiteit en verkeersveiligheid te versterken. Hiermee zijn dus ook de 'basiskennmerken' niet absoluut bindend.

In de beschrijving van het verkeerskundige wegontwerp in dit dictaat is uitgegaan van bovengenoemde richtlijnen en het Handboek Wegontwerp. Voor de bepaling van de benodigde capaciteit van autosnelwegen is gebruik gemaakt van de Highway Capacity Manual (HCM) uit de VS. In paragraaf 2.4 wordt daar verder op ingegaan.

## 2 HOOFDPRINCIPES ONTWERP

### 2.1 Verkeersfunctie

De verkeersfunctie van de weg is een ontwerpaspect dat vooral aan de zijde van de ontwerper een belangrijke rol speelt. De verkeersfunctie bepaalt in belangrijke mate de vormgeving van de weg en vormt daarom een van de uitgangspunten in het wegontwerp. In deze paragraaf zal worden ingegaan op de mogelijke functies die een weg kan hebben en een mogelijke type-indeling voor wegen.



#### 2.1.1 Wegfuncties

Bevinden we ons in onbebouwde gebieden, dan hebben wegen als *hoofdfunctie* verkeer tussen plaatsen mogelijk te maken: de *verbindingsfunctie*. In gebieden met nederzettingen hebben wegen ook nog andere functies: het *ontsluiten*, toegankelijk maken van gebieden, tot aan individuele percelen toe. De *verbindings-*, *ontsluitings-* en *toegangsfuncties* vormen gedrieën de *verkeersfunctie* van een weg. Daarnaast hebben wegen nog *andere functies*, zoals de *verblijfsfunctie*, die andere activiteiten van bewoners en bezoekers dan voortbeweging mogelijk maakt, bijvoorbeeld uitrusten, communiceren, spelen of het parkeren van voertuigen.

De verkeersfunctie van wegen kan verschillen naar gelang het ruimtelijke schaalniveau. We kunnen onderscheiden:

- Europees niveau,
- nationaal niveau,
- regionaal niveau,
- stedelijk niveau,
- wijkniveau.

Op elk schaalniveau is er sprake van verbindingswegen:

- op Europees niveau worden landen of grote regio's met elkaar verbonden door internationale E-wegen;
- binnen een land dienen nationale verbindingswegen (in Nederland hoofdwegen genoemd) ertoe landsdelen met elkaar te verbinden;
- binnen een landsdeel dienen regionale wegen ertoe regio's met elkaar te verbinden;
- op stadsniveau worden wijken met elkaar verbonden;
- op wijkniveau worden buurten binnen een wijk met elkaar verbonden.

Veelal verzorgen verbindingswegen op een lager schaalniveau de ontsluiting naar wegen op een hoger schaalniveau. De Kruithuisweg in Delft is een verbindingsweg op regionaal niveau en verzorgt tegelijkertijd de ontsluiting naar het nationaal niveau.

Op wegen met een *verbindings-* ofwel *stroomfunctie* gaat het om de afwikkeling van het langeafstands- en regionale verkeer. De nadruk ligt op het verbinden van gebieden. Het ontwerp van dit soort wegen dient rekening te houden met de kenmerken van zogenoemd 'gericht verkeer':

- relatief hoge snelheden,
- gesloten voor bepaalde voertuigsoorten,
- hoge intensiteit,
- vloeiende/vlotte verkeersafwikkeling,
- minimaliseren conflictsituaties (bijvoorbeeld door ongelijkvloerse kruisingen en knooppunten).

Op wegen met een *toegangsfunctie* gaat het om de toegankelijkheid van gebieden en gebouwen/percelen in gebieden; men moet er (vlak) bij kunnen komen. Het ontwerp dient rekening te houden met de kenmerken van zogenoemd 'zwerfverkeer':

- lage snelheden en veel afslaan bewegingen,
- menging van verkeerssoorten,

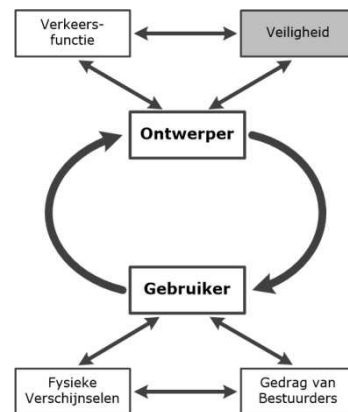
- lage intensiteit,
- rekening houden met kwetsbare weggebruikers,
- opstelruimte voor voertuigen,
- op peil houden van attentieniveau bestuurders.

Daartussen zit de *ontsluitingsfunctie*. Wegen met die functie vormen de schakel tussen verbindingswegen en toegangswegen.

Vooraf binnen bebouwde kommen leidt menging van stroom-, ontsluitings- en toegangsfunctie tot conflicten. Menging van ongelijkwaardige verkeerssoorten (snelverkeer/langzaam verkeer, auto's/voetgangers) veroorzaakt ernstiger conflicten, vooral daar waar de ontsluitings- en toegangsfunctie niet herkenbaar zijn aan de vorm en inrichting van de weg, ofwel, waar de vorm van de verkeersruimte zich te veel richt op de functie voor het snelle verkeer en te weinig op het langzame verkeer, zoals voetgangers, kinderen, bejaarden en fietsers. Die functieverstoring neemt in oudere woonwijken (vaak) zeer grote vormen aan. Een zware verbindingsfunctie verdraagt geen zwerfverkeer. Voor belangrijke verkeersstromen zijn dus aparte verbindingswegen nodig: bijvoorbeeld 'rondwegen' om het doorgaande verkeer buiten de stad te houden.

## 2.2 Veiligheid

Naast de verkeersfunctie is veiligheid een ontwerpaspect dat voor de wegontwerper van groot belang is. De laatste jaren is er in het wegontwerp steeds meer aandacht voor de "Duurzaam Veilig"-aanpak van het wegontwerp. De Duurzaam Veilig-filosofie probeert een brug te slaan tussen de verkeerskundige invalshoek en de verkeersveiligheid. In deze paragraaf zal die aanpak verder worden toegelicht.



### 2.2.1 Duurzaam-Veilig-filosofie

Het concept *Duurzaam Veilig Wegverkeer* is in 1992 door de Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV) ontwikkeld en wordt sinds 1997 door de wegbeheerders stapsgewijs ingevoerd. De doelstellingen, volgens de nota mobiliteit 2005, op landelijk niveau zijn een afname tot 12.250 gewonden en 580 (inmiddels aangescherpt tot 500) doden per jaar in het verkeer in 2020.

Om deze doelstellingen te bereiken zijn de volgende eisen geformuleerd:

- realisering van zo groot mogelijke aaneengesloten verblijfsgebieden
- minimaal deel van de rit over relatief onveilige wegen
- ritten zo kort mogelijk maken
- kortste en veiligste route laten samenvallen
- zoekgedrag vermijden
- wegtypes herkenbaar maken
- aantal verkeersoplossingen uniform maken
- conflicten vermijden met tegemoetkomend, kruisend en overstekend verkeer
- scheiden van voertuigsoorten
- reduceren van de snelheid op potentiële conflictpunten
- vermijden van obstakels langs de weg.

De filosofie achter deze eisen is het minimaliseren en voorkomen van conflicten, met name tussen weggebruikers waarvan de snelheid, richting en massa grote verschillen tonen. Door homogeen gebruik van de infrastructuur vermindert tevens de kwetsbaarheid van de weggebruiker.

Het Duurzaam Veilig verkeerssysteem kent:

- een **infrastructuur** die qua vorm- en regelgeving aangepast is aan (de beperkingen van) de menselijke vermogens;
- **voertuigen** die voorzien zijn van middelen om de taken van de mens te vereenvoudigen en die geconstrueerd zijn om de kwetsbare mens zo goed mogelijk te beschermen;

- **verkeersdeelnemers** die adequaat worden opgeleid, geïnformeerd en waar nodig gecontroleerd.

Voor het duurzaam veilig ontwerpen van de infrastructuur gaat men uit van vijf veiligheidsprincipes:

1. **Functionaliteit** van het wegennet. Er wordt onderscheid gemaakt tussen wegtypen afhankelijk van de functie van de wegvoorziening voor bepaalde typen verplaatsingen, voertuigsoorten, routes en verkeersintensiteiten (zie 2.2.2);
2. **Homogeniteit** van het verkeer. Ontmoetingen van weggebruikers met grote verschillen in snelheid, richting en massa worden voorkomen;
3. **Voorspelbaar gedrag** stimuleren. Het wegontwerp is zodanig vormgegeven dat min of meer vanzelfsprekend het gewenste rijgedrag ontstaat.
4. **Vergevingsgezindheid**. Dit principe heeft een tweeledige betekenis. In fysieke zin houdt vergevingsgezindheid in dat de omgeving zo is ingericht dat eventuele botsingen gunstig aflopen. Een voertuig dat van de weg raakt zou geen obstakels, ook geen wegmeubilair, mogen raken met ernstig letsel als gevolg. Ook het voertuig zelf dient zowel bescherming te bieden aan de inzittenden als aan de tegenpartij. Daarnaast houdt vergevingsgezindheid in dat van de weggebruiker wordt verwacht dat hij rekening houdt met het gedrag van medeweggebruikers. Vooral wordt bedoeld op het gedrag van kinderen en ouderen omdat hun vermogen tot achtereenvolgens waarnemen, beslissen en handelen beperkter is.
5. **Statusonderkenning** doelt op het vermogen van, of de mogelijkheid voor de verkeersdeelnemer om zijn eigen bekwaamheid voor de rijtaak goed in te schatten. Zo moet hij dus weten over welke vaardigheden hij beschikt en of deze voldoende zijn om veilig aan het verkeer te kunnen deelnemen. Maar ook dienen verkeersdeelnemers van zichzelf weten wanneer ze er – tijdelijk – zo aan toe zijn dat verkeersdeelnemer niet verantwoord is, bijvoorbeeld door de invloed van alcohol, medicijnen, stress of vermoeidheid.

Enkele voorbeelden om de principes te verduidelijken.

Om te kunnen beoordelen of aan het principe van homogeniteit is voldaan, leveren de volgende onderzoekresultaten handvatten. Dit onderzoek heeft uitgewezen dat er wat snelheid betreft drie risicogrenswaarden bestaan, die van 30, 50 en 70 km/h. Er bestaat een grote kans om als voetganger of fietser een aanrijding met een auto te overleven als die niet harder dan 30 km/h rijdt. Een inzittende van een auto heeft een grote kans het er levend van af te brengen als zijn auto in de flank door een andere auto wordt aangereden met een snelheid tot 50 km/h. Een soortgelijke situatie treedt op bij een frontale aanrijding, maar dan bij een snelheid van maximaal 70 km/h. Als we deze grenswaarden vertalen naar het wegontwerp, betekenen ze dat auto's maximaal 30 km/h mogen rijden als voetgangers en fietsers van dezelfde verkeersruimte gebruik maken. Op kruispunten waar het risico van een aanrijding in de flank bestaat, moet de maximumsnelheid 50 km/h zijn en op wegen waar de toegelaten snelheid hoger is dan 70 km/h moeten de rijbanen gescheiden zijn om frontale botsingen te voorkomen.

Om automobilisten zover te krijgen dat ze niet harder rijden dan 30 km/h, volstaat niet een verkeersbord met 30 te plaatsen. De wegbreedte (stroken van minder dan 3 m) en verharding (klinkerverharding) moeten zodanig zijn dat auto's vanzelfsprekend hun snelheid matigen. Hier gaat het dus om voorspelbaar gedrag. Voor een snelheidsreductie tot 50 km/h op kruispunten zijn ontwerpmaatregelen denkbaar als een rijbaanversmalling en het toepassen van een verhoogd kruispuntoppervlak. Verkeerslichten bieden een te geringe garantie om flankaanrijdingen te voorkomen, want bewust of onbewust door rood rijden kan voorkomen. Hier is dus ook sprake van het principe van voorspelbaar gedrag, vooral om homogeniteit te bewerkstelligen.

Als er bomen in de berm van de weg staan, wordt niet voldaan aan het principe van vergevingsgezindheid. Het gebeurt nogal eens dat een inzittende van een auto die van de weg raakt en tegen een boom botst, die aanrijding niet overleeft. De bomen moeten dus worden verwijderd of er moeten geleiderails voor worden geplaatst.

## 2.2.2 Wegtypes volgens Duurzaam Veilig

In de eerste paragraaf hebben we gekeken naar de functie van wegen op het niveau van afzonderlijke schakels. Om de functie van de weg op schakelniveau vast te stellen, wordt binnen duurzaam veilig onderscheid gemaakt tussen de functie van de knooppunten en de schakels. Daarnaast hebben wegen als onderdeel van de openbare ruimten een verkeersfunctie en een

verblijfsfunctie. De verkeersfunctie maakt een gerichte voortbeweging van voertuigen en voetgangers mogelijk overeenkomstig met het doel van de verplaatsing, terwijl de verblijfsfunctie uitnodigt tot andere activiteiten van bewoners en bezoekers.

Binnen de verkeersfunctie worden twee verkeersvormen onderscheiden:

- **stromen:** doelgerichte voortbeweging van voertuigen of voetgangers in één richting met min of meer constante (relatief hoge) snelheid.
- **uitwisselen:** doelgerichte voortbeweging met wisselende snelheid en/of richting zoals verzamelen, verdelen en kruisen van verkeer, alsmede het vertrekken, keren, draaien, stoppen van voertuigen.

De strikte scheiding van deze verkeersvormen onderling en t.o.v. de verblijfsfunctie vergroot de verkeersveiligheid en komt derhalve terug in de drie wegtypes binnen Duurzaam Veilig (Tabel 2.1).

Wegtype	Verkeersfunctie wegvak	Verkeersfunctie kruispunt
<b>Stroomweg</b>	stromen	stromen
<b>Gebiedsontsluitingsweg</b>	stromen	uitwisselen
<b>Erftoegangsweg</b>	uitwisselen	uitwisselen

TABEL 2.1: TYPE-INDELING DUURZAAM VEILIG VERKEER

**Stroomwegen** zijn gericht op een zo veilig en betrouwbaar mogelijke afwikkeling van relatief grote hoeveelheden verkeer met een hoge (gemiddelde) snelheid. Zowel op de wegvakken als op de kruispunten wordt prioriteit gegeven aan doorstromen. Dit vereist onder meer gescheiden rijrichtingen, ontbreken van overstekend en kruisend verkeer en van in- en uitvoegend verkeer.

**Gebiedsontsluitingswegen** faciliteren zowel het stromen als het uitwisselen, maar deze functies worden naar plaats gescheiden. Het uitwisselen vindt plaats op kruispunten en het stromen op de wegvakken tussen de kruispunten. De gebiedsontsluitingsweg vormt binnen het verkeersnetwerk de verbindende schakel tussen stroomwegen en erftoegangswegen.

**Erftoegangswegen** waarborgen de toegankelijkheid van erven en zijn ingericht op alle manoeuvres die nodig zijn voor het bereiken van particuliere en openbare percelen, het in- en uitstappen en het laden en lossen van goederen.

Het netwerk voor fietsers en voetgangers is fijnmazig en loopt zoveel mogelijk door de verblijfsgebieden heen. Voor hen is omrijden/omlopen immers niet aantrekkelijk.

De type-indeling dient als basis bij de opbouw van netwerken. Dit betekent dat tussen een erftoegangsweg en een stroomweg altijd een gebiedsontsluitingsweg moet voorkomen. In Tabel 2.2 is aangegeven welk type aansluiting de voorkeur verdient afhankelijk van de wegtypes die bij de aansluiting samenkomen.

	Erftoegangsweg	Gebiedsontsluitingsweg	Stroomweg
<b>Erftoegangsweg</b>	gelijkwaardig kruispunt	kruispunt met voorrangregeling of rotonde	<i>mag niet voorkomen</i>
<b>Gebiedsontsluitingsweg</b>		kruispunt met voorrangregeling of rotonde	ongelijkvloerse aansluiting
<b>Stroomweg</b>			ongelijkvloers knooppunt

TABEL 2.2: VORMEN VAN AANSLUITINGEN TUSSEN WEGEN PER FUNCTIE

De vormgeving van de weg, met de bijbehorende regels, moet leiden tot een gebruik dat overeenkomt met de functie die de weg dient te vervullen. De wijze waarop functie, vormgeving en



gebruik van het wegennet op elkaar zijn afgestemd is van groot belang voor de doorstroming en veiligheid van het verkeer. In het Handboek Wegontwerp wordt per wegtype nader onderscheid gemaakt (Tabel 2.3). Deze type-indeling is van toepassing voor gebieden buiten de bebouwde kom.

Wegtypes	Maximum-snelheid [km/h]	Kenmerken
Nationale stroomweg	130 <sup>1</sup>	autosnelweg (hoort bij de NOA)
Regionale stroomweg	100	autoweg, vluchtvoorzieningen, niet overschrijdbare rijrichtingscheiding, ongelijkvloerse kruisingen
Gebiedsontsluitingsweg I	80	2x2 rijstroken, rijbaanscheiding, gelijkvloerse kruisingen, onderbroken langsmarkering
Gebiedsontsluitingsweg II	80	2x1 rijstrook, rijbaanscheiding, gelijkvloerse kruisingen, onderbroken langsmarkering
Erftoegangsweg I	60	1 rijloper, kantmarkering
Erftoegangsweg II	60	1 rijloper, geen markering, fiets op de rijbaan

TABEL 2.3: WEGTYPES BINNEN DE DUURZAAM-VEILIG-WEGTYPES

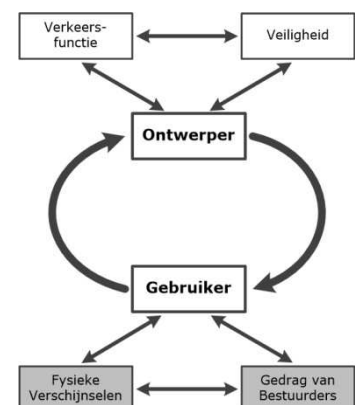
De stroomfunctie vereist op wegvakken en kruispunten een vormgeving die een wettelijke snelheid van 100 tot 120 km/h toestaat. Frontale en flankconflicten zouden bij dergelijke snelheid kunnen leiden tot ongevallen met een ernstige afloop en dienen dus te worden uitgesloten. Op wegvakken mogen in principe alleen langsconflicten voorkomen en op kruispunten zijn alleen convergeren en divergeren toegestaan.

De invoering van Duurzaam Veilig is begonnen met het opstellen van een categoriseringsplan voor een samenhangend wegennet. Inmiddels is 90% van de Nederlandse wegen gecategoriseerd. Door *consequent de inrichting van de wegtypes aan te passen aan de functies* hoopt men dat de verkeersveiligheid sterk zal toenemen. Een aantal plannen is door wegbeheerders al gepresenteerd en de herinrichting van wegen volgens Duurzaam Veilig op grotere schaal begint nu van de grond te komen. De totale weglengte ingericht als 30 km/h-zone is 30.000 km en als 60 km/h-zones 12.500 km (50% van alle 60 km/h-wegen).

## 2.3 Zichtafstanden

Aan de gebruikerszijde van de ontwerpogave spelen de fysieke verschijnselen rondom het ontwerp en het gedrag van de bestuurders op het ontwerp een rol. Belangrijke ontwerp-eisen die hiermee samenhangen zijn eisen voor de minimale zichtafstanden. Deze zijn vooral nodig voor het berekenen van de horizontale en verticale boogstralen.

Er zijn verschillende zichtafstanden, die allemaal hun eigen karakteristieken en toepassingen hebben. De zichtafstanden die behandeld zullen worden zijn wegverloopzicht, stopzicht, uitwijkzicht, inhaalzicht en oprijzicht. De eerste vier zichtcriteria zijn mede bepalend voor het horizontaal en verticaal alignment van de weg (zie paragraaf 3.3 en 3.4), terwijl oprijzicht specifiek betrekking heeft op kruisingen en kruispunten (zie paragraaf 3.6).



<sup>1</sup> Sinds 1 september 2012 is de wettelijke maximumsnelheid op autosnelwegen 130 km/h. Slechts op minder dan een derde van het wegennet geldt 130 km/h als maximumsnelheid gedurende het hele etmaal. De standaard ontwerp-snelheid voor autosnelwegen is op basis van de NOA 120 km/h.

Het wegverloopzicht is het zicht dat de bestuurder nodig heeft om de weg goed te kunnen overzien en tijdig in te kunnen spelen op gebeurtenissen. Het stopzicht is de zichtafstand die nodig is om op tijd te kunnen stoppen wanneer de weg onverwacht is geblokkeerd. Het uitwijkzicht is de zichtafstand die nodig is om een klein object, bijvoorbeeld een verloren uitlaatpijp, te zien liggen op de weg en uit te kunnen wijken om het obstakel te vermijden. Het inhaalzicht is de afstand die nodig is om veilig andere voertuigen in te halen.

Bij het ontwerpen van de weg moet er dus gekeken worden naar de zichtafstanden die van toepassing zijn, en welke van deze afstanden maatgevend is.

### 2.3.1 Wegverloopzicht

Het wegverloopzicht (in de ontwerprichtlijnen omschreven als *rijzicht*) is het zicht dat de bestuurder in staat stelt de weg en de daarop aanwezige informatie (markering, bebakening, bewegwijzering, overig meubilair, medeweggebruikers) over een zodanige afstand te overzien dat deze informatie op een comfortabele manier kan worden verwerkt en in alle rust kan worden gereageerd op wijzigingen in het weg- en verkeersbeeld. Dit is een gewenste zichtafstand, waaraan weliswaar vaak, maar lang niet in alle gevallen zal kunnen worden voldaan. Tabel 2.4 geeft voor het wegverloopzicht de minimaal benodigde afstanden bij verschillende ontwerpsnelheden volgens de NOA. Hierbij wordt uitgegaan van de afstand die afgelegd wordt in 3 s (50 km/h) tot 5 s bij 120 km/h.

$v_{ontw}$ [km/h]	Wegverloopzicht [m]
120	165
100	135
80	105
50	45

TABEL 2.4: WEGVERLOOPZICHTAFSTANDEN VOOR VERSCHILLENDE SNELHEIDSKLASSEN

### 2.3.2 Stopzicht

Wanneer de automobilist waarneemt dat zijn eigen rijstrook geblokkeerd is, heeft hij de keuze tussen uitwijken en remmen. Uitwijken is niet mogelijk indien het blokkerende object te omvangrijk is, indien stilstaande voertuigen op alle rijstroken staan of als er maar één rijstrook ter beschikking is. De bepalende situatie is die waarin een file verdeeld is over alle rijstroken en waarvoor een noodstop moet worden gemaakt. De zichtafstand is opgebouwd uit de tijdens de perceptie-reactietijd afgelegde afstand en de eigenlijke remweg.

Uitgangspunten:

- net niet geblokkeerde wielen bij nat wegdek;
- kortere perceptie-reactietijd nodig bij lagere ontwerpsnelheden in verband met hoger attentieniveau.

De volgende formule wordt gebruikt om de stopzichtsafstand te berekenen.

$$L_{stop} = \left( prt * \frac{V_{ontw}}{3,6} \right) + \left( \left( \frac{V_{ontw}}{3,6} \right)^2 * \frac{1}{2g(f_{lg} \pm 0,01p)} \right) \quad \text{VERGELIJKING 2.1}$$

waarin:

- $L_{stop}$  = stopzichtsafstand [m];
- $prt$  = perceptie-reactietijd [s];
- $V_{ontw}$  = ontwerpsnelheid [km/h];
- $g$  = versnelling van de zwaartekracht [9,81 m/s<sup>2</sup>];
- $f_{lg}$  = gemiddelde langswrijvingscoëfficiënt, behorend bij de  $v_{ontw}$ ;
- $p$  = langshelling [%], bij stijging positief; bij daling negatief.

De toe te passen  $f_{lg}$ -waarden zijn:

$v_{ontw}$ [km/h]	$f_{lg}$
120	0,32
100	0,36
80	0,41
50	0,48

TABEL 2.5: TOE TE PASSEN  $f_{lg}$ -WAARDEN

Deze uitgangspunten leiden tot zichtafstanden zoals vermeld in Tabel 2.6.

Snelheid	Perceptie-reactietijd en -weg		Remtijd en -weg		Totale stopzichtafstand
	$v_{ontw}$ [km/h]	[s]	[m]	[s]	
120	2,5	83	11	177	260
100	2,25	63	8	107	170
80	2	44	6	61	105
50	1,5	20	3	20	40

TABEL 2.6: OPBOUW VAN DE STOPZICHTAFSTANDEN VOOR VERSCHILLENDE SNELHEIDSKLASSEN (HELLING = 0%)

### 2.3.3 Uitwijkzicht

Het uitwijkzicht is het zicht op een obstakel van bescheiden afmetingen dat één rijstrook verspert, zoals een verloren uitlaatdemper. De kans is gering dat een obstakel, dat nergens hoger is dan 50 cm, over de volle breedte een rijbaan blokkeert. Doorgaans zal er daarom ruimte zijn het obstakel na een uitwijkingsmanoeuvre te passeren. Indien de rijbaan zo vol is dat een uitwijkingsmanoeuvre niet direct mogelijk is, is er ook geen zicht op het obstakel. Maatgevend is dan het zicht op remmende voertuigen stroomafwaarts. Kleine objecten zullen bij duisternis pas laat worden opgemerkt. Het hiermee gepaard gaande risico wordt aanvaardbaar geacht.

Uitgangspunten:

- uitwijken met 1 m/s verplaatsing in zijdelingse richting, dus 3,5 s voor rijstrook-wisseling gegeven een rijstrookbreedte van 3,50 m;
- hoge perceptie-reactietijd in verband met onverwachte gebeurtenis, afnemend bij lagere ontwerpsnelheden in verband met hoger attentieniveau;
- voorbereiden van uitwijkmanoeuvre: voor 120, 100 en 80 km/h: 1 s in verband met comfort; niet van toepassing bij 50 km/h.

Snelheid	Tijdsduur				Zichtafstand
	$v_{ontw}$ [km/h]	PRT <sup>2</sup> [s]	Vorbereiding uitwijken [s]	Uitwijk- manoeuvre [s]	
<b>120</b>	2,5	1,0	3,5	7,0	235
<b>100</b>	2,3	1,0	3,25	6,55	190
<b>80</b>	1,9	1,0	3,10	6,0	145
<b>50</b>	1,5	-	2,75	4,25	70

TABEL 2.7: TIJDEN EN ZICHTAFSTANDEN IN VERBAND MET UITWIJKEN VOOR EEN OBSTAKEL OP EEN RIJSTROOK

### 2.3.4 Inhaalzicht

Onder inhaalzicht wordt de weglengte verstaan die nodig is om veilig te kunnen inhalen op wegen met verkeer in tegengestelde richtingen op dezelfde rijbaan. Volgens de huidige Nederlandse ontwerprichtlijnen is het bieden van voldoende inhaalzicht alleen nog gewenst op gebiedsontsluitingswegen met landbouwverkeer op de rijbaan. In alle andere situaties (erftoegangswegen, gebiedsontsluitingswegen zonder landbouwverkeer en regionale stroomwegen) zou volgens de ontwerprichtlijnen inhalen moeten worden ontmoedigd (erftoegangswegen), verboden (gebiedsontsluitingswegen) of fysiek onmogelijk moeten worden gemaakt (regionale stroomwegen). Anderzijds moet er, daar waar inhalen fysiek mogelijk is en er relatief ruim zicht aanwezig is, er rekening worden gehouden met bestuurders die toch inhalen ondanks een inhaalverbod.

Het inhaalzicht is de optelsom van de lengte die een voertuig nodig heeft om in te halen plus de in die zelfde tijd door een tegenligger afgelegde afstand plus de lengte die nodig is als veiligheidsmarge tussen beide voertuigen aan het einde van de inhaalmanoeuvre. Onderzoek naar inhaalmanoeuvres van snelverkeer onderling heeft aangetoond dat daarbij niet de eigenschappen van het inhalende voertuig (acceleratievermogen) in de eerste plaats van belang zijn, maar veeleer de mogelijkheden die de bestuurder van een inhalend voertuig heeft om het voor die manoeuvre benodigde hiaat in de tegenverkeersstroom goed in te schatten.

Op grond van de verdeling van geaccepteerde en geweigerde hiaten in de verkeersstroom is de verdeling van de *kritische hiaattijden* bepaald; de 85-percentielwaarden van deze laatste verdeling kunnen beschouwd worden als veilige waarden voor het in het ontwerp te hanteren inhaalzicht. Gebleken is dat bij inhaalmanoeuvres van snelverkeer onderling deze waarden overeenkomen met volgtijden van voertuigen in de tegenverkeersstroom, die variëren van circa 21 tot 25 s (variatie afhankelijk van de snelheid van het in te halen voertuig).

Daarnaast is het van belang te weten bij welke zichtafstand (dat wil zeggen: bij welke tijdshiaten in de tegenverkeersstroom) het merendeel van de potentiële inhalers niet (meer) inhaalt. Dit blijkt te zijn bij tijdshiaten die kleiner zijn dan circa 16 s. Bij 80 km/h komt dit overeen met een inhaalzicht korter dan 350 m. Dit betekent dat op gebiedsontsluitingswegen buiten de bebouwde kom waar niet mag worden ingehaald het inhaalzicht niet langer zou moeten zijn dan 350 m. Als er in verband met aanwezigheid van landbouwverkeer op de rijbaan toch inhaalzicht nodig is, dan is het wenselijk dat dit over minimaal 20% van de totale weglengte beschikbaar is. Een inhaalzicht van 350 meter is bij 80 km/h voldoende om landbouwvoertuigen in te halen die de wettelijke maximumsnelheid van 25 km/h rijden. In de praktijk rijden landbouwvoertuigen echter vaak (veel) harder, waardoor ook in situaties waar alleen landbouwverkeer ingehaald mag worden, een inhaalzicht (ruim) langer dan 350 m gewenst is.

Voor inhaalmanoeuvres van auto's onderling blijken hiaten van 21 tot 25 seconden nodig te zijn; dit komt overeen met een zichtafstand van 470 – 560 m. Een inhaalzicht tussen de 350 m en de 470 m is onwenselijk in situaties waar auto's elkaar mogen inhalen, aangezien dit het kritische gebied betreft waarbij auto's twifelen over het al dan niet onderling kunnen inhalen. Overigens zou het onderling inhalen van auto's, op basis bestuurlijke vaststelling van de Basiscriteria Wegontwerp

<sup>2</sup> prt: Perceptie reactietijd

in 2012, niet meer toegelaten horen te worden op gebiedsontsluitingswegen buiten de bebouwde kom.

In tabel 2.8 is bepaald voor verschillende ontwerpsnelheden welk inhaalzicht overeen komt met het benodigde kritisch hiaat van 21 tot 25 seconden en bij welk inhaalgezicht niet meer wordt ingehaald, uitgaande van de hierbovengenoemde kritische grens van 16 seconden.

$v_{ontw}$ [km/h]	Inhaalzicht [m]	Er wordt niet (meer) ingehaald bij zichtafstanden kleiner dan [m]
<b>100</b>	575-700	450
<b>80</b>	475-550	350
<b>50</b>	300-350	225

TABEL 2.8: ZICHTAFSTANDEN WAARBOVEN VEILIG KAN WORDEN INGEHAALD C.Q. WAARONDER NIET MEER WORDT INGEHAALD

### 2.3.5 Oprijzicht

Ten slotte bestaat er een zichteis die specifiek betrekking heeft op kruispunten. Als het verkeer op een zijweg aangekomen is bij een kruisingsvlak, moet het voldoende uitzicht worden geboden om de aanwezigheid en de snelheid van het verkeer op de hoofdweg te kunnen bepalen voordat het de hoofdweg oprijdt of kruist. De op de zijweg wachtende bestuurder moet kunnen schatten of de door hem gewenste beweging veilig en zonder hinder voor het verkeer op de hoofdweg kan worden uitgevoerd. Het oprijzicht moet in situaties buiten de bebouwde kom aanwezig zijn op (indien mogelijk) 5 meter en minimaal 2,5 meter voor de kantstreep van de te kruisen of op te rijden weg. De berekening van oprijzicht kan op dezelfde manier worden toegepast voor wegen binnen de bebouwde kom. Alleen waarschuwt het ASVV hier niet alleen voor de onmogelijkheid om dit overal te realiseren, maar ook de eventuele onwenselijkheid van het bieden van ruim zicht op kruisende wegen i.v.m. het verwachte snelheidsverhogende effect daarvan.

Voordat wachtend verkeer op de zijweg de hoofdweg oprijdt, moet de bestuurder bepalen of het hiaat in de verkeersstroom op de hoofdweg voldoende groot is om deze beweging veilig uit te voeren. Dit *kritische tijdsinterval* is onder andere afhankelijk van de snelheid op de hoofdweg en de uit te voeren beweging, dus ook afhankelijk van de vormgeving.

Zowel in het ASVV als in het Handboek Wegontwerp is niet uitgewerkt hoe het oprijzicht berekend dient te worden. Wel worden er in het Handboek Wegontwerp indicatieve maten gegeven voor het oprijzicht, die echter niet rekenkundig zijn onderbouwd. De berekeningssystematiek is hieruit wel impliciet op te maken. Eerst dient ingeschat te worden wat het benodigde kritisch hiaat is om een manoeuvre te maken, bijvoorbeeld het linksaf oprijden van een gebiedsontsluitingsweg. Vervolgens wordt berekend met welke afstand, gegeven de ontwerpsnelheid van de voorrangsweg, deze tijd overeenkomt. Zo gaat het Handboek Wegontwerp uit van een kritisch hiaat van 5,0 seconden voor linksafslaand verkeer vanaf een gebiedsontsluitingsweg type II met ontwerpsnelheid 80 km/h. Dit komt overeen met een zichtafstand van 110 meter. Voor linksafslaand verkeer vanaf een zijweg naar een gebiedsontsluitingsweg type I is het benodigde kritisch hiaat 7,0 seconden; dit komt overeen met een zichtafstand van 155 meter.

Uiteraard geldt het oprijzicht niet alleen voor het gemotoriseerde verkeer, maar ook voor het langzaam verkeer. In veel gevallen zal het langzaam verkeer hier zelfs maatgevend zijn, gezien de langere benodigde hiaten om veilig over te kunnen steken. Zo geeft de Ontwerpwijzer fietsverkeer wat uitgebreider (indicatieve) voorbeelden van gewenste waarden van het oprijzicht voor fietsers. Hierbij wordt uitgegaan van een versnelling van maximaal  $0,8 \text{ m/s}^2$ , een reactietijd van circa 1 s en een maximumsnelheid van de fietsers van 10 km/h. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met de 'schuwtijd', de grootte van de marge tussen het vrijmaken van het kruispunt en het passeren van het eerstvolgende voertuig. Deze schuwtijd varieert volgens de Ontwerpwijzer van 1 s bij 30 km/h tot 5 s bij 80 km/h. In tabel 2.10 is het hierop gebaseerde oprijzicht gegeven voor verschillende oversteeklengtes.

<b>V<sub>ontw</sub> autoverkeer [km/h]</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
<b>Oversteeklengte [m]</b>	<b>4,0</b>	<b>6,0</b>	<b>8,0</b>	<b>4,0</b>	<b>6,0</b>	<b>8,0</b>	<b>4,0</b>	<b>6,0</b>	<b>8,0</b>
<b>Oprijzicht [m]</b>	45	50	55	100	110	120	205	220	235

TABEL 2.9: OPRIJZICHT VOOR FIETSERS IN RELATIE TOT DE OVERSTEEKLENGTE EN DE SNELHEID OP DE HOOFDWEG

Een variant op het oprijzicht is het zicht dat afslaand (gemotoriseerd) verkeer vanaf de hoofdweg heeft op langs de hoofdweg gelegen vrijliggende fietspaden. In dit geval dient ook vanaf de zijweg voldoende uitzicht op de fietspaden te bestaan, vergelijkbaar met het hiervoor beschreven oprijzicht. Het zicht vanaf de zijweg op het fietspad dient op 5 m voor de fietsoversteekplaats aanwezig te zijn en in verband met de hoge naderingssnelheid van bromfietzers 75 m te bedragen. Bij een eenzijdig, in twee richtingen bereden fietspad moet hieraan bijzondere aandacht worden besteed.

Een andere variant op het oprijzicht is het zicht dat invoegend verkeer op knooppunten en aansluitingen heeft op het verkeer op de hoofdrijbaan en vice versa. Deze eis is vooral van toepassing op stroomwegen. Uitgangspunt bij de berekening is dat een voertuig *a* op de hoofdrijbaan afremt om ruimte te maken voor een invoegend voertuig *b* met constante snelheid. Daarbij nemen we aan dat:

- het voertuig *a* een remvertraging heeft van  $2 \text{ m/s}^2$ ;
- de perceptie-reactietijd 1 seconde bedraagt.

Bij een ontwerpsnelheid van 100 km/h geeft dit een benodigd zichtlengte van ongeveer 100 meter, oplopend tot 150 meter wanneer de naderingssnelheid van het verkeer op de oprit met 50 km/h significant lager is dan de snelheid van het verkeer op de hoofdrijbaan.

### 2.3.6 Ooghoogte en objecthoogte

Bij elk zicht is ook een maatgevende ooghoogte en objecthoogte gedefinieerd. De ooghoogte is de hoogte vanwaar de bestuurder van een auto kijkt. De objecthoogte is de hoogte van het object dat gesignaleerd moet worden. Deze hoogtes zijn nodig voor het berekenen van de verticale bogen in paragraaf 3.4.

Er wordt gerekend met een ooghoogte van bestuurders van personenauto's van 1,10 m. De objecthoogten, behorende bij de voornoemde soorten zicht, zijn:

- wegverloopzicht: 0,00 m hoogte van de markering;
- stopzicht: 0,50 m hoogte achterlichten personenauto boven wegdek, zichtbaarheids criterium bij duisternis;
- uitwijkzicht: 0,20 m hoogte "ontwerp-obstakel" dat rijstrook verspert;
- inhaalzicht 1,10 m ooghoogte bestuurder tegemoetkomende auto.

Om het berekenen van ontwerpelementen verder in dit dictaat te vergemakkelijken, is in Tabel 2.10 een overzicht gegeven van alle berekende zichtafstanden en de bijbehorende oog- en objecthoogte.

Type zichtlengte	120 km/h	100 km/h	80 km/h	50 km/h	Ooghoogte <sup>3</sup> [m]	Objecthoogte [m]
<b>Wegverloopzicht [m]</b>	165	135	105	45	1,10	0,00
<b>Stopzicht [m]</b>	260	170	105	40	1,10	0,50
<b>Uitwijkzicht [m]</b>	235	190	145	70	1,10	0,20
<b>Inhaalzicht [m]</b>	-	700	550	350	1,10	1,10

<sup>3</sup> Minimale ooghoogte voor een bestuurder van een personenauto (waarde varieert tussen 1,1 en 1,5 meter, voor vrachtauto's 2,5 meter)

TABEL 2.10: OVERZICHT VAN ALLE ZICHTAFSTANDEN EN BIJBEHORENDE OOG- EN OBJECTHOOGTES

Voor de berekening van het oprijzicht in geval van situering van een gelijkvloers kruispunt in een bolle boog (paragraaf 3.4.3) – overigens een minder gewenste situatie – dient ook rekening gehouden te worden met de ooghoogte. In principe mag ook hier uitgegaan worden van 1,10 m, waarbij bestuurders van (lage) motorvoertuigen maatgevend zijn. Voor het oprijzicht bij kruispunten en oversteekplaatsen binnen de bebouwde kom verdient het aanbeveling rekening te houden met een lagere ooghoogte; zo is de 3-percentielwaarde voor de ooghoogte van zittende kinderen (rolstoelgebruiker) slechts 52 cm (zie CROW 2010: Karakteristieken van voertuigen en mensen).

## 2.4 Wegcapaciteit

Voor de wegontwerper is het van belang te weten hoeveel verkeer op de te ontwerpen weg verwacht kan worden en wat voor wegtype (bijvoorbeeld het aantal rijstroken) in die behoefte kan voorzien. In de eerste subparagraaf wordt nader ingegaan op de relatie tussen veilige volgafstanden en capaciteit. Ten slotte wordt in de tweede sub-paragraaf eerst uitgelegd wat onder intensiteit (de verkeersvraag) en de capaciteit (verkeersaanbod) wordt verstaan. Daarna wordt uitgewerkt hoe volgens de Amerikaanse Highway Capacity Manual (HCM) de benodigde capaciteit kan worden bepaald. Vervolgens wordt aangegeven hoe dit is vertaald in de Nederlandse ontwerprichtlijnen.

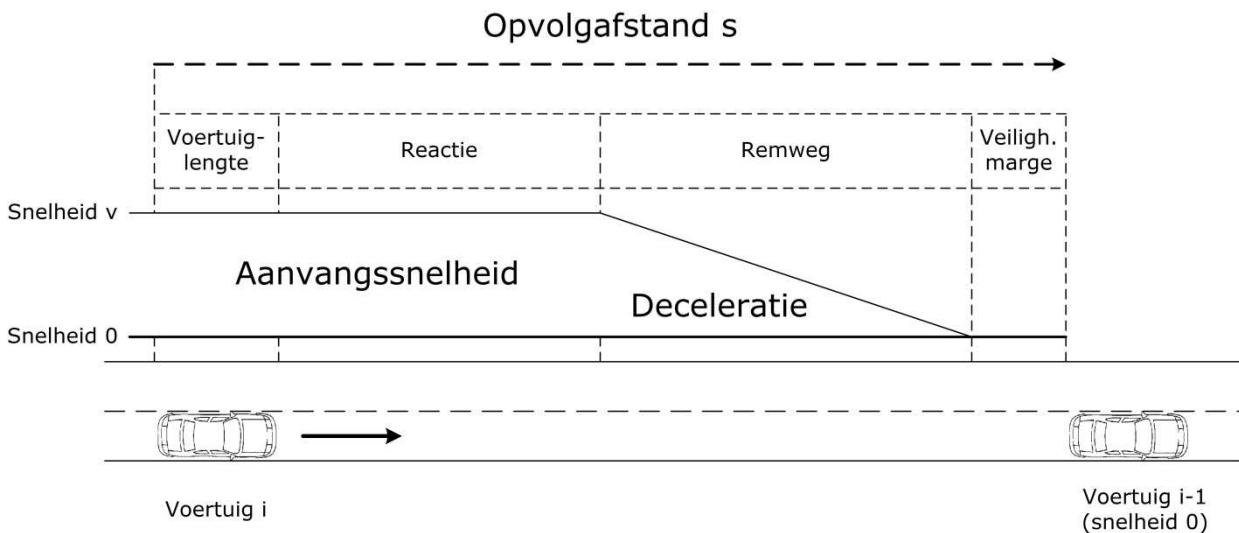
### 2.4.1 Veilige volgafstanden

Bij het bepalen van het stopzicht (paragraaf 2.3.2) is uitgegaan van de situatie dat er plotseling geremd moet worden voor een object dat stilstaat (zoals de achterkant van een file). Deze afstand geeft ook een (bovengrens voor) de veilige volgafstand tussen twee voertuigen. In het verkeer komt het vanwege het volgedrag echter niet vaak voor dat er plotseling geremd moet worden omdat de voorligger ook ineens remt. Omdat het object waarvoor geremd moet worden (de remmende auto) nog niet stilstaat, is het realistischer om de snelheid van de voorganger ook mee te nemen in de berekening van de minimale veilige opvolgafstand tussen twee auto's.

In de uitgangssituatie rijdt voertuig 2 achter voertuig 1 en houdt deze een opvolgafstand aan tot de achterkant van voertuig 1. Beide auto's hebben dezelfde snelheid  $v$ . Bestuurder van auto 2 houdt bij het kiezen van een veilige opvolgafstand het volgende scenario aan:

- Mijn voorligger gaat plotseling hard remmen tot aan stilstand;
- Ik heb een reactietijd van  $\tau$  seconden;
- Ik heb een remvertraging van  $a \text{ m/s}^2$  (met  $a > 0$ );
- Als ik aan het eind van mijn remmanoeuvre achter mijn voorganger tot stilstand kom, wil ik nog een marge van  $L_m$  over hebben.
- Ik neem aan dat de remvertraging van mijn voorligger  $\alpha$  maal mijn remvertraging  $a$  is.

Het zal duidelijk zijn dat een voorzichtige bestuurder zal aannemen  $\alpha > 1$  en een waaghals  $\alpha < 1$ . In feite is de veronderstelling  $\alpha < 1$  voor een willekeurige bestuurder wel voorstelbaar, maar niet voor een bestuurder die representatief moet zijn voor een hele rij elkaar volgende bestuurders. Dit leidt er namelijk toe dat de beschikbare remvertraging stijgt met het rangnummer in de rij en boven fysiek mogelijke waarden komt. We zullen derhalve eisen  $\alpha \geq 1$ .



FIGUUR 2.1: COMPONENTEN VAN DE COMPLETE REMMANOEUVRE

Figuur 2.1 toont de componenten van de opvolgafstand  $s$ . In formulevorm:

$$s_i = L_{veh} + L_m + vT + \frac{v^2}{2a} - \frac{v^2}{2\alpha a}$$

VERGELIJKING 2.2

of in woorden:

bruto opvolgafstand = lengte voertuig volger + marge + reactie-'afstand' + remweg volger - remweg leider

Stel  $L_{vtg} + L_m = s_0$  dan geldt:

$$s = s_0 + vT + \frac{v^2}{2a} \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right)$$

VERGELIJKING 2.3

In de formules 2.2 en 2.3 komen voor:

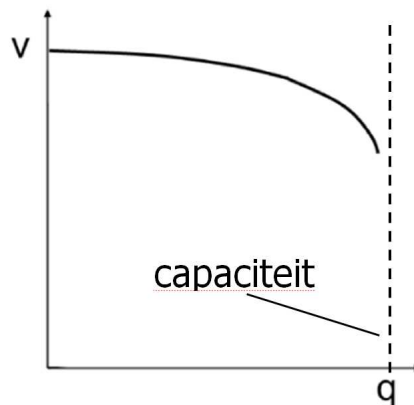
- $s$  = minimaal benodigde opvolgafstand [m]
- $v$  = snelheid van de volger [m/s]
- $a$  = remvertraging van de volger [m/s<sup>2</sup>]
- $L_{vtg}$  = lengte volgvoertuig [m]
- $T$  = reactietijd van de volger [s]
- $\alpha$  = remvermogen leider als fractie van remvermogen volger
- $L_m$  = marge bij stilstand [m]

Uit de opvolgafstand en de daarmee samenhangende opvolgtijd kan worden afgeleid hoe groot de verkeersstroom is die de rijstrook kan verwerken per tijdseenheid (de inverse van de opvolgtijd). Dat gegeven is een belangrijk uitgangspunt voor de dimensionering van de weg. Daarover gaat de volgende subparagraaf.



### 2.4.2 Capaciteit en intensiteit

Tussen de intensiteit en de snelheid bestaat een relatie, zoals is weergegeven in Figuur 2.2. Bij kleine verkeersaantallen neemt de snelheid niet af bij een verkeerstoename. Iedere automobilist kan vrijelijk zijn snelheid kiezen (de zogenaamde *free flow speed*). Dit is terug te zien in het vlakke linkergedeelte van de grafiek. Wanneer het echter drukker wordt op de weg, moeten de snellere voertuigen zich aanpassen aan de tragere en gaat de snelheid omlaag. Het rechtergedeelte van de grafiek laat dit zien door de kromming naar beneden. De grafiek in Figuur 2.2 laat de relatie tussen de snelheid en intensiteit zien voor de situatie waarin geen congestie optreedt. Wanneer de intensiteit groter is dan de capaciteit, dreigt er congestie en geldt een andere relatie tussen de snelheid en intensiteit. Hierop wordt verder ingegaan in Deel 4 Hoofdstuk 1.



FIGUUR 2.2: VERHOUDING TUSSEN SNELHEID (v) EN INTENSITEIT (Q) (ZONDER CONGESTIE)

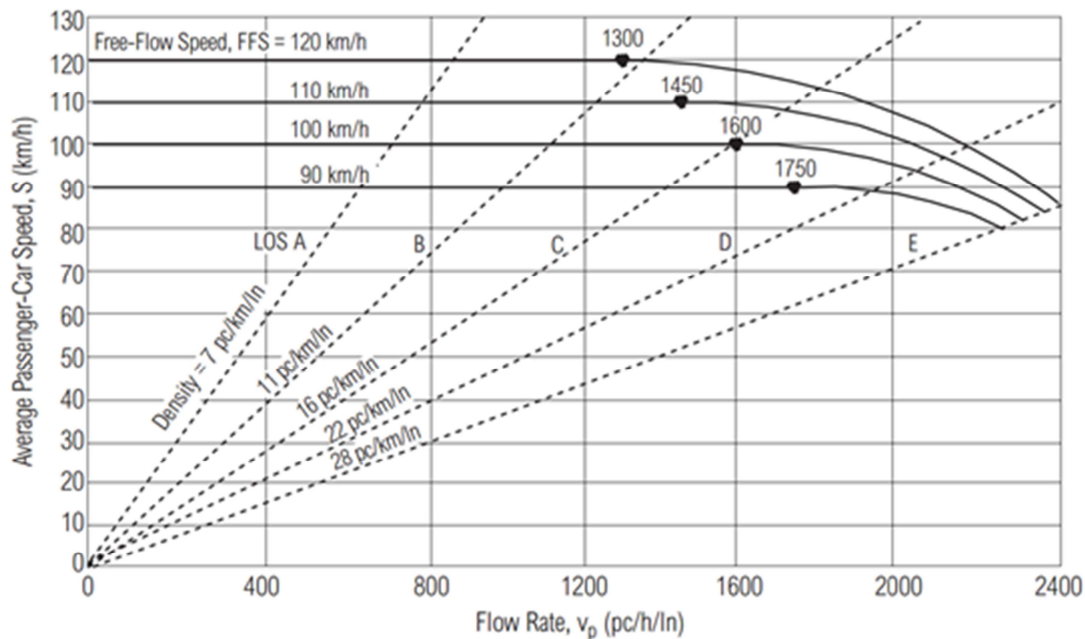
Onder intensiteit wordt het aantal voertuigen verstaan dat een bepaald wegvak gedurende een tijdsperiode passeert; hiervoor kan een jaar, een dag of een uur worden genomen. De maximale intensiteit is het maximale aantal voertuigen dat gedurende een bepaalde tijdseenheid een denkbeeldige plaats (raai) passeert. Uit praktijkwaarnemingen is gebleken dat dit over het jaar heen een allerm minst stabiel aantal is; het is afhankelijk van onder meer verkeerssamenstelling, zicht, weggeometrie, weersomstandigheden en rijstrookbreedte. Er is sprake van een stochastisch proces. Voor de dimensionering van een weg wil men met één waarde rekenen en daarvoor wordt de intensiteit genomen die maar in een beperkt aantal gevallen wordt overschreden (zeg 15%). Die waarde wordt de capaciteit genoemd.

Er zijn verschillende methoden waarmee de wegontwerper de benodigde capaciteit kan bepalen. Een van die methoden is beschreven in de Highway Capacity Manual (HCM). Volgens deze methode wordt de benodigde capaciteit bepaald op basis van het gewenste afwikkelingsniveau.

Als op een wegvak een intensiteit optreedt die de capaciteit nadert, is het zogenoemde afwikkelingsniveau laag. Met het afwikkelingsniveau ("level of service", LOS) wordt de toelaatbare intensiteit bedoeld behorend bij een gewenste rijkwaliteit van de verkeersstroom in een bepaalde situatie. Het afwikkelingsniveau wordt met een letter aangeduid: A is het hoogste en E het laagste niveau. Naarmate een weg meer een verbindende verkeersfunctie dan een ontsluitende of toegangsfunctie vervult, wordt een lager afwikkelingsniveau (C en D) toelaatbaar geacht. In een woonstraat is een capaciteitsbelasting ontoelaatbaar, terwijl dat voor een autosnelweg niet het geval is. Voor al de hierna volgende wegvoorzieningen en vervoerwijzen nadert de intensiteit de capaciteit conform de HCM bij afwikkelingsniveau E.

In Figuur 2.3 is de verhouding tussen de snelheid en de intensiteit voor vier verschillende snelheden weergegeven. De intensiteit is uitgedrukt in pae/h/strook. Pae is de afkorting van personenauto-equivalent (1 pae staat voor een gemiddelde personenauto; voor vrachtauto's wordt vaak 1,5 of 2 pae toegepast omdat de vrachtauto een groter voertuig is dat bovendien door zijn rijkarakteristiek een groter beslag legt op de wegcapaciteit).

De vorm van de grafieken in Figuur 2.3 komt overeen met die uit Figuur 2.2. In Figuur 2.3 onderscheiden de stippellijnen de afwikkelingsniveaus A t/m E.



FIGUUR 2.3: AFWIKKELINGSNIVEAUS A T/M E (PC/H/LN = PAE PER UUR PER RIJSTROOK) [HIGHWAY RESEARCH BOARD, 2001]

Op een nieuwe autosnelwegverbinding wordt een verkeersintensiteit verwacht van 5500 pae/h in een maatgevend spitsuur voor de drukste rijrichting. Voor de nieuwe weg is afwikkelingsniveau C gewenst bij een free flow speed van 100 km/h. Hoeveel rijstroken moet de autosnelweg in deze rijrichting hebben om aan dit afwikkelingsniveau te voldoen?

In Figuur 2.3 is te zien dat de maximum flow rate voor afwikkelingsniveau C bij de kromme van een free flow speed van 100 km/h gelijk is aan 1600 pae/h/strook. Er zijn dus  $5500/1600 = 3,44 \rightarrow 4$  rijstroken nodig om aan afwikkelingsniveau C te kunnen voldoen.

#### VOORBEELD 2.1: AANTAL RIJSTROKEN

Bij het bepalen van het benodigde aantal rijstroken voor een bepaald afwikkelingsniveau moet rekening worden gehouden met een aantal factoren die invloed hebben op de intensiteit (vraagzijde) en de capaciteit (aanbodzijde).

Aan de vraagzijde:

- het aandeel verkeer van de etmaalintensiteit dat in het maatgevende spitsuur plaatsvindt;
- de seizoensfactor, waarmee fluctuaties tussen seizoenen worden verdisconteerd;
- de intensiteitsverdeling naar rijrichting in het spitsuur;
- optioneel: de DKF-factor (drukste kwartier-factor), waarmee de *rate of flow* wordt verrekend.

Aan de aanbodzijde:

- de breedte van de rijstrook;
- de vrachtautofactor (o.a. i.v.m. hellingen)
- de bestuurdersfactor, die aangeeft of de bestuurders bekend zijn met de weg (veel forensen) of niet (veel toeristen)

Voor de capaciteit per rijstrook werd in de HCM's tot 1994 2000 pae/h/strook aangehouden. In dat jaar is men tot een verhoging van de capaciteit met 10 % tot 2200 pae/h/strook overgegaan, als gevolg van de toegenomen routine van de bestuurders. In feite is deze waarde vastgesteld voor een zogenoemde ideale weg- en verkeerssituatie: vlak en recht, 3,60 m brede rijstroken, geen bermvrees veroorzakende obstakels langs de weg en ter plaatse goed bekend verkeer. Afwijkingen van deze ideale situatie worden in de bovengenoemde aanbodcorrectiefactoren aangebracht, bijvoorbeeld lengte en steilte van hellingen in de vrachtautofactor.

**DRUKSTE KWARTIER-FACTOR**

Om een extra veiligheid in te bouwen tegen het ontstaan van files, kan ervoor gekozen worden om een zogenaamde drukste kwartier-factor mee te nemen. Dit betekent dat niet het drukste uur, maar het drukste kwartier maatgevend is.

Hiervoor wordt het begrip *rate of flow* gebruikt. De *rate of flow* in vtg/h wordt bepaald door de 15-minuten-intensiteit met vier te vermenigvuldigen. Intensiteit en *rate of flow* zijn dus verschillende begrippen: intensiteit is het werkelijke aantal voertuigen dat passeert gedurende de tijdsperiode, terwijl *rate of flow* een maat is voor het maximum van de variatie van de intensiteit binnen de beschouwde periode. Tabel 2.11 geeft daarvan een voorbeeld.

Tijdsperiode	Intensiteit [vtg/15 min]	Rate of flow [vtg/h]	Intensiteit [vtg/h]
7.00 – 7.15 h	1.000	4.000	
7.15 – 7.30 h	1.200	4.800	
7.30 – 7.45 h	1.100	4.400	
7.45 – 8.00 h	1.000	4.000	
7.00 – 8.00 h			4.300

TABEL 2.11: INTENSITEIT EN RATE OF FLOW IN EEN SPITSUUR

Indien de uurintensiteit van een tweestrooksbaan van een autosnelweg 4300 vtg bedraagt, de *rate of flow* per 15 minuten varieert en het wegontwerp op 4500 vtg/h zou worden gebaseerd, zou gedurende een interval van 15 minuten de capaciteit overschreden worden, wat congestie tot gevolg kan hebben. Als men alleen naar de intensiteit van 7 tot 8 uur zou hebben gekeken, zou men denken dat de intensiteit kleiner is dan de capaciteit. Om de variatie in de intensiteit te verdisconteren is de spitsuurfactor DKF (drukste kwartier-factor) ingevoerd. De DKF is de grootste *rate of flow* gedeeld door de spitsuurintensiteit ( $4.800 / 4.300 = 1,12$ ). Door de berekende capaciteit van de te ontwerpen weg te vermenigvuldigen met deze DKF, wordt dus een grotere design-capaciteit berekend en is de kans op files nog kleiner.

De HCM dient ook als basis in het Nederlandse wegontwerp. In Tabel 2.12 is een van de tabellen uit de NOA opgenomen, waarmee de capaciteit van een autosnelweg kan worden bepaald. Die is in de tabel afhankelijk van het aantal rijstroken en het percentage vrachtverkeer. Er is uitgegaan van een rijstrookbreedte van 3,50 m en van goede omstandigheden (droog, daglicht, voldoende zicht). Wanneer de rijstroken zijn versmald of wanneer de omstandigheden niet optimaal zijn, is de capaciteit lager.

Aandeel vrachtverkeer	Aantal rijstroken				
	2	3	4	5	6
0%	4650	7250	9700	12150	14450
1%	4627	7214	9652	12090	14378
2%	4604	7178	9604	12030	14307
3%	4581	7143	9557	11970	14236
4%	4559	7108	9510	11912	14167
5%	4537	7073	9463	11854	14098
6%	4515	7039	9417	11796	14029
7%	4493	7005	9372	11739	13961
8%	4471	6971	9327	11683	13894
9%	4450	6938	9282	11627	13828
10%	4429	6905	9238	11571	13762
11%	4408	6872	9194	11517	13697
12%	4387	6840	9151	11462	13632
13%	4366	6808	9108	11408	13568
14%	4346	6776	9065	11355	13505
15%	4326	6744	9023	11302	13442
16%	4306	6713	8981	11250	13380
17%	4286	6682	8940	11198	13318
18%	4266	6651	8899	11147	13257
19%	4247	6621	8858	11096	13196
20%	4227	6591	8818	11045	13136
21%	4208	6561	8778	10995	13077
22%	4189	6532	8739	10946	13018
23%	4170	6502	8700	10897	12960
24%	4152	6473	8661	10848	12902
25%	4133	6444	8622	10800	12844

TABEL 2.12: RICHTWAARDEN VOOR DE CAPACITEIT VAN AUTOSNELWEGEN (MVTG/H) [RIJKSWATERSTAAT AVV, 2007]

### 3 ONTWERPELEMENTEN

In dit hoofdstuk wordt het wegontwerp voor verschillende basis-ontwerpelementen op basis van de vier ontwerpaspecten uitgewerkt. De volgende ontwerpelementen worden in de komende paragrafen beschreven:

- Dwarsprofiel van de weg
- Horizontaal alignement
  - o Rechtstand
  - o Boog
  - o Overgangsboog
  - o Algemeen
- Verticaal alignement
  - o Langshelling
  - o Afrondingsbogen
  - o Algemeen
- Knooppunten, kruispunten en rotondes

In de teksten is gebruik gemaakt van enkele definities die hieronder kort zijn toegelicht.

Een **wegvak** is een in lengterichting begrensd gedeelte van een weg tussen twee knooppunten of twee aansluitingen (zie paragraaf 3.6).

Een **uitvoegstrook** is een aanliggende strook verharding langs de hoofdweg die afslaand verkeer in staat stelt uit de hoofdstroom uit te voegen. Het uitvoegen resulteert in een afzonderlijke rij voertuigen die met aangepaste snelheid de hoofdweg kunnen verlaten.

Een **invoegstrook** is een aanliggende strook verharding langs de hoofdweg die verkeer vanaf de zijweg in staat stelt met aangepaste snelheid in de hoofdstroom in te voegen. Het invoegen resulteert in één ineengeschoven rij voertuigen.

Een **weefvak** is een onderdeel van een wegvak bestaande uit de hoofdrijbaan met een ter zijde gelegen invoegstrook die stroomafwaarts overgaat in een uitvoegstrook. Kenmerkend bij een weefvak is dat het in- en uitvoegende verkeer elkaar onder een zeer scherpe hoek kruist over een doorgaans niet al te grote afstand. Deze manier van kruisen wordt "weven" genoemd.

## 3.1 Dwarsprofiel

### 3.1.1 Inleiding

Een dwarsprofiel is de verticale doorsnede loodrecht op de lengteas van de weg. Dit profiel kan representatief zijn voor een bepaald wegvak (algemeen geldend) of bewust gekozen op een bepaalde plaats (alleen dáár geldig). Deze doorsnede geeft de vorm weer van de weg in dwarsrichting met de samenstellende elementen in afmeting en hoogteligging. In de volgende subparagrafen wordt per ontwerpaspect het dwarsprofiel van een weg besproken.

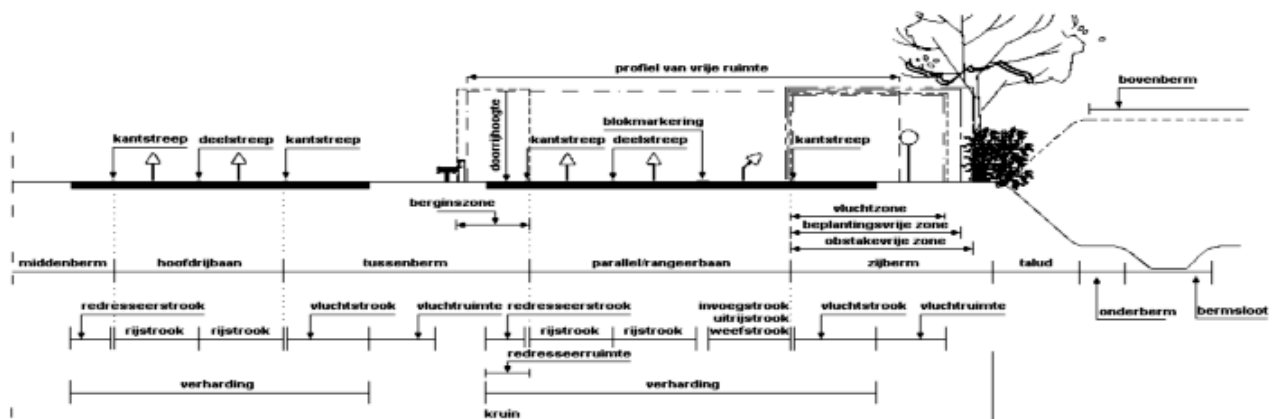
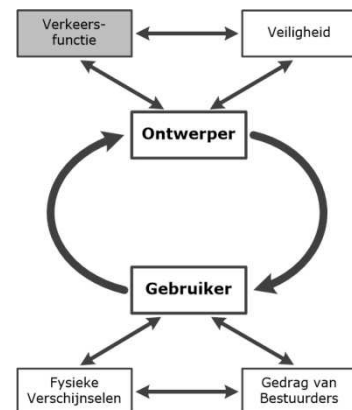
### 3.1.2 Verkeersfunctie

In Figuur 3.1 zijn enkele belangrijke dwarsprofiel-elementen weergegeven.

Onder de **rijbaan** wordt het aaneengesloten bereiden gedeelte van de verharding verstaan. Alles wat buiten de kantstrepen ligt, wordt in principe gerekend tot de berm. Ontbreken kantstrepen, dan begint de berm naast de verharding. Een autosnelweg heeft twee rijbanen.

De **rijstrook** is een gedeelte van de rijbaan, begrensd door markering op het wegdek en bestemd voor één rij bewegende voertuigen.

In Tabel 3.1 zijn de gewenste breedtes van de dwarsprofiel-elementen weergegeven op basis van de NOA en het Handboek Wegontwerp. De dwarsprofiel-elementen uit de eerste kolom komen in de volgende subparagrafen aan bod. Voor wegen binnen de bebouwde kom is het niet eenvoudig om standaardmaten voor de wegbreedte te geven. Dit hangt van vele factoren af, zoals de verkeers-samenstelling, al dan niet vrijliggende fietspaden, erf- of verkeersfunctie van de weg, wel/geen aanliggende parkeerstroken. Voor de juiste dimensionering van dit type wegen wordt verwezen naar de Aanbevelingen voor Verkeersvoorzieningen binnen de bebouwde kom (ASVV, 2004).

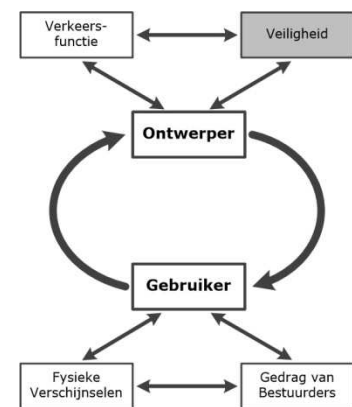


FIGUUR 3.1: DWARSPROFIELELEMENTEN

### 3.1.3 Veiligheid

Bij stroomwegen en gebiedsontsluitingswegen maakt nog een stukje verharding deel uit van de rijbaan: de **redesseeerstrook** (ook wel kortweg kantstrook genoemd), die aan enigszins uit de koers geraakte voertuigen gelegenheid tot koerscorrectie biedt.

In principe worden alleen langs autosnelwegen in de rijrichting rechts **vluchtstroken** aangelegd, met het oogmerk plaats te bieden aan gestrande voertuigen en voor gebruik door hulpdiensten. Bevat een rijbaan vier of meer rijstroken, dan wordt ook links een vluchtstrook aangebracht. Er is een tendens gaande om de vluchtstrook in speciale gevallen als aanvullende rijstrook te gebruiken: bij werk in uitvoering (tijdelijk), als busbaan (permanent), als spitsstrook of bij andere benuttingsmaatregelen. Dit verklaart de toenemende noodzaak naast de vluchtstrook een extra **vluchtruimte** te creëren. Waar mogelijk moet met deze nieuwe ontwikkeling rekening worden gehouden.



Voor voertuigen met panne die geen kans zien de vluchtstrook te bereiken, biedt aan de middenbermzijde de **bergingszone** uitkomst. Ook onderhoudsvoertuigen (herstel van geleiderail, verlichting) kunnen dan buiten de rijbaan gehouden worden.

In het ideale geval is de berm minstens even breed als de **obstakelvrije zone** (ovz). Onder obstakels worden voorwerpen, beplantings- en dwarsprofiel-elementen verstaan, die bij aanrijding ernstige schade kunnen veroorzaken aan het voertuig en/of (dodelijk) letsel aan de inzittenden. In die gevallen dat de gewenste breedte van de obstakelvrije zone (ovz) niet wordt gehaald, zal het obstakel door middel van een geleiderail moeten worden afgeschermd. Zie dit in verband met het vergevingsgezindheidsprincipe van duurzaam veilig (paragraaf 2.2.1)

Element van dwarsprofiel	Stroomwegen [m]			Gebiedsontsluitingswegen [m]		Erftoegangswegen [m]	
	Nationaal	Regionaal, 2x2	Regionaal, 2x1	Type I	Type II	Type I	Type II
<b>Ontwerpsnelheid</b>	120 km/h	100 km/h	100 km/h	80 km/h	80 km/h	60 km/h	60 km/h
<b>Verhardingsbreedte</b>	11,25	9,95	6,25	7,25	7,50	4,50-6,00	4,50-6,00
<b>Rijstrookbreedte</b>	3,35	3,25	3,00	3,10	2,75	3,5	3,00
<b>Deelstreep</b>	0,15	0,15	-	0,15	0,15	-	-
<b>Kantstreep</b>	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10
<b>Redresseerstrook</b>	0,60	0,60	0,60	0,30	0,30	-	-
<b>Vluchtruimte</b>	3,30	2,45	2,45	2,40	2,40	-	-
<b>Obstakelvrije zone</b>	13,00	-	-	6,00	6,00	1,50	1,50
<b>Objectafstandsmarge</b>	1,50	≥ 1,50	1,50	-	-	-	-
<b>Middenberm</b>	-	-	-	≥ 3,90	-	-	-
<b>Hoogte scheidingswal</b>	-	-	-	≥ 1,00	-	-	-
<b>Rijrichtingscheiding</b>	-	-	-	-	0,80	-	-
<b>Zijberm</b>	-	-	-	-	-	2,50	2,50
<b>Kantstrook</b>	-	-	-	-	-	varieert*	-
<b>Tussenberm bij fietspaden</b>	-	-	-	-	-	2,5	-
<b>Fietsstrook</b>	-	-	-	-	-	-	1,50

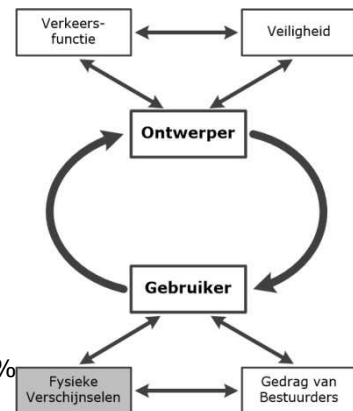
\* De kantstrook kan een uitwijkstrook, suggestiestrook of fietsstrook zijn. De breedte van deze strook is dus afhankelijk van het type strook.

TABEL 3.1: BREEDTES VAN DWARSPROFIELELEMENTEN

### 3.1.4 Fysieke verschijnselen

Bij het ontwerpaspect 'verkeersfunctie' is al aangegeven dat de breedte van de rijstrook afhankelijk is van de toegestane snelheid. Bij hogere snelheden raakt een voertuig bij een kleine stuurbeweging sneller uit koers dan bij een lagere snelheid. Daarom is bij hoge snelheden een grotere rijstrookbreedte vereist.

Een ander fysiek verschijnsel dat invloed heeft op het dwarsprofiel is de afwatering van de weg. Hiervoor wordt een minimale standaard dwarshelling (afschot) aangehouden van 2%. Alleen bij autosnelwegen met asfaltverharding is dit 2½% vanwege de doorgaans grotere verhardingsbreedtes, en de grotere kans op rijsporen met daarin ongewenste plasvorming (gevaar voor aquaplaning). De onverharde zijbermen worden standaard onder 5 % afschot gelegd.

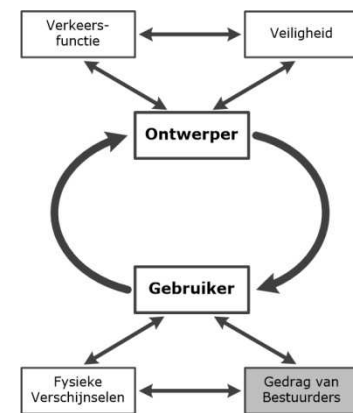


In de wegbermen kunnen taluds verwerkt zijn. Dit zijn hellingen in het dwarsprofiel. **Neergaande taluds** steiler dan 1:3 en liggend in de ovz, worden beschouwd als obstakels en moeten worden afgeschermd. Neergaande taluds tussen 1:3 en 1:6 en met afrondingsbogen van minimaal 9 meter kunnen worden toegepast binnen de ovz. Taluds van 1:6 of flauwer kunnen zonder meer deel uitmaken van de ovz. Opgaande taluds steiler dan 1:2 en met een kleinere straal van de onderafronding dan 6 meter worden als obstakels beschouwd. Een watergang dieper dan 1 meter kan ook als obstakel worden beschouwd.

### 3.1.5 Gedrag van bestuurders

De vormgeving van het dwarsprofiel is afhankelijk van de ruimte die bestuurders nodig hebben op de weg. Deze benodigde ruimte bepaalt het profiel van vrije ruimte. Het profiel van vrije ruimte is (in dwarsrichting gezien) de optelsom van twee componenten: de breedte van het ontwerpvoertuig en een objectafstandsmarge. Onder de objectafstandsmarge (oam) verstaan we de afstand tussen het voertuig en vaste voorwerpen naast de rijbaan. Deze maat is vastgesteld op een zodanige grootte dat er geen merkbaar schrik-effect van deze obstakels uitgaat. De oam is afhankelijk van de snelheid (zie Tabel 3.2).

De oam heeft niet alleen betrekking op vaste voorwerpen in de berm, maar ook op stilstaande voertuigen langs de kant van de rijbaan en evenzeer op rijdende "obstakels", zoals in te halen vrachtauto's op de rechterrijstrook. Bestuurders van personenauto's blijken in dat geval een oam van ca. 1,80 m in acht te nemen (dagmaat tussen de voertuigen). Dit betekent dat personenauto's tijdens zo'n manoeuvre aan de rand van de rijstrook kunnen komen, zodat de oam voor voorwerpen in de berm vanuit de kantstreep moet worden gemeten. De oam mag niet worden verward met de obstakelvrije zone. De obstakelvrije zone is een onderdeel van het dwarsprofiel dat uit veiligheidsoogpunt vrij moet blijven. De oam is de afstand die bestuurders tot objecten in acht nemen en is dus afhankelijk van het gedrag van de bestuurder.



Snelheid [km/h]	Personenauto [m]	Vrachtauto [m]
120	1,50	nvt
100	1,35	nvt
80	1,00	1,00
50	0,50	0,50

TABEL 3.2: OBJECTAFSTANDMARGE VOOR MOTORVOERTUIGEN



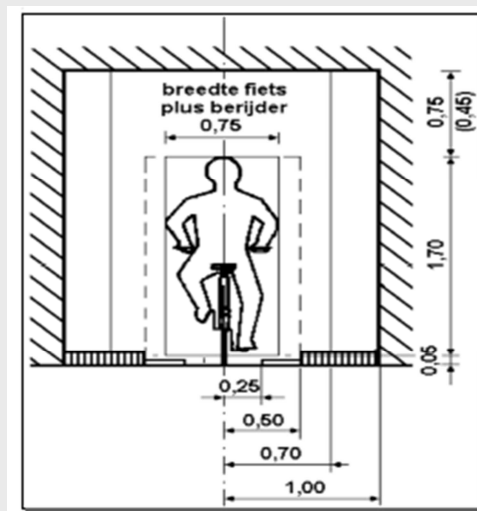
Het profiel van vrije ruimte kent een minimum-doorrijhoogte van 4,60 m. Deze maat is opgebouwd uit 4,00 m wettelijke maximum-hoogte voor vrachtauto's, 0,20 m voor de vering, 0,10 m voor extra lagen asfalt en 0,30 m extra marge ter onderdrukking van de "plafondvrees". Bij trams en trolleybussen moet bovendien nog rekening worden gehouden met de aanwezigheid van een bovenleiding. De rijdraad bevindt zich 5,50 m boven het wegdek. Bij onderdoorgangen kan de hoogte eventueel worden verkleind tot 4,60 m.

Afhankelijk van de verkeerssamenstelling zou in bepaalde situaties (urbane gebieden) overwogen kunnen worden met minder doorrijhoogte te volstaan. Dit kan bijvoorbeeld nodig zijn om hellingen van onderdoorgangen te kunnen inpassen in een beperkte ruimte. Men moet hiermee echter uiterst voorzichtig zijn. Voor hulpdiensten (brandweer!) mag geen enkele hoogtebelemmering worden opgeworpen.

### **(Brom)fietsers en voetgangers**

Bij **(brom)fietsers** wordt uitgegaan van een breedte van 0,75 m (zie Figuur 3.2). Dit is de wettelijk maximale afmeting van (brom)fiets + berijder. De geconstateerde obstakelvreesafstanden, gemeten vanuit de rijlijn, luiden:

- 0,25 m t.o.v. groen à niveau of trottoirband lager dan 5 cm,
- 0,50 m t.o.v. trottoirband van 5 cm of hoger,
- 0,70 m t.o.v. vaste voorwerpen (masten, borden, paaltjes, bomen e.d.),
- 1,00 m t.o.v. gesloten wand,
- 2,50 m t.o.v. plafond.



FIGUUR 3.2: PROFIEL VAN VRIJE RUIMTE VOOR FIETSERS

Voor **voetgangers** heeft het gewenste profiel van vrije ruimte een breedte van 0,70 m + twee marges van 0,15 m aan weerszijden = 1,00 m. Bij korte vernauwingen in een looproute kunnen de marges worden weggelaten (0,70 m); bij puntvernauwingen (lichtmasten, verkeersborden, bomen e.d.) kan met een breedte van 0,50 m worden volstaan. Voor slechtzienden, slechtlopenden en rolstoelgebruikers dienen de voornoemde maten met 0,50 m te worden vergroot. De vrij te houden hoogte bedraagt bij voorkeur 2,50 m, met 2,25 m als minimum.

VOORBEELD 3.1: PROFIEL VAN VRIJE RUIMTE VOOR FIETSERS EN VOETGANGERS

## 3.2 Horizontaal alignement: rechtstand, boog en overgangsboog

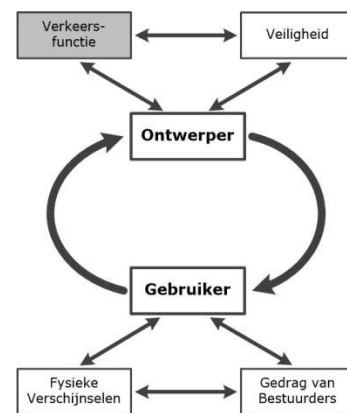
### 3.2.1 Verkeersfunctie

In deze paragraaf staat het ontwerp van het horizontaal alignement van wegen centraal vanuit de verkeersfunctie. Daarbij moeten we ons realiseren dat naast de verkeersfunctie ook omgevingskenmerken randvoorwaarden stellen aan het tracé van wegen. Dit geldt in sterke mate voor erftoegangswegen: deze volgen vaak het landschap (verkaveling, dijken, etc.) en de bebouwing (stedenbouwkundige structuur). Niet alle in deze paragraaf genoemde ontwerpprincipes zijn dan ook van toepassing op erftoegangswegen.

#### *Rechtstand*

Toepassing van lange rechtstanden in het alignement wordt, ongeacht het wegtype, zoveel mogelijk vermeden om een voldoende afwisselend wegbeeld te verkrijgen. Waar ze niet te vermijden zijn, moet ernaar worden gestreefd de lengte van de rechtstanden te beperken tot in meters van 20 x de ontwerpsnelheid (in km/h). Indien mogelijk worden lange rechtstanden in stroomwegen vervangen door zeer ruime bogen met stralen van 50.000 à 200.000 meter.

Rechtstanden zijn wel goed inpasbaar bij knoop- en kruispunten en aansluitingen in verband met de afwezigheid van parallax (de perspectivisch schijnbare verschuiving van wegbeeldelementen die in bogen kan optreden, zoals rijstrookpijlen op bewegwijzeringspanelen die niet boven de bedoelde rijstroken lijken te hangen). Ook kunnen rechtstanden nodig zijn in geval van bundeling met bestaande rechte infrastructuur. In verband met de rasterstructuur van het wegennet binnen de bebouwde kom en de daar voorkomende lagere snelheden zijn rechtstanden van beperkte lengte toelaatbaar.



Als twee bogen met tegengestelde draaiingrichting direct op elkaar worden aangesloten (zonder S-clotoïde, zoals beschreven in paragraaf 3.4), ontstaat een knik in het wegbeeld. Daarom verdient het aanbeveling tussen deze bogen een rechtstand aan te brengen met een lengte [m] van minimaal 2 x de ontwerpsnelheid [km/h].

Een korte rechtstand tussen twee gelijkgerichte bogen geeft de indruk van een tegenboog. Dit kan worden voorkomen door in plaats van een rechtstand een zeer ruime tussenboog toe te passen, waarvan de straal in de orde van 10 à 25 x die van de te verbinden bogen bedraagt. Mocht een ruime tussenboog niet inpasbaar zijn, dan moet een rechtstand worden gebruikt met een lengte [m] van ten minste 4 x de ontwerpsnelheid [km/h].

#### *Boog*

De horizontale boog is het basiselement van het wegontwerp. Voor autosnelwegen zijn drie klassen boogstralen te onderscheiden, elk met een eigen toepassingsgebied:

- grote boogstralen in plaats van rechte tracégedeelten ( $50.000 \text{ m} < R < 100.000 \text{ m}$ );
- gewone boogstralen in gebogen tracégedeelten ( $1000 < R < 50.000 \text{ m}$ );
- krappe boogstralen buiten de hoofdrijbaan ter plaatse van knooppunten en aansluitingen ( $50 < R < 1000 \text{ m}$ ).

Voor gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen zijn de boogstraalgrenzen proportioneel lager.

#### *Overgangsboog*

Tussen rechtstand en boog en tussen bogen onderling kunnen overgangsbogen worden toegepast. Een overgangsboog heeft de volgende functies:

- het mogelijk maken van een geleidelijke stuurverdraaiing om de zijdelingse versnelling geleidelijk te doen veranderen;
- het plaats bieden aan de verkantingsovergang wanneer deze nodig is;

- het plaats bieden aan een geleidelijke opbouw van de bochtverbreding wanneer deze nodig is;
- het vermijden van knikken in het wegbeeld.

Een overgangsboog wordt op autosnelwegen bij voorkeur in alle overgangen tussen rechtstanden en bogen en tussen bogen met een verschillende boogstraal toegepast. Een overgangsboog wordt verder altijd toegepast als er sprake is van een verkantingsovergang. Op erftoegangswegen wordt echter in principe noch verkantingsovergangen, noch overgangsbogen toegepast. Daarnaast wordt de overgangsboog ook op gebiedsontsluitingswegen binnen de bebouwde kom vaak achterwege gelaten.

Afhankelijk van de ontwerpsnelheid moeten bij de cirkelbogen in tabel 3.3 overgangsbogen worden toegepast volgens het Handboek Wegontwerp; deze waarden komen overeen met de minimumboogstraal waarbij een tegenverkanting van -2,5% nog kan worden toegepast.

v [km/h]	120	100	80	50
R [m]	< 4000 <sup>4</sup>	< 2500	< 1400	< 300

TABEL 3.3: BOVENGRENZEN VAN BOOGSTRALEN WAARONDER OVERGANGSBOGEN NOODZAKELIJK ZIJN

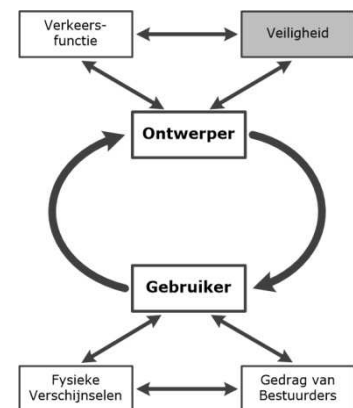
### 3.2.2 Veiligheid

#### Rechtstand

Zoals in de vorige subparagraaf is aangegeven, kleven aan de rechtstand nadelen als monotonie, een lager attentieniveau en slecht zicht op verkeer stroomafwaarts. Bovendien ontstaan knikken in het alignment als rechtstanden door bogen met te krappe straal worden verbonden. Deze aspecten zijn nadelig voor de verkeersveiligheid, dus daarom moeten rechtstanden in een wegontwerp worden vermeden.

#### Boog

In tegenstelling tot de rechtstand, zorgen bochten juist voor een afwisselend wegbeeld en een hoger attentieniveau bij de bestuurder. De boog dient echter duidelijk herkenbaar te zijn, zodat deze op een veilige manier doorlopen kan worden. Deze herkenbaarheid en overzichtelijkheid van de bocht kan worden beperkt door vaste objecten in de binnenbocht. In paragraaf 3.3 is uitgewerkt hoe de minimale boogstraal op basis van de zichtafstand in een bocht kan worden berekend.



#### Overgangsboog

De overgangsboog zorgt ervoor dat er geen abrupte stuurverdraaiingen tijdens het berijden van de boog nodig zijn. In een overgangsboog kan het stuur geleidelijk worden gedraaid, zodat de boog rustig en veilig kan worden ingestuurd.

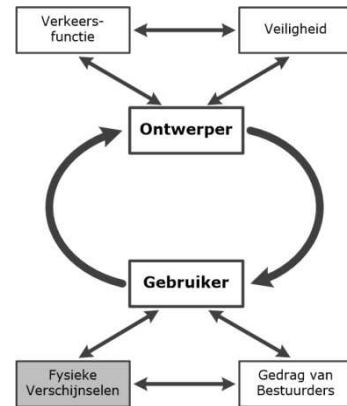
<sup>4</sup> Grenswaarde volgens de oude Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). In de nieuwe ontwerprichtlijnen is geen waarde gegeven voor boogstralen waarboven overgangsbogen niet meer zouden hoeven worden toegepast.

### 3.2.3 Fysieke verschijnselen

#### Verkanting

De berijdbaarheid van een boog wordt bepaald door de relatie tussen snelheid, boogstraal, zijdelingse wrijving en verkanting. Onder verkanting wordt niet alleen de standaard dwarshelling (afschot) verstaan, maar meer specifiek een vergroting van de dwarshelling die bij krappere bogen nodig kan zijn om de middelpuntvliedende kracht op voertuig en inzittenden te reduceren.

Er is een onderscheid tussen positieve en negatieve verkanting. Een positieve verkanting helpt mee aan de reductie van de centrifugaalkracht (in een linksdraaiende boog is de afwatering naar links). Bij een negatieve verkanting (of tegenverkanting) is er een tegenspraak tussen draai- en afwateringsrichting. Zeer grote bogen kunnen zonder rijtechnische bezwaren onder tegenverkanting worden gelegd, die dan 2% of 2,5% bedraagt. Wanneer de boogstraal kleiner wordt, zal eens een ondergrenswaarde worden bereikt waarbij het uit rijtechnische en comfortoverwegingen nog net acceptabel is de boog onder de verkeerde verkanting te nemen. Voornoemde ondergrenswaarde voor de boogstraal fungeert dan als omslaggrenswaarde tussen toepassing van positieve en negatieve verkanting.



De ondergrens voor de benodigde verkanting, gegeven de ontwerpsnelheid, wordt bepaald door de (snelheidsafhankelijke) zijdelingse wrijvingsweerstand en de ontwerpsnelheid van de boog. We nemen een lineair verband aan tussen de snelheid en de zijdelingse wrijvingsweerstand. De toegelaten wrijving is dan ook verdisconteerd in de formule 3.1, die het dynamische evenwicht weergeeft tussen boogstraal, snelheid en verkanting.

$$R \geq \frac{7V^2}{210 - V + 9p}$$

VERGELIJKING 3.1

waarin:

- $R$ : boogstraal [m]  
 $V$ : ontwerpsnelheid [km/h]  
 $p$ : verkantingspercentage [%]

Voor elke ontwerpsnelheid kan nu op eenvoudige wijze de omslaggrenswaarde voor de boogstraal worden berekend door voor  $p$  -2,5 in te vullen. Voor  $V = 120$  km/h wordt  $R = 1500$  m. Bogen met  $R \geq 1500$  m mogen in principe in tegenverkanting worden gelegd, maar aangeraden wordt om ook boven dit minimum een positieve verkanting toe te passen, tot een straalgrootte van 2,5 à 3 x dit minimum (afgerond 4000 m). Er bestaat dus naast een verplichte omslaggrenswaarde ook nog een gewenste omslaggrenswaarde.

Bogen met  $R < 1500$  m (nog steeds voor  $V = 120$  km/h) krijgen altijd een positieve verkanting, oplopend tot 5 %. Dit is de maximum-waarde die voor hoofdrijbanen van auto(snel)wegen wordt gehanteerd. Invulling van  $p = 5$  levert  $R = 750$  m op. In het straalgebied tussen 1500 en 750 m wordt de verkanting lineair geïnterpoleerd.

Voor lagere snelheden gelden dezelfde principes. In Tabel 3.4 is voor diverse snelheden het verband af te lezen tussen straalgrootte en de minimale verkanting.

Boogstraal [m]	Verkanting [%]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>120</b>	1018	933	862	800	747	700	659	622	589	560
<b>110</b>	777	718	667	623	584	550	520	492	468	446
<b>100</b>	588	547	511	479	452	427	405	385	366	350
<b>90</b>	440	411	386	363	344	326	310	295	282	270
<b>80</b>	322	303	285	270	256	243	232	222	212	204
<b>60</b>	158	150	142	135	129	124	118	114	109	105
<b>50</b>	104	98	94	89	85	82	78	75	73	70
<b>30</b>	33	32	30	29	28	27	26	25	24	23

TABEL 3.4: SAMENHANG TUSSEN SNELHEID, STRAALGROOTTE EN VERKANTING

In de huidige Nederlandse ontwerprichtlijnen (NOA en Handboek Wegontwerp) worden echter om redenen van wegbeeld beduidend hogere verkantingspercentages geadviseerd. Een hoger verkantingspercentage vergroot de zichtbaarheid van de boog, en verbetert daarmee de inschatting van de boogstraal. Zo adviseert de NOA om een verkantingspercentage van 3 bij 120 km/h toe te passen in een boog met een straal van 1350 meter, gegeven dat het voorgaande gedeelte ook een ontwerpsnelheid heeft van 120 km/h. Het verschil is relatief nog groter op een regionale stroomweg, waar een boog met een ontwerpsnelheid van 80 km/h wordt toegepast na een weggedeelte met een ontwerpsnelheid van 100 km/h. In dit geval adviseert het Handboek Wegontwerp om een verkanting van 3% toe te passen bij een boogstraal van ongeveer 975 meter. Vanaf 5% verkanting is echter de dynamica maatgevend en worden dus (bij benadering) de waarden toegepast uit tabel 3.4.

Opeenvolgende boogstralen moeten zo worden gekozen dat deze doorreden kunnen worden zonder al te grote snelheidsvermindering. Bij twee aansluitende bogen met dezelfde draaiingsrichting kan de onveiligheid aanzienlijk toenemen wanneer de stralen in een onevenwichtige verhouding tot elkaar worden gekozen, dat wil zeggen met een verschil van een factor twee of groter.

### *Bochtverbreding*

De achterwielen van een voertuig beschrijven bij het doorlopen van een boog een meer naar binnen gelegen baan dan de voorwielen. Bij krappe bogen (boogstraal 300 m of kleiner) is bochtverbreding noodzakelijk. Voor de vaststelling van de bochtverbreding is (afgezien van de werkelijke verkeerssamenstelling) de trekker met oplegger het maatgevende voertuig.

In Tabel 3.5 is de gewenste bochtverbreding per rijstrook afgerond op 5 cm aangegeven. De in de tabel genoemde waarden gelden voor booglengten van ten minste 10 m. Voor kortere booglengten kan de bochtverbreding naar evenredigheid worden verminderd.

De bochtverbreding wordt aangebracht aan de binnenzijde van elke rijstrook. De overgangsboog (zie paragraaf 3.4) wordt benut om deze verbreding geleidelijk te laten verlopen, zodat bij het begin van de cirkelboog de benodigde breedte volledig aanwezig is.

Horizontale boogstraal binnenbocht ( $R_{hor}$ in m)	Bochtverbreding per rijstrook (m, afgerond)
10	0,60
80	0,50
90	0,45
100	0,40
120	0,35
150	0,30
170	0,20
200	0,20
250	0,15
300	0,15

TABEL 3.5: BOCHTVERBREDING PER RIJSTROOK BIJ VERSCHILLENDE HORIZONTALE BOOGSTRALEN

### Clotoïde

Bij de overgangsboog spelen een aantal fysieke verschijnselen een rol. In de overgangsboog wordt het verschil in wegverkanting tussen de rechtstand en de boog (of tussen twee bogen met verschillende boogstraal) overbrugd. Deze verkantingsovergang stelt een aantal eisen aan de overgangsboog, vanwege het rijcomfort en de afwatering. Deze eisen worden aan het einde van deze subparagraaf beschreven.

Als overgangsboog wordt sinds de jaren zestig de clotoïde toegepast. Deze kromme is de baan die wordt doorlopen indien de snelheid van het voertuig en de snelheid van de stuurverdraaiing constant zijn, met als gevolg dat de zijdelingse versnelling  $a = v^2 / R$  lineair toeneemt.

De clotoïde is een centraal symmetrische dubbelspiraal die zich vanuit de oorsprong (het buigpunt, zie Figuur 3.3) indraait tot een asymptotisch punt. De meest kenmerkende eigenschap van de clotoïde is dat de ontwikkelde lengte vanaf de oorsprong tot elk willekeurig punt op de clotoïde omgekeerd evenredig is met de straalwaarde in dat punt (c.q. recht evenredig met de kromming). Deze eigenschap staat borg voor een vloeiende overgang van rechtstand naar boog. De clotoïde is vooral bij bogen met kleine stralen een effectieve oplossing. In de geometrie van het wegontwerp wordt een klein deel van deze kromme gebruikt.

De berekeningsformule van de clotoïde is:

$$A^2 = R L$$

VERGELIJKING 3.2

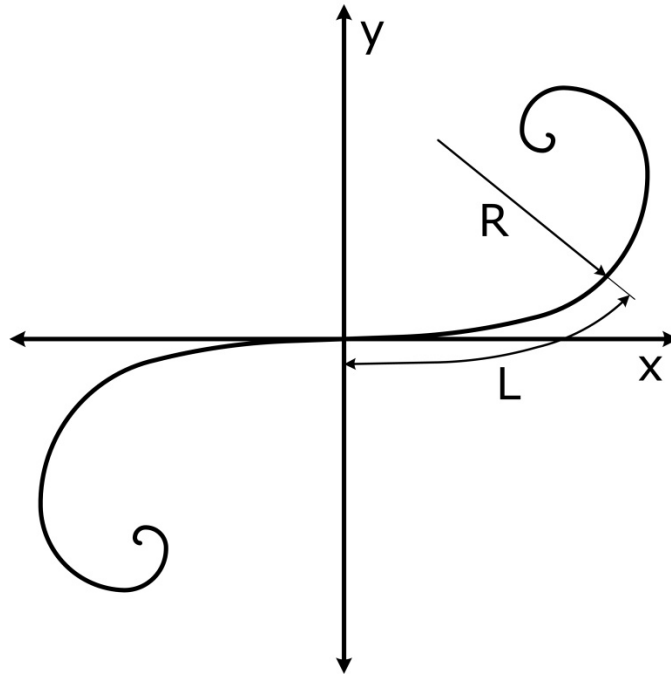
waarin:

- $A$  = parameter van de clotoïde [m]
- $R$  = boogstraal in een punt op de clotoïde [m]
- $L$  = ontwikkelde lengte langs de clotoïde vanaf de oorsprong tot dat zelfde punt [m]

Deze formule is gemakkelijk af te leiden. De dwarsversnelling van de auto in een bocht wordt gegeven door de formule  $q = v^2 / r$  met  $q$  de dwarsversnelling,  $v$  de snelheid en  $r$  de straal van de bocht. Zoals aangegeven is de clotoïde gebaseerd op het feit dat de dwarsversnelling  $q$  constant toeneemt over de lengte. Daarom wordt  $q$  gedefinieerd als een lineaire functie  $q = ax + b$  met randvoorwaarden  $q(0) = 0$  en  $q(L) = v^2 / R$ .  $R$  is hier de boogstraal van de te ontwerpen bocht.

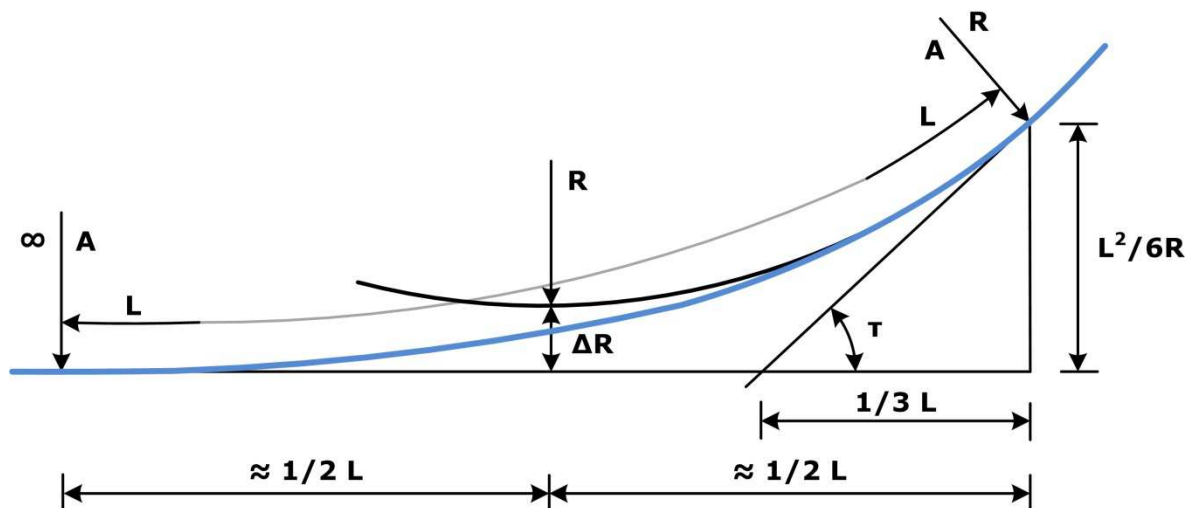
Invullen van de randvoorwaarden leidt tot  $a = v^2 / RL$  en  $b = 0$ , dus  $q = xv^2 / RL$ . Omdat deze factor  $a$  constant is en de snelheid  $v$  ook, moeten  $R$  en  $L$  dus ook constant zijn. Deze worden gedefinieerd als  $A^2$ , met  $A^2 = RL$ .

De vorm van de clotoïde en de parameters  $R$  en  $L$  zijn aangegeven in Figuur 3.3.



FIGUUR 3.3: CLOTOÏDE VOOR DE OVERGANGSBOOG

$$\tau = \frac{L}{2R} \quad A^2 = RL \quad \Delta R = \frac{L^2}{24R}$$



FIGUUR 3.4: PARAMETERS VAN DE CLOTOÏDE

De clotoïde met parameterwaarde 1 wordt de eenheidsclotoïde genoemd; alle clotoïden zijn gelijkvormig en kunnen daarom uit de eenheidsclotoïde worden afgeleid door vermenigvuldiging met parameter  $A$ .

Essentieel is dat tussen rechtstand en cirkel enige ruimte in dwarsrichting aanwezig moet zijn om de overgangsboog in te passen. De boog verschuift door de overgangsboog met  $\Delta R$ , de *shift* (zie

Figuur 3.4), haaks op de rechtstand. Als  $A$  en  $R$  gekozen zijn, ligt  $\Delta R$  vast. Omgekeerd, als  $R$  en  $\Delta R$  vastliggen, is er slechts één clotoïde (met een unieke  $A$ -waarde) die de ruimte tussen rechtstand en cirkel overbrugt. Als twee van de drie parameters bekend zijn, volgt daaruit de derde. De boog verschuift ook iets naar rechts, maar die waarde is verwaarloosbaar. Hieronder wordt de formule voor de berekening van de shift afgeleid.

De verticale afstand tussen het begin van de boog  $R$  en de rechtstand kan berekend worden met de paraboofomule:

$$y = \frac{x^2}{2R}$$

VERGELIJKING 3.3

Met  $y$  de verticale afstand, en  $x$  de horizontale afstand tussen het begin van de boog met straal  $R$  en de rechtstand. Te zien in Figuur 3.4 is dat  $x$  gelijk is aan  $1/3 L$ . Dit levert een  $y$  op van

$$y = \frac{\frac{1}{3}L^2}{2R} = \frac{L^2}{6R}$$

VERGELIJKING 3.4

Dit betekent dat  $\Delta R$  gelijk is aan deze verticale afstand plus de verticale afstand tussen het middelpunt van de boog  $R$  en het begin van de boog minus de straal  $R$  van de boog. Dit is af te leiden uit Figuur 3.4.

Dat leidt tot:

$$\Delta R = \frac{L^2}{6R} + R \cos\left(\frac{L}{2R}\right) - R$$

$$\Delta R = \frac{L^2}{6R} + R \left( \cos\left(\frac{L}{2R}\right) - 1 \right)$$

VERGELIJKING 3.5

Dit is op te lossen door gebruik te maken van de Taylorreeks voor  $\cos(x)$ :

$$\cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$$

Dit leidt tot

$$\cos\left(\frac{L}{2R}\right) = 1 - \frac{L^2}{8R^2} + \frac{L^4}{24 \cdot 16R^4} - \dots$$

Invullen in 3.4 geeft

$$\Delta R = \frac{L^2}{6R} + R \left( 1 - \frac{L^2}{8R^2} + \frac{L^4}{24 \cdot 16R^4} - \dots - 1 \right)$$

$$\Delta R = \frac{L^2}{6R} - \frac{L^2}{8R} + \frac{L^4}{384R^3} - \dots$$

De laatste factor is niet significant, dus die kan weggelaten worden. Uit de eerste twee factoren volgt dan:

$$\Delta R \approx \frac{L^2}{24R}$$

VERGELIJKING 3.6

De parameter  $A$  van de clotoïde moet zoveel mogelijk aan vijf eisen voldoen:

1. de **optische eis**:  $A$  wordt in beginsel zo klein mogelijk gekozen. Dit leidt tot de volgende grenswaarden:
  - de clotoïde moet de richtingsverandering duidelijk inleiden; hiervoor is een minimale hoekverdraaiing nodig. Dit wordt bereikt met  $A \geq R/3$ ;
  - waar zicht op de boog nodig is in verband met snelheidsaanpassing, moet een deel van de cirkelboog binnen het functionele gezichtsveld liggen, dat wil zeggen  $A \leq R$ .



2. de **comforteis**: de toename van de zijdelingse versnelling (de zogenaamde *ruk* [ $\text{m/s}^3$ ]) moet binnen bepaalde grenzen blijven. De minimale parameter  $A$  is dan:
 

$v_o$	= 120 km/h:	$A$	= 270 m en	$c$	= $0.5 \text{ m/s}^3$ ;
$v_o$	= 100 km/h:	$A$	= 205 m en	$c$	= $0.5 \text{ m/s}^3$ ;
$v_o$	= 80 km/h:	$A$	= 115 m en	$c$	= $0.8 \text{ m/s}^3$ ;
$v_o$	= 50 km/h:	$A$	= 60 m en	$c$	= $0.8 \text{ m/s}^3$ ;
3. de **esthetische eis**: er moet een vloeiende vormgeving ontstaan die niet misleidend of hinderlijk is, bijvoorbeeld een storende bobbel of zak in het wegbeeld als gevolg van een verkantingsovergang.
4. de **dynamische evenwichtseis**: de toelaatbare zijdelingse wrijving mag nergens worden overschreden. Deze eis levert geen problemen op als in elk punt van de verkantingsovergang wordt voldaan aan de comforteis.
5. de **lengte-eis**: de lengte van de clotoïde moet zodanig zijn dat een eventuele verkantingsovergang binnen de clotoïde kan plaatsvinden. Streefminima voor de clotoïdelengte zijn daarom af te leiden uit de lengte van een eventueel bijbehorende verkantingsovergang.

De consequenties van de optische en comforteis zijn in Figuur 3.5 aangegeven.

Bij kleine hoekverdraaiingen tussen twee rechtstanden in de weg is de toepassing van overgangsbogen vaak niet mogelijk, omdat de overgangsboog dan de gehele hoekverdraaiing gebruikt. Dan is het van belang een ruime boog toe te passen.

Omdat de kromming  $1/R$  evenredig is met de lengte  $L$  (immers,  $RL = A^2$ ), neemt de verdraaiingshoek  $\tau$  kwadratisch toe met de ontwikkelde lengte vanaf de oorsprong.

$$\tau = \frac{L^2}{2A^2} = \frac{L}{2R}$$

VERGELIJKING 3.7

waarin:  $\tau$  = hoekverdraaiing [rad] (zie Figuur 3.4);  
 $L$  = lengte van de clotoïde [m];  
 $R$  = eindstraal van de clotoïde [m] = straal aansluitende boog.

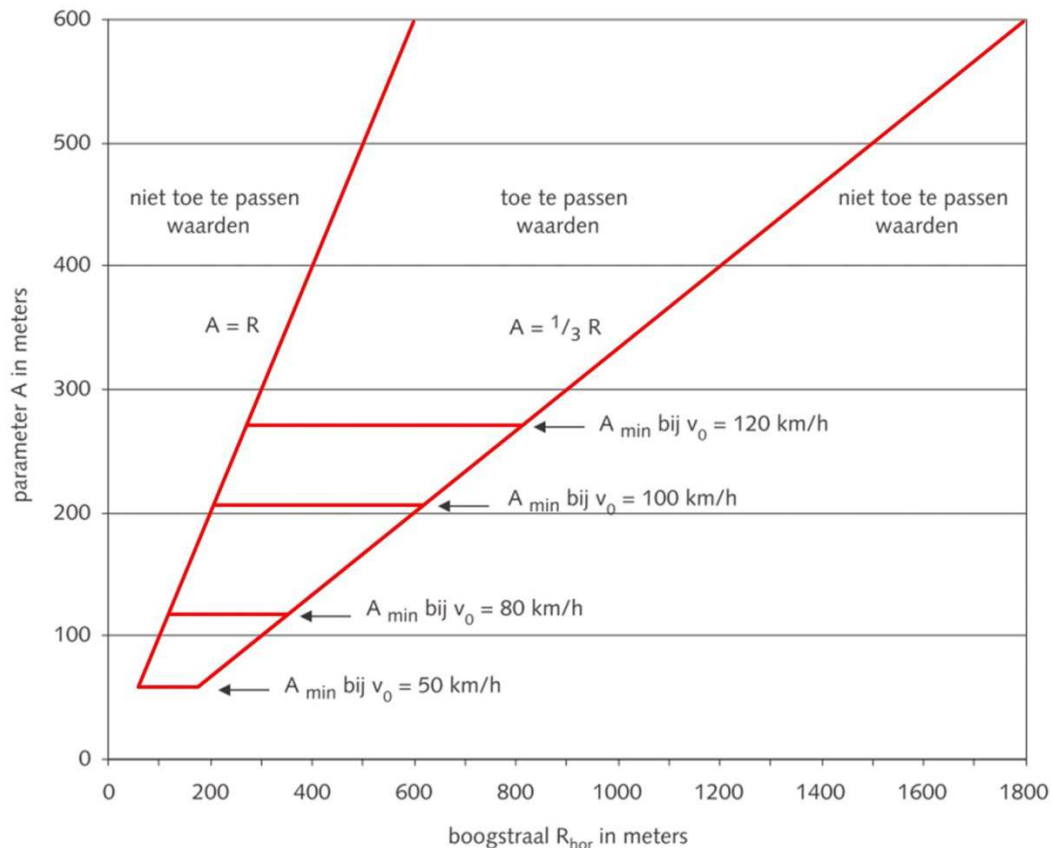
Twee wegen die een hoek van  $45^\circ$  met elkaar maken, moeten worden verbonden met een bocht met een boogstraal  $R = 250$  m en overgangsbogen tussen bocht en rechtstanden met een lengte  $L = 80$  m. Zonder overgangsbogen zou de lengte van de bocht  $45/360 \times 2\pi R = 1/8 \times 2\pi \times 250 = 196$  m bedragen.  $\tau_{\text{overgangsboog}} = L/2R = 80/(2 \times 250) = 0,16$  rad =  $9,2^\circ$ . Voor de bocht resteert  $45 - 2 \times 9,2 = 26,6^\circ$ . De lengte van de bocht inclusief overgangsbogen bedraagt  $26,6/360 \times 2\pi \times 250 + 2 \times 80 = 276$  m. Door de overgangsbogen is de bocht dus 80 m langer: tweemaal de lengte van een halve overgangsboog.

VOORBEELD 3.2

Een bocht met een boogstraal van 200 m moet een hoekverschil van  $18^\circ = 0,31$  rad overbruggen bij een ontwerpsnelheid van 50 km/h. Bij de maximale waarde van de clotoïdeparameter  $A = 200$  wordt  $L = 200^2/200 = 200$  m.  $\tau = 200/2 \times 200 = 0,5$  rad, dus de hoekverdraaiing van elk van de aangrenzende clotoïdes is al groter dan voor de hoekverdraaiing nodig is.

De minimale parameter-waarde is  $A = 200/3 = 67$  m. Uit  $A = 67$  volgt  $L = 22,5$  m, dus  $\tau = 0,056$ . Voor de boog blijft dan  $0,31 - 2 \times 0,056 = 0,20$  over; de resterende booglengte is  $200 \times 0,20 = 40$  m  $\approx 2,9$  rijseconde bij 50 km/h, iets minder dan de gewenste 3 rijseconden.

VOORBEELD 3.3



FIGUUR 3.5: RELATIE A-WAARDE MET BOOGSTRAAL

### Verkantingsovergang

In de regel is een verandering van de dwarshelling gewenst bij de overgang van:

- een rechtstand naar een cirkelboog;
- een cirkelboog naar een opvolgende cirkelboog met een andere straal;
- een cirkelboog naar een opvolgende cirkelboog met een andere richting.

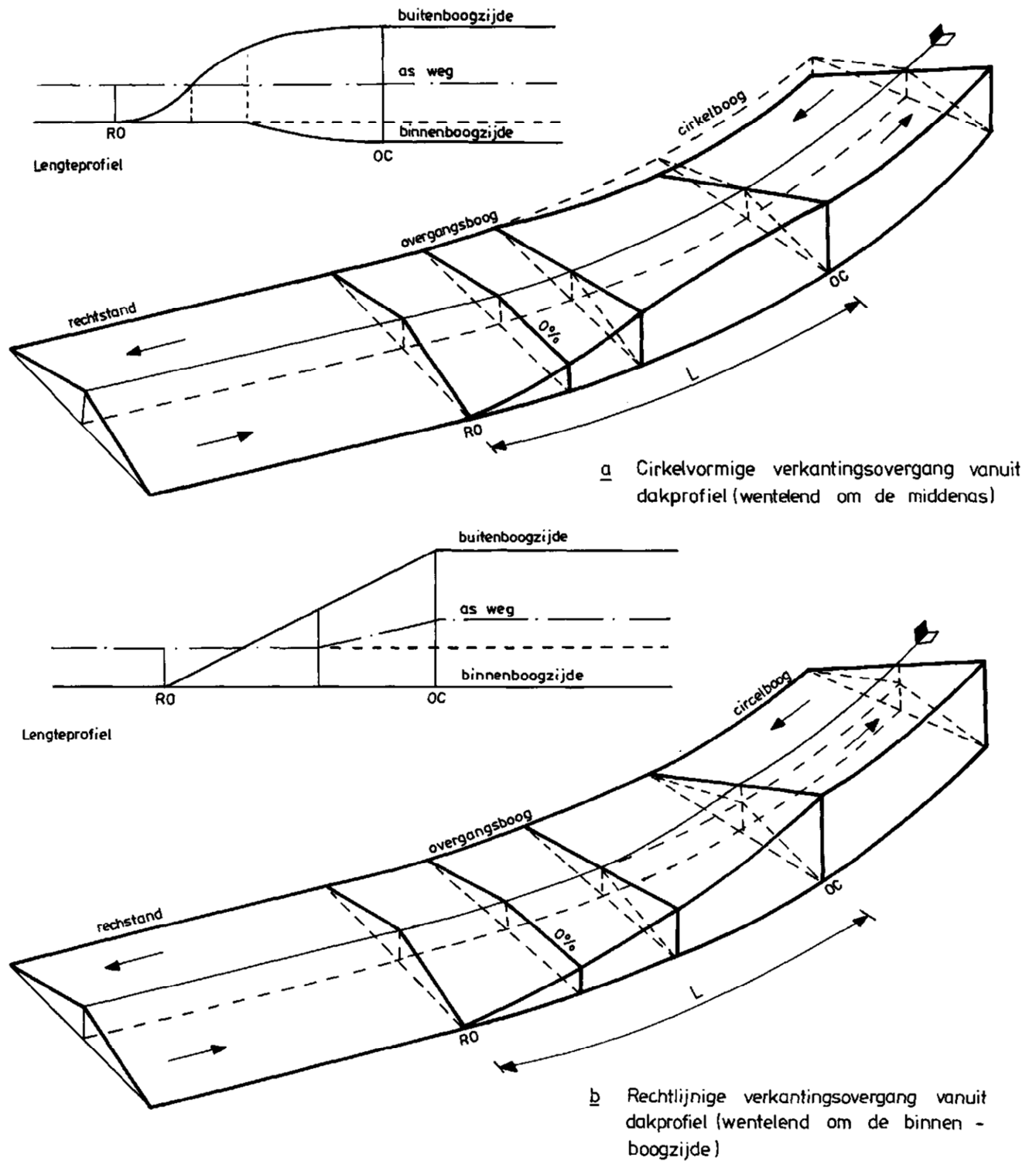
De verandering van dwarshelling vindt in het algemeen plaats in de overgangsboog, die de verbinding vormt tussen de genoemde ontwerpelementen. Indien er geen overgangsboog is, moet de verandering van dwarshelling bij een overgang rechtstand – cirkel plaatsvinden in de rechtstand en bij een overgang cirkel – cirkel in de cirkel met de grootste straal, zodat de bij een bepaalde boogstraal gewenste dwarshelling steeds volledig aanwezig is.

De verandering van de dwarshelling gebeurt door draaiing van het dwarsprofiel van de rijbaan om een lijn in langsrichting en wordt de verkantingsovergang genoemd. Eerst wordt de dwarshelling van de ene rijstrook vergroot tot de dwarshelling van de andere rijstrook en vervolgens wordt de nu ontstane dwarshelling vergroot tot de benodigde verkanting van de boog is bereikt (zie Figuur 3.6).

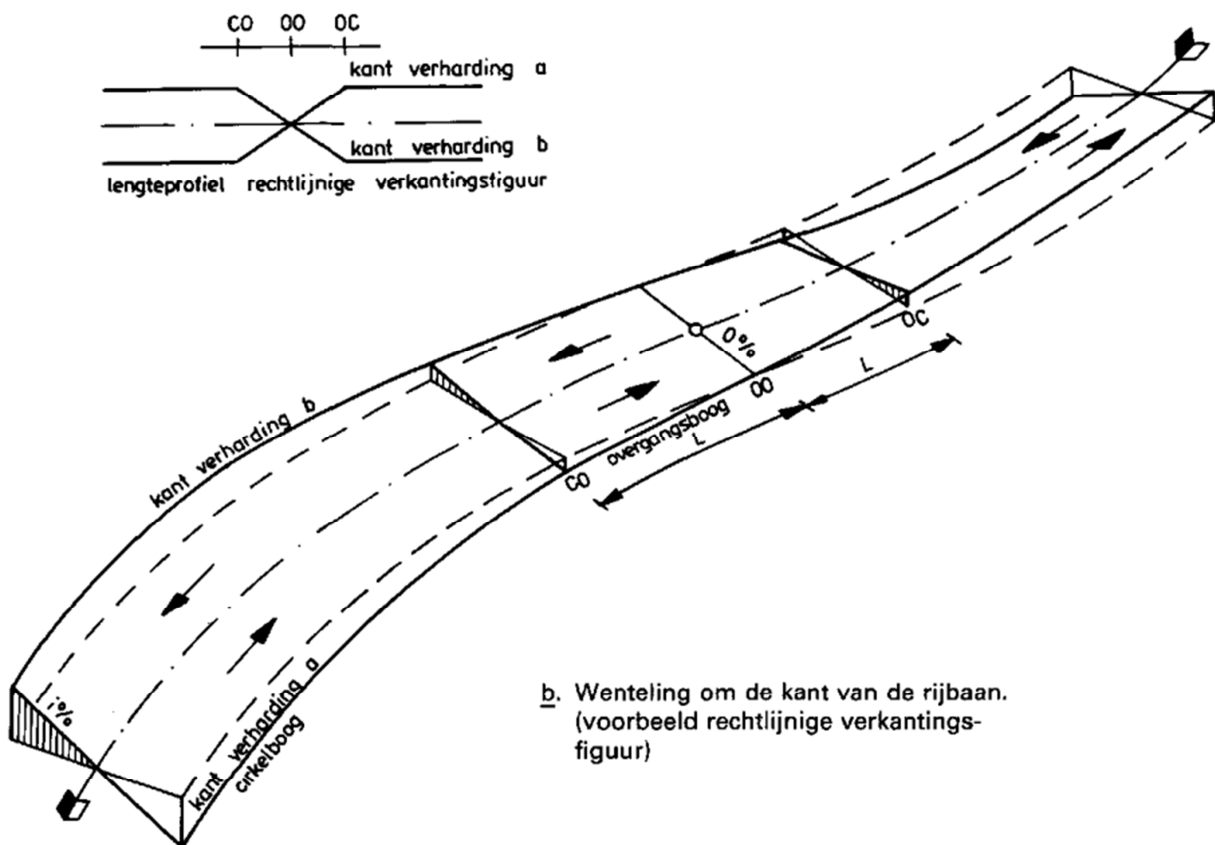
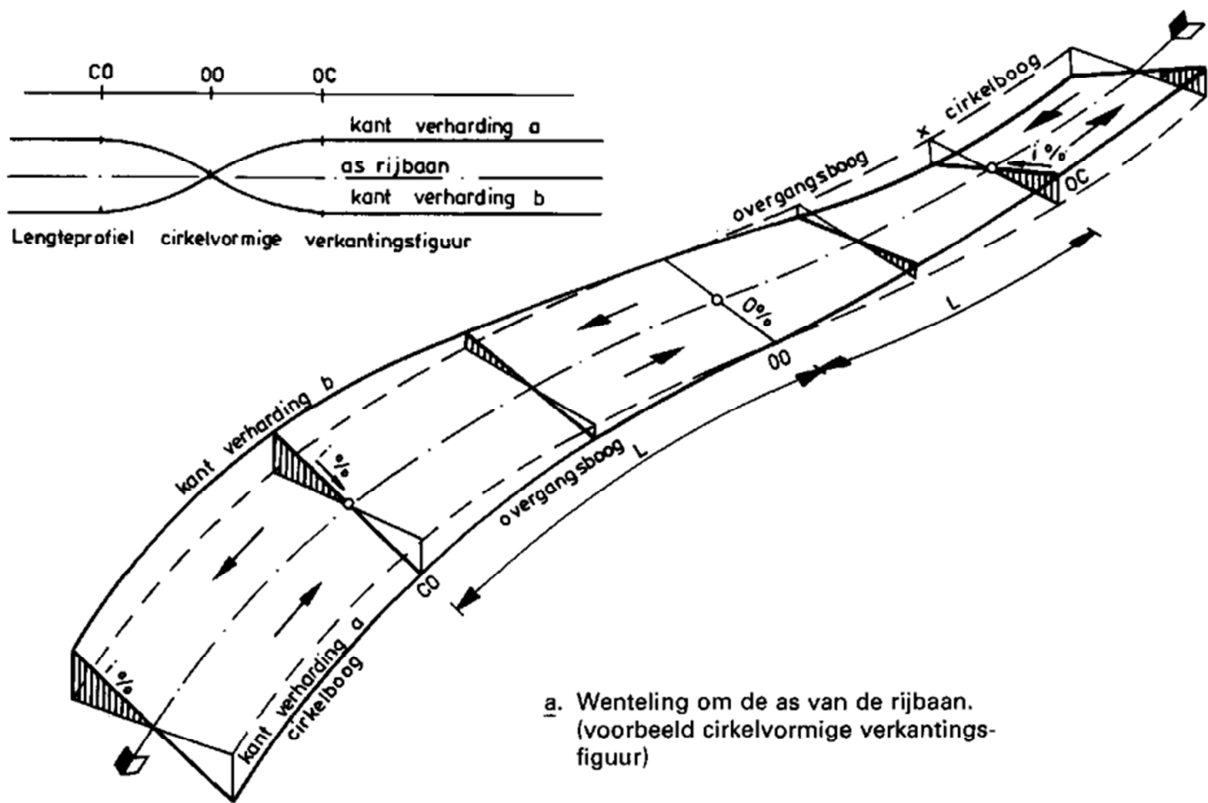
Bij de overgang van een rechtstand naar een cirkelboog verdient het aanbeveling de wenteling van de verkanting te laten gebeuren door draaiing van het dwarsprofiel om de kantstreep of om de kant van de verharding aan de binnenboogzijde.

Deze methode levert vooral in rechtse bogen optisch gezien een duidelijk beeld op van de cirkelboog, die na de overgangsboog op de rechtstand volgt. Ook in verband met de hoogte van de grondwaterstand, de drainage van het weglichaam en de afwatering van het wegdek is een dergelijke uitvoering gewenst.

Bij de S-vormige overgang tussen twee tegengesteld gerichte bogen wordt de verkanting van de rijbaan gewenteld en geheel van richting veranderd. Deze S-vormige overgang wordt in de horizontale as over het algemeen gevormd door twee clotoides. Gezien de vaak beperkte lengte



FIGUUR 3.6: UITVOERINGSVORMEN VAN VERKANTINGSOVERGANGEN [HANDBOEK WEGONTWERP, 2013]



FIGUUR 3.7: WENTELENDE VERKANTINGSOVERGANG [HANDBOEK WEGONTWERP, 2013]

van de twee clotoïdes ten behoeve van het verloop van de verkantingsovergang in de rijbaankanten heeft de wenteling om de middenas van de rijbaan hier de voorkeur. De totale lengte van de twee clotoïdes is dan beschikbaar voor een vloeiende overgang waarbij in het punt waar de twee clotoïdes aan elkaar sluiten de dwarshelling nul is (zie Figuur 3.7).

Voor het verloop van de kant van de rijbaan bij het aanbrengen van de verkanting zijn verschillende vormen mogelijk:

- een cirkelvormig verloop, door middel van twee tegengestelde cirkelbogen. Hierbij is er geen lineair verband tussen de toe- of afname van de kromtestraal van de clotoïde en de toe- of afname van de verkanting. Er zal dus moeten worden gecontroleerd of in elk punt van de verkantingsovergang aan de eis van dynamisch evenwicht voldaan wordt (zie de figuren 3.6a en 3.7a);
- een rechtlijnig verloop. Bij deze methode is er een lineair verloop van de verandering van de dwarshelling. Aangezien in de overgangsboog de toe- of afname van de kromtestraal ook lineair verloopt, is er steeds een rechtlijnig verband tussen de straal in het horizontale alignement en de verkanting in een bepaald punt van de verkantingsovergang (zie de figuren 3.6b en 3.7b).

Bij stralen  $R_h > 300$  m verdient uit esthetische overwegingen een vloeiend cirkelvormig verloop de voorkeur. Bij een verkantingsovergang moet de verhouding tussen de onder- en de bovenstraal zo worden gekozen dat de beide cirkeldelen aan elkaar aansluiten, ter plaatse waar de dwarshelling nul is.

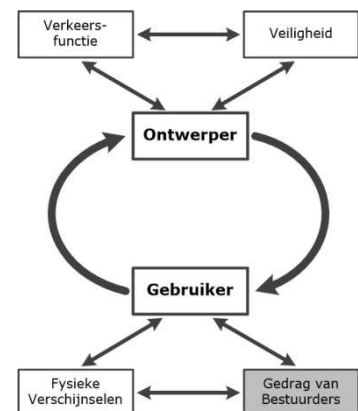
Bij de vormgeving van het verloop van de kant van de rijbaan ten gevolge van de verkantingsovergang moet rekening worden gehouden met de eisen voor het rijcomfort en met de afwatering van de weg.

### 3.2.4 Gedrag van bestuurders

Bij lange rechtstanden in een weg gaan bestuurders vaak harder rijden dan op een weg met een bochtig alignement. Er moet naar worden gestreefd om rechtstanden in gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen niet langer dan circa 500 m te ontwerpen om het rijden met hoge snelheden op dit soort wegen te ontmoedigen.

Bestuurders gedragen zich anders op bochtige wegen dan op rechte wegen. Bochtige wegen zorgen voor een meer afwisselend wegbeeld, waardoor de bestuurders alerter blijven. De zichtafstanden zijn kleiner, waardoor sneller op onverwachte omstandigheden moet worden geanticipeerd. Daarom wordt er op bochtige wegen rustiger gereden dan op rechte weggedeeltes. Voor een rustig rijgedrag is het wenselijk dat de rijtijd in een boog minimaal 3 seconden bedraagt.

De overgangsboog zorgt voor een geleidelijke overgang tussen een rechtstand en een boog of tussen twee boogstralen. Hierdoor hoeft de bestuurder geen abrupte stuurbewegingen te maken en kan de boog met een groter comfort worden ingestuurd.



## 3.3 Horizontaal alignement: zichtafstand in de boog

Bij de bespreking van de hoofdprincipes van het wegontwerp zijn het wegverloopzicht, stopzicht, uitwijkzicht en inhaalzicht behandeld. Uiteraard deze zichtafstand van belang bij het ontwerpen van de horizontale boog.

Bij een boog kan er sprake zijn van objecten die in de binnenbocht staan. Deze objecten mogen natuurlijk niet in de weg staan, waardoor de zichtafstand die maatgevend is niet beschikbaar is. Daarom is het nodig om op basis van de maatgevende zichtafstand die bepaald is voor die situatie en de afstand tussen de weg en het dichtstbijzijnde object de minimale boogstraal uit te rekenen.

Deze boogstraal  $R$  kan met de stelling van Pythagoras worden afgeleid. Grafisch is dit weergegeven in Figuur 3.8. Er wordt vanuit gegaan dat het oog van de bestuurder zich op 2 meter uit de kantstreep van de binnenboog bevindt. De zichtlijn  $z$  is de afstand die de bestuurder van de auto om de bocht kan kijken. Deze afstand wordt beperkt door zichtbeperkende elementen. Deze

elementen staan op een haakse afstand  $a$  uit de kantstreep van de binnenboog. Met behulp van de rechthoekige driehoek die in de figuur is weergegeven kan  $R$  berekend worden:

$$R^2 = \left(\frac{z}{2}\right)^2 + (R - (a+2))^2$$

⇓

$$R^2 = \frac{z^2}{4} + R^2 - 2R(a+2) + (a+2)^2$$

⇓

$$2R(a+2) = \frac{z^2}{4} + (a+2)^2$$

⇓

$$R = \frac{z^2}{8(a+2)} + \frac{a+2}{2}$$

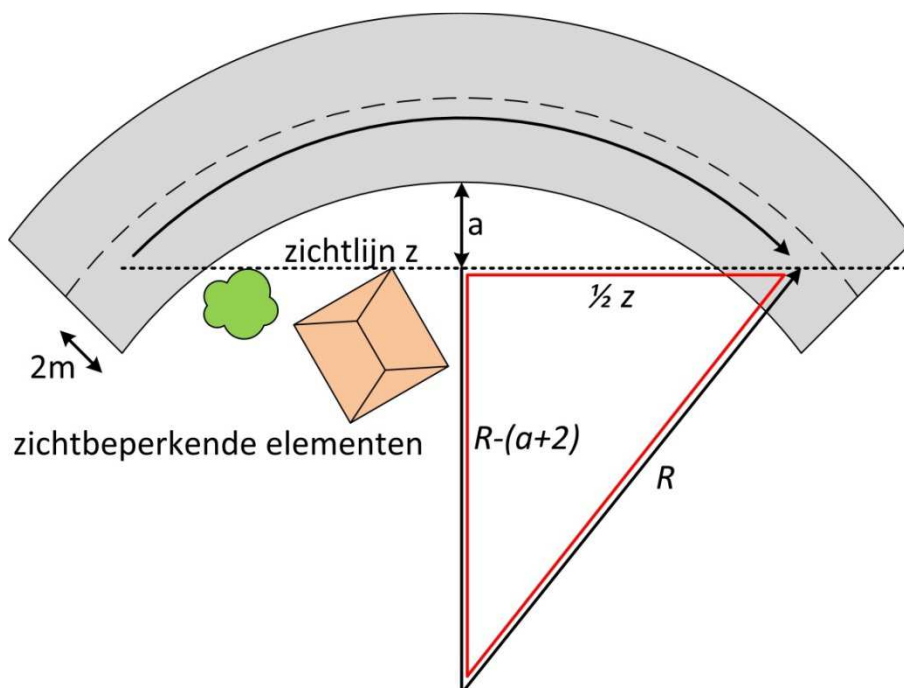
Deze berekende  $R$  bestaat uit twee elementen. Het tweede element,  $(a+2)/2$ , is niet significant in vergelijking met het eerste element omdat  $a$  klein is, en is daarom verwaarloosbaar. Dus de  $R$  wordt als volgt gedefinieerd:

$$R_h = \frac{z^2}{8(a+2)}$$

VERGELIJKING 3.8

waarin:  $R_h$ : boogstraal [m];  
 $z$ : maatgevende zichtafstand [m];  
 $a$ : afstand zichtbeperkend object uit kantstreep binnenboog [m].

Omgekeerd kan deze formule gebruikt worden om bij een al vastgestelde straal, de afstand uit de rijbaan van bijvoorbeeld een aan te brengen geluidsscherm te bepalen.



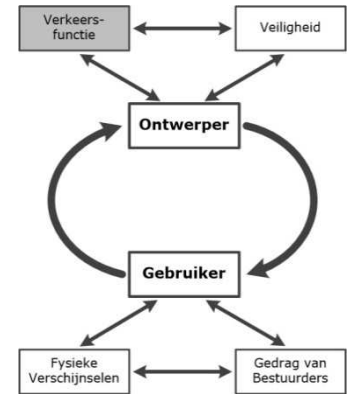
FIGUUR 3.8: ZICHT IN BOOG

### 3.4 Verticaal alignement: langshelling en afrondingsbogen

#### 3.4.1 Verkeersfunctie

Het verticale alignement geeft het verloop van de weg in de hoogteligging weer. Meestal wordt het verticale alignement gekoppeld aan de horizontale as; wanneer ook het terrein in langsrichting doorsneden wordt over deze as, wordt een goed beeld verkregen van de relatie tussen de hoogteligging van het terrein en de weg.

Waar mogelijk dienen belangrijke hoogteverschillen in het maaiveld door de weg te worden gevolgd. Zodoende ontstaat een voldoende afwisselend wegbeeld. Door de verticale ingrepen ten opzichte van het maaiveld zo klein mogelijk te houden, zal ook worden bespaard op het grondverzet. In het grootste deel van Nederland zijn deze hoogteverschillen in het maaiveld echter beperkt. In Nederland zijn bruggen, viaducten en tunnels vaak de meest opvallende elementen in het verticaal alignement.

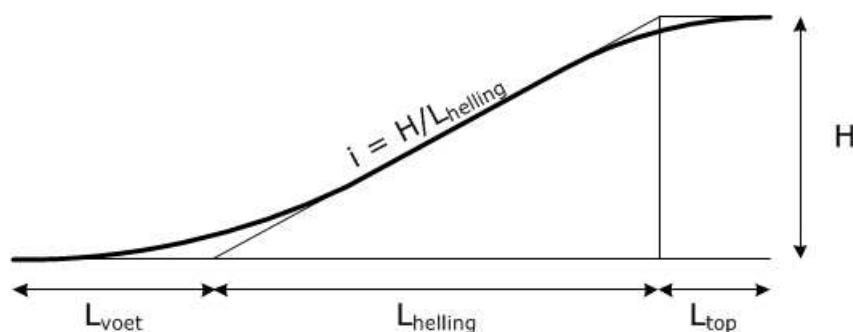


De wegen op bruggen, viaducten en in tunnels kunnen via een aardenbaan met het maaiveldniveau worden verbonden. Dit is een relatief goedkope oplossing, maar beslaat meer ruimte dan bijvoorbeeld een betonnen constructie. Op plaatsen met een gebrek aan ruimte kan dus (ondanks de veel hogere bouwkosten) toch worden gekozen voor een betonnen kunstwerk. Bij zeer hoge kunstwerken zijn enorme hoeveelheden zand nodig voor een aardenbaan, waardoor een betonnen constructie toch goedkoper kan zijn.

Een ander aspect bij het ontwerpen is rekening houden met de grondwaterstand. Hierbij moet de afstand tussen het laagste punt van de verharding en het grondwater minimaal 0,70 m, maar bij voorkeur 1,00 m bedragen, in verband met een goede ontwatering van de aardebaan en ter voorkoming van vorstschade aan de verharding. Als niet aan deze verticale afstandseis kan worden voldaan, moeten (dure) bakconstructies of kunstmatige polders (permanente bemalingskosten) worden toegepast.

Uit oogpunt van economie is een horizontale ligging te prefereren (geen energieverliezen bij voertuigen, minder schadelijke uitstoot, gelijkmatigere geluidsbelasting). Het hellingpercentage en de hellinglengte, evenals de grootte van de verticale boogstralen dienen aan bepaalde eisen te voldoen. Hierbij spelen de keuze van de ontwerpsnelheid en overwegingen ten aanzien van verkeersafwikkeling en -veiligheid een rol.

De twee bepalende karakteristieken van de langshelling zijn het hellingpercentage  $i$  in procenten en de hellinglengte  $l$ . Het hellingpercentage wordt ten opzichte van het horizontale vlak weergegeven. Onder de hellinglengte wordt verstaan: de horizontale afstand tussen de snijpunten van de raaklijnen aan de onder- en bovenafrondingen (zie Figuur 3.9). Het maximaal toelaatbare hellingpercentage wordt in eerste instantie bepaald door de ontwerpsnelheid. De grenswaarden die daaruit voortvloeien zijn vermeld in Tabel 3.6.



FIGUUR 3.9: HELLINGLENGTE EN HELLINGPERCENTAGE

V <sub>ontw</sub> [km/h]	NOA-hoofd-rijbanen	NOA voor grote kunstwerken	Handboek Wegontwerp
120	3	5	
100			4-5
80	4	6	5-6
50		7	7

TABEL 3.6: MAXIMALE HELLINGPERCENTAGES BIJ VERSCHILLENDE ONTWERPSNELHEDEN

In knooppunten en aansluitingen zijn lage hellingpercentages gewenst. Vlakke of flauw hellende weefvakken leiden tot een homogenere snelheid, waarbij capaciteit en veiligheid zijn gebaat. Invoegingen op stijgende weggedeelten zijn om dezelfde redenen minder gewenst.

Een lange opgaande helling kan een capaciteitsvermindering van de weg tot gevolg hebben. Dit is niet alleen afhankelijk van de hellinglengte en het stijgingspercentage, maar ook van het aandeel vrachtverkeer en het afwikkelingsniveau. Een extra rijstrook aan de linkerzijde (inhaalstrook) kan dan uitkomst bieden. Als de snelheidsreductie van (zware) vrachtauto's méér dan 20 km/h bedraagt, is het uit veiligheidsoverwegingen gewenst een extra rijstrook aan de rechterzijde (kruipstrook) aan te brengen.

Onderzoek heeft aangetoond dat wat betreft de verkeersafwikkeling het toepassen van een inhaalstrook aanzienlijk meer rendement oplevert dan een kruipstrook. De kruipstrook blijkt door een relatief gering aantal vrachtauto's te worden benut. Bovendien kan het min of meer onverwachte invoegen van het vrachtverkeer aan het einde van de kruipstrook tot verkeersonveilige situaties leiden. Om deze redenen verdient de aanleg van een inhaalstrook de voorkeur.

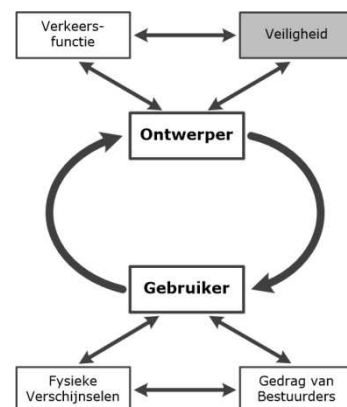
In Nederland komen dit soort hellingen echter niet veel voor. In Zuid-Limburg en op de Veluwe zijn enige hoogteverschillen in het maaiveld, maar de lengtes van de hellingen zijn daar vaak beperkt.

Voor de afronding van verschillen in langshelling wordt de cirkelboog gebruikt. Holle en bolle cirkelbogen (of voet- en topbogen) kunnen direct op elkaar worden aangesloten of verbonden door een rechtstand. Deze rechtstand wordt alleen toegepast bij lange hellingen. Korte hellingen tussen de afrondingsbogen kunnen beter worden vermeden om het wegbeeld voldoende vloeiend te laten verlopen. Een vloeiend wegbeeld en goede zichtlengten vragen vooral in het hogere snelheidsgebied om royale bogen, die dikwijls aanzienlijke gevolgen hebben voor het grondverzet.

### 3.4.2 Veiligheid

Bij een helling spelen enkele specifieke veiligheidsaspecten een rol. Een helling verandert namelijk de lengte van de remweg. Bij een neergaande helling is de remweg langer dan bij een opgaande helling. Dit veroorzaakt een verandering in stopzichtafstand als functie van het hellingpercentage en is terug te zien in de formule voor het stopzicht in paragraaf 2.3.2. In de volgende paragraaf is aangegeven hoe de minimale boogstralen voor de afrondingsboog wordt bepaald, zodat aan de minimale zichtafstanden wordt voldaan.

Een ander veiligheidsaspect is de snelheidsterugval van vooral vrachtverkeer op lange hellingen. Bij wat grotere hoogteverschillen (meer dan 10 à 20 m) kan het hellingpercentage afgestemd worden op de hellinglengte. Uit oogpunt van verkeersveiligheid en capaciteit zullen de snelheidsverschillen tussen vracht- en personenauto's niet te groot mogen worden. De snelheidsreductie van vrachtauto's op hellingen in auto(snel)wegen mag de 20 km/h niet overschrijden (30 km/h voor regionale gebiedsontsluitingswegen).





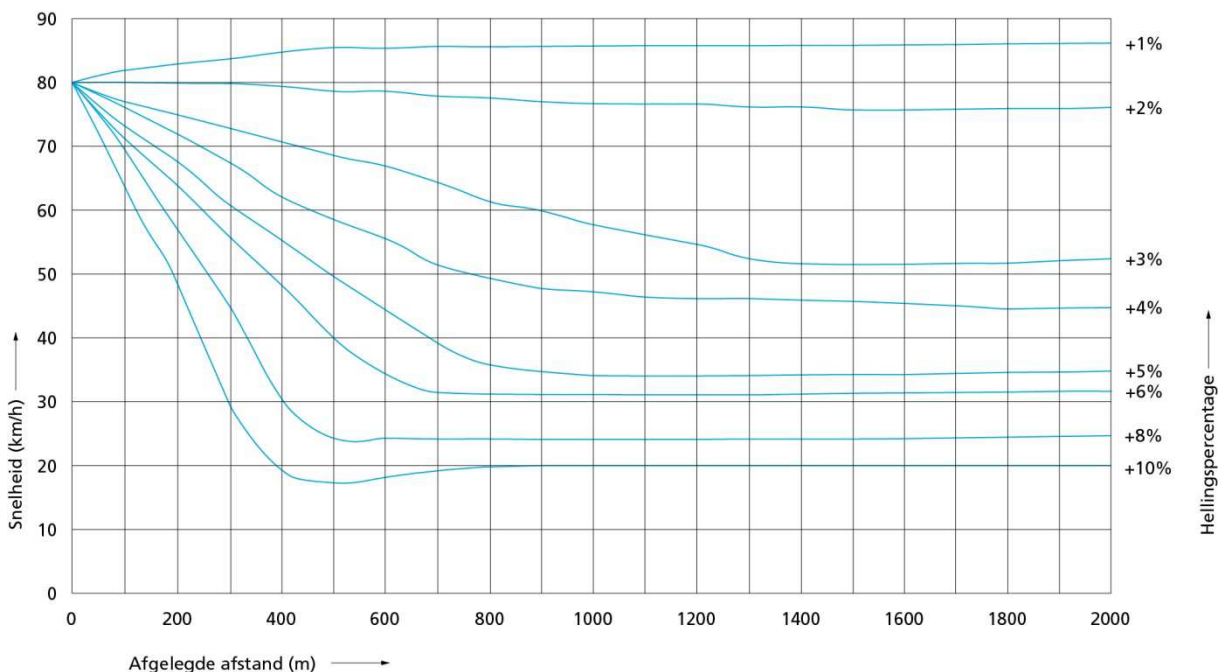
De klimkarakteristieken voor vrachtverkeer zijn weergegeven in Figuur 3.10. De invloed van aanvangssnelheid en hellingpercentage is duidelijk. Opvallend is de lange afstand die kan worden afgelegd voordat de uiteindelijke constante klimsnelheid is bereikt, uitgaande van een beginsnelheid ( $V_0$ ) van 80 [km/h].

helling  $p = 4\%$ ,  $l = 600$  m,  $V_{begin} = 80$  km/h  
 $V_{eind}$  volgt uit de grafiek: ca. 56 km/h

VOORBEELD 3.4: BEREKENING SNELHEIDSTERUGVAL BIJ HELLING

helling  $p = 3\%$ ,  $V_{begin} = 80$  km/h,  $V_{eind} = 60$  km/h  
 Afgelegde afstand volgt uit grafiek: ca. 900 m

VOORBEELD 3.5: BEREKENING ACCELERATIELENGTE

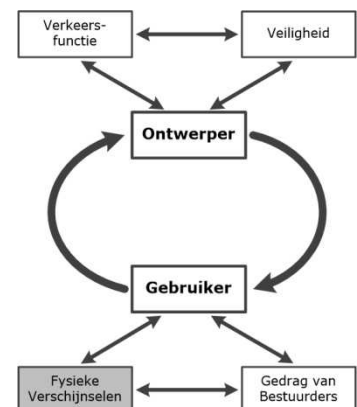


FIGUUR 3.10: AFNAME VAN DE SNELHEID VAN VRACHTAUTO'S VAN EEN LAGE VERHOUDING VAN 5,1 KW/TON BIJ VERSCHILLENDE STIJGINGSPERCENTAGES EN EEN BEGINSNELHEID VAN 80 KM/H. [HANDBOEK WEGONTWERP, 2013]

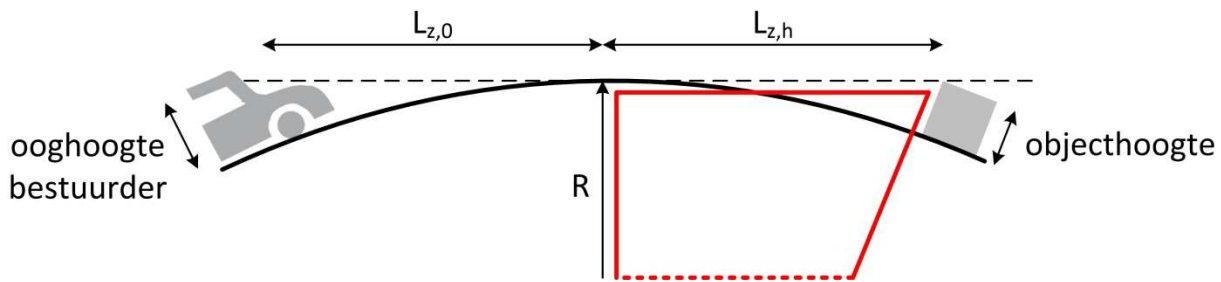
### 3.4.3 Fysieke verschijnselen

Een belangrijk veiligheidsaspect bij bolle bogen is de minimale zichtafstand. Deze zichtafstand wordt bepaald door de boogstraal van de bolle boog. Voor het dimensioneren van bolle bogen in autosnelwegen (of verbindingswegen in knooppunten en toe- en afritten in aansluitingen) moeten drie criteria voor de zichtlengte getoetst worden: het wegverloopzicht, het stopzicht en het uitwijkzicht. Elke zichtsoort is gekoppeld aan de hoogte van een object dat achter de bolle boog ligt, juist boven de "kijkraaklijn" (zie Figuur 3.11).

Bij wegen met gescheiden rijbanen geldt het inhaalzichtcriterium vanzelfsprekend niet. De andere zichtafstanden echter moeten wel meegenomen worden in deze berekening. Er blijkt dat voor verschillende ontwerpsnelheden verschillende zichtlengtes



maatgevend zijn.



FIGUUR 3.11: ZICHTPRINCIPE BIJ DIMENSIONERING VAN BOLLE BOGEN

De minimale boogstraal van de bolle boog kan, net als de horizontale boogstraal, afgeleid worden met behulp van de stelling van Pythagoras en Figuur 3.11.

De straal R moet uitgedrukt worden in de ooghoogte van de bestuurder, de objecthoogte en de zichtlengte. Eerst wordt de zichtlengte verdeeld in tweeën zoals aangegeven in Figuur 3.11:

$$L_z = L_{z,0} + L_{z,h} \tag{VERGELIJKING 3.9}$$

Er ontstaan zo twee rechtzijdige driehoeken. Een daarvan is deels aangegeven in de figuur. Uit deze driehoeken volgt:

$$L_{z,0} = \sqrt{(R + h_0)^2 - R^2} \quad \text{EN} \quad L_{z,h} = \sqrt{(R + h_h)^2 - R^2} \tag{VERGELIJKING 3.10}$$

3.8 invullen in 3.7 leidt tot:

$$\begin{aligned} L_z &= \sqrt{(R + h_0)^2 - R^2} + \sqrt{(R + h_h)^2 - R^2} \\ &\Downarrow \\ L_z^2 &= (R + h_0)^2 - R^2 + (R + h_h)^2 - R^2 + 2\sqrt{(R + h_0)^2 - R^2} \sqrt{(R + h_h)^2 - R^2} \\ &\Downarrow \\ L_z^2 &= 2Rh_0 + 2Rh_h + h_0^2 + h_h^2 + 2\sqrt{2Rh_0 + h_0^2} \sqrt{2Rh_h + h_h^2} \end{aligned}$$

Omdat  $h_0$  en  $h_h$  klein zijn, zijn  $h_0^2$  en  $h_h^2$  verwaarloosbaar en vallen ze uit de vergelijking:

$$\begin{aligned} L_z^2 &= 2Rh_0 + 2Rh_h + 2\sqrt{2Rh_0} \sqrt{2Rh_h} \\ &\Downarrow \\ L_z^2 &= 2R(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_h})^2 \end{aligned}$$

Herschrijven leidt tot:

$$R_{vmin} = \frac{L_z^2}{2(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_h})^2} \tag{VERGELIJKING 3.11}$$

- waarin  $R_{vmin}$  = minimale verticale boogstraal [m]
- $L_z$  = zichtafstand [m]
- $h_0$  = ooghoogte van de bestuurder [m]
- $h_h$  = bij zichtafstand behorende objecthoogte [m]

De formule is toepasbaar als de zichtlengte kleiner is dan de booglengte.

Bij elke ontwerpsnelheid worden, door de toetsing aan de van toepassing zijnde zichtlengtecriteria, drie of vier boogstralen gevonden waarvan de grootste de maatgevende minimale straal is. Voor autosnelwegen leidt invulling van de bovenvermelde parameters in de formule tot straalwaarden zoals vermeld in Tabel 3.7. Voor de tussengelegen snelheden geldt hetzelfde berekeningsprincipe. Merk de omslag op tussen uitwijkzicht en wegverloopzicht als maatgevende waarde tussen 50 en 80 km/h.

Type zichtafstand	120 km/h	100 km/h	80 km/h	50 km/h
<b>Wegverloopzicht [m]</b>	12.400	8.300	5.000	900
<b>Stopzicht [m]</b>	11.000	4.700	1.800	300
<b>Uitwijkzicht [m]</b>	12.300	8.100	4.700	1.100
<b>Inhaalzicht [m]</b>	-	56.000	34.000	14.000

TABEL 3.7: ONDERGRENZEN BOOGSTRALEN VAN BOLLE BOGEN BIJ VERSCHILLENDE ZICHTSITUATIES EN ONTWERPSNELHEDEN

Merk op dat het willen bieden van inhaalzicht resulteert in beduidend ruimere boogstralen dan benodigd zou zijn vanuit de andere zichtcriteria. Voor een 'klassieke' enkelbaans-autoweg ( $V_{ontw} = 100$  km/h, één rijbaan, inhalen toegestaan) zou dit resulteren in een verticale boogstraal van 56.000 m. Dergelijke grote stralen worden alleen toegepast waar dit gezien de topografische gesteldheid van pas komt. In andere gevallen zal men niet ontkomen aan een inhaalverbod (kostenbesparing op grondverzet) of aan scheiding van rijrichtingen – en dat is ook de voorkeursoplossing uit oogpunt van verkeersveiligheid. Men dient er tevens op bedacht te zijn dat een eventueel aanwezige horizontale boog de rol van zichtbeperkend element al gauw overneemt (obstakels in de berm).

De combinatie van langshelling en dwarshelling levert een ruimtelijke helling op. Deze resultante is te berekenen uit:

$$i_r = \sqrt{i_l^2 + i_d^2}$$

VERGELIJKING 3.12

waarin:  $i_r$ : ruimtelijke helling [-]  
 $i_l$ : langshelling [-]  
 $i_d$ : dwarshelling [-]

Bij de keuze van het hellingpercentage dient te worden gewaakt tegen overschrijding van de maximale ruimtelijke helling. In het bijzonder bij de combinatie van horizontale bogen met verticale hellingen moet hierop worden gelet. De ruimtelijke helling dient zodanig te zijn dat er geen gevaar ontstaat voor afglijden van een voertuig. Op hoofdrijbanen van auto(snel)wegen is de maximaal toelaatbare ruimtelijke helling 7%. Op overige rijbanen geldt een maximum van 8%, omdat daar sprake is van een geringer risico bij afglijden.

Wegvakken met hellingen steiler dan 1 à 1,5% geven een goede waterafvoer bij de verkantingsovergangen. Waar mogelijk dienen deze overgangen gecombineerd te worden met aanwezige of te realiseren hellingen. Zones met een relatief slechte waterafvoer worden hierdoor vermeden.

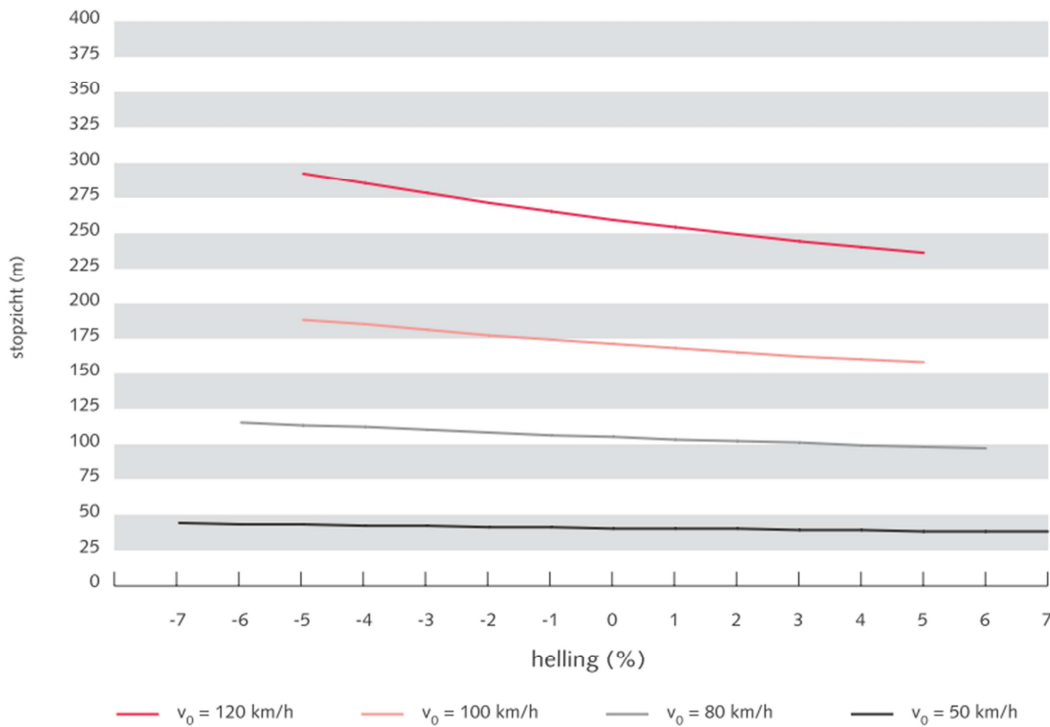
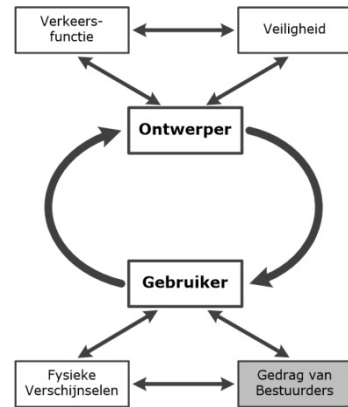
Bij grote hellingslengten dient in principe gekozen te worden tussen een flauwe helling zonder uitbreiding van het aantal rijstroken en een steilere helling waarbij veiligheid en capaciteit voldoende gewaarborgd worden door toevoeging van een extra rijstrook.

3.4.4 Gedrag van bestuurders

Wanneer de rijbaan onder een langshelling ligt, veranderen de zichtafstanden voor het stopzicht. Bij een opgaande helling staat een voertuig namelijk sneller stil en wordt de stopzichtafstand korter. Bij een neergaande helling is de remweg van een voertuig juist langer en wordt de stopzichtafstand langer. De stopzichtafstand als functie van het hellingpercentage volgens de NOA is voor vier verschillende snelheden af te lezen in Figuur 3.12.

Met betrekking tot het gedrag van bestuurders bij het rijden over verticale afrondingsbogen kunnen wat opmerkingen worden gemaakt over het comfort.

Het vereiste comfort bij het berijden van een bolle boog is niet maatgevend bij het bepalen van de boogstraal. De optredende variaties in versnellingskrachten blijven ook bij krappere bolle bogen ver beneden de grenswaarden die nog comfortabel genoemd kunnen worden.



FIGUUR 3.12: ZICHT OP STILSTAAND VERKEER BIJ VERSCHILLENDE HELLINGPERCENTAGES [NOA, 2007]

Bij de dimensionering van holle bogen spelen de zichtlengte-eisen geen rol van betekenis (behalve in diep gelegen kunstwerken zoals tunnels).

De minimaal toe te passen straal van de holle boog volgt uit de comforteis; de verticale versnelling mag niet meer dan 1 m/s<sup>2</sup> bedragen. Uit formule 3.13 volgen minimale holle boogstralen die circa een factor 10 lager liggen dan de vereiste minimale bolle boogstralen bij dezelfde ontwerpsnelheid.

$$R_{vmin} = \frac{\left(\frac{V_{ontw}}{3,6}\right)^2}{a}$$

VERGELIJKING 3.13

waarin:

- $R_{vmin}$  = minimale boogstraal hol [m]
- $V_{ontw}$  = ontwerpsnelheid [km/h]
- $a$  = acceleratie [m/s<sup>2</sup>]

Als deze minimale bolle en holle boogstraal aaneengeschakeld zouden worden, is het visuele resultaat volstrekt onacceptabel. De holle boog (van relatief geringe lengte) wordt perspectivisch sterk verkort, waardoor een knik in het wegbeeld optreedt. Om esthetische redenen is het wenselijk de straal van de holle boog twee keer zo groot te kiezen als de straal van de daarop volgende bolle boog. De minimale straalwaarden gebaseerd op comfort zijn alleen in speciale gevallen bruikbaar. Voor de toe te passen waarden zie Tabel 3.8.

<b>v<sub>ontw</sub> [km/h]</b>	<b>120</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>50</b>
<b>Comfort [m]</b>	1.200	850	500	200
<b>Esthetica [m]</b>	24.800	16.600	10.000	2.200

TABEL 3.8: ONDERGRENZEN BOOGSTRALEN VAN HOLLE BOGEN BIJ VERSCHILLENDE ONTWERPSNELHEDEN EN VERSCHILLENDE EISEN

Met het oog op kostenbesparing worden vooral in (diepe) tunnels veel kleinere holle bogen toegepast. Omdat er door het gebruik van relatief lange hellingen geen directe visuele relatie is met een aangrenzende bolle boog, speelt de esthetica hier een ondergeschikte rol. Daarbij werkt het toepassen van ruimere voetbogen in dit geval sterk kostenverhogend, doordat de lengte van de tunnel toeneemt bij toepassing van ruimere verticale boogstralen. Daarentegen zijn bij een ligging op aardebaan de meerkosten van het toepassen van ruimere voetbogen relatief klein.

### 3.5 Verticaal alignement: algemeen

Het verticaal alignement bestaat uit de twee ontwerpelementen van de vorige paragrafen: langshellingen en afrondingsbogen. In het geval van een vlakke weg is de langshelling gelijk aan 0%. In deze paragraaf zijn enkele aandachtspunten weergegeven voor het verticaal alignement. In de eerste subparagraaf wordt ingegaan op enkele belangrijke ontwerpaspecten van het verticaal alignement. In de tweede subparagraaf is stilgestaan bij het wegbeeld dat ontstaat uit de combinatie van het horizontaal en verticaal alignement.

Het verticaal alignement kent geen overgangsbogen. Deze zijn niet nodig, omdat de verticale afrondingsbogen al ruim genoeg zijn voor het rijcomfort. Daarnaast zijn aspecten als een geleidelijke stuurverdraaiing of een verkantingsovergang, belangrijke redenen voor het toepassen van overgangsbogen in het horizontaal alignement, niet van toepassing op het verticaal alignement.

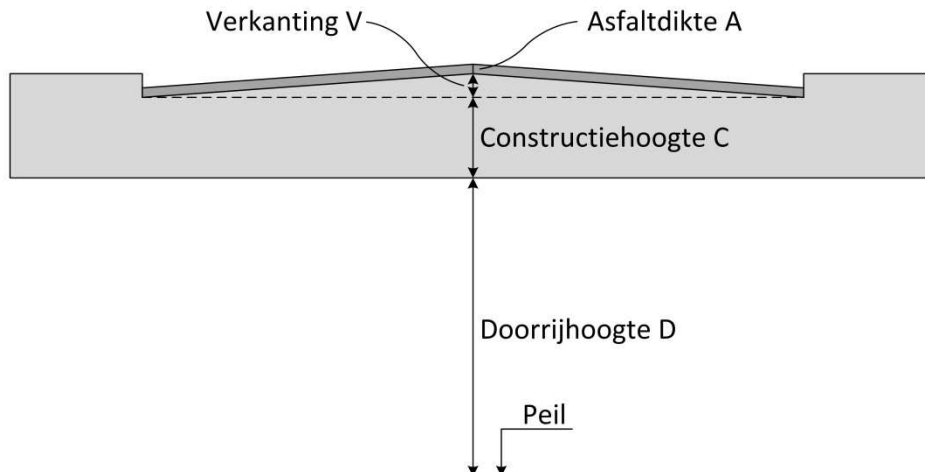
#### 3.5.1 Ontwerp verticaal alignement

Voor een juiste toepassing, aaneenschakeling en berekening van de topboog, voetboog en langshelling spelen de volgende aandachtspunten een rol:

- Onderdruk de neiging om bij een nieuw te ontwerpen wegverbinding over alle bestaande infrastructuur heen te willen gaan. Omdraaiing van niveaus kan in bepaalde gevallen een aanzienlijke besparing op grondverzet (dus kosten) opleveren. Voorbeeld: een nieuwe dubbelbaans-autoweg op maaiveldniveau ontwerpen en bestaande te kruisen wegen van lagere orde één niveau optillen;
- Al te precies de hoogteligging van het maaiveld volgen, resulteert in een groot aantal verticale elementen; dit is ongewenst (zie ook subparagraaf 3.8.2);
- Bij hoogteverschillen tussen 2 en 10 meter, die gebruikelijk zijn bij het ongelijkvloers kruisen van land-, spoor- en waterwegen, zullen top- en voetboog doorgaans rechtstreeks aan elkaar gekoppeld worden. Alleen bij diepe tunnels en hoge rivierbruggen, of gedwongen door topografische omstandigheden, kan een helling tussen de afrondingsbogen noodzakelijk blijken. Bij geringe hoogteverschillen (tot 2 m) ontstaat visueel een bult of kuil in het wegbeeld als de minimum stralen worden toegepast; om dit te verzachten dienen hier óf zeer grote verticale stralen te worden gekozen, óf een zeer

flauwe helling (1 promille of minder, met een minimum lengte van 300 m). Voor gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen speelt de esthetica een minder prominente rol;

- De benodigde doorrijhoogte moet voor de lengteprofielberekening op de juiste wijze worden geconverteerd naar het te overbruggen hoogteverschil (zie Figuur 3.13).



FIGUUR 3.13: CONVERSIE DOORRIJHOOGTE NAAR HOOGTEVERSCHIL

- Als vuistregel kan voor de constructiehoogte  $1/25$  van de overspanning (gemeten in de lengterichting van het kunstwerk) worden aangehouden. Als marge kan daar nog circa 10 cm worden bijgeteld voor de dikte van het asfaltdek. In de praktijk wordt de rekenas van het lengteprofiel in het hart van de deelstreep gelegd, of (bij autosnelwegen) op de kantstreep aan de middenbermszijde.
- Bij lengteprofieltekeningen is het gebruikelijk de verticale schaal veel groter te kiezen dan de horizontale schaal, om het hoogteverloop van zowel maaiveld als ontwerp beter te doen uitkomen. Bijvoorbeeld een horizontale schaal van 1:2000 en een verticale schaal van 1:100, waarmee het lengteprofiel met een factor 20 wordt overdreven. Bij het interpreteren en bewerken van lengteprofieltekeningen dient men zich te realiseren dat de cirkelbogen tot (delen van) ellipsen zijn uitgerekt.

Lengteprofielen kunnen eenvoudig en snel handmatig worden doorgerekend (zie Figuur 3.14) met de paraboolformule 3.14 en met formule 3.15.

$$y = \frac{x^2}{2R}$$

VERGELIJKING 3.14

$$i = \frac{x}{R}$$

VERGELIJKING 3.15

waarin

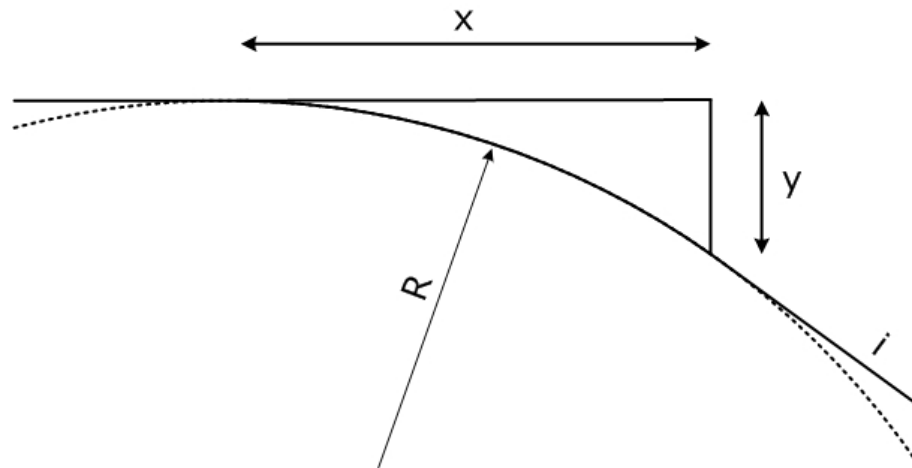
$R$  = verticale boogstraal [m];

$x$  = horizontale afstand vanuit hoogste of laagste punt van de boog [m];

$y$  = verticale afwijking [m] op afstand  $x$ ;

$i$  = helling [-] op afstand  $x$ .

Omdat bij het wegontwerp slechts een klein gedeelte van de cirkelboog wordt gebruikt (het gedeelte om en nabij de horizontaal), is het verschil in uitkomst tussen parabool- en cirkelformule verwaarloosbaar klein. Zelfs veel computerprogramma's gebruiken de parabool als basis voor de berekening van lengteprofielen.

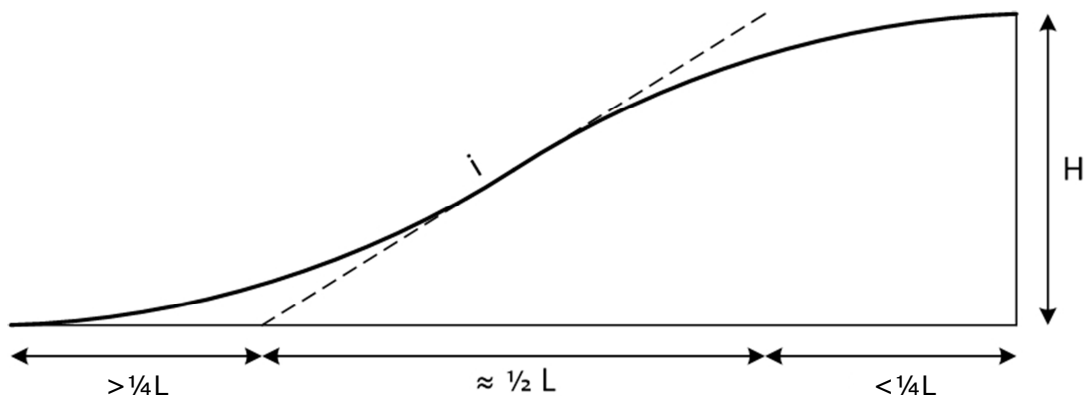


FIGUUR 3.14: PARAMETERS BIJ TOP- EN VOETBOGEN

In het geval dat:

- de voet- en topboog elkaar raken;
- de tangentialen in de oorsprong van beide bogen parallel lopen;
- het te overwinnen hoogteverschil bekend is;
- de stralen van beide bogen bekend zijn,

mogen de stralen van voet- en topboog bij elkaar worden opgeteld om de benodigde lengte en de maximum-helling in het buigpunt te kunnen berekenen.



FIGUUR 3.15: PARAMETERS BIJ ELKAAR RAKENDE TOP- EN VOETBOOG

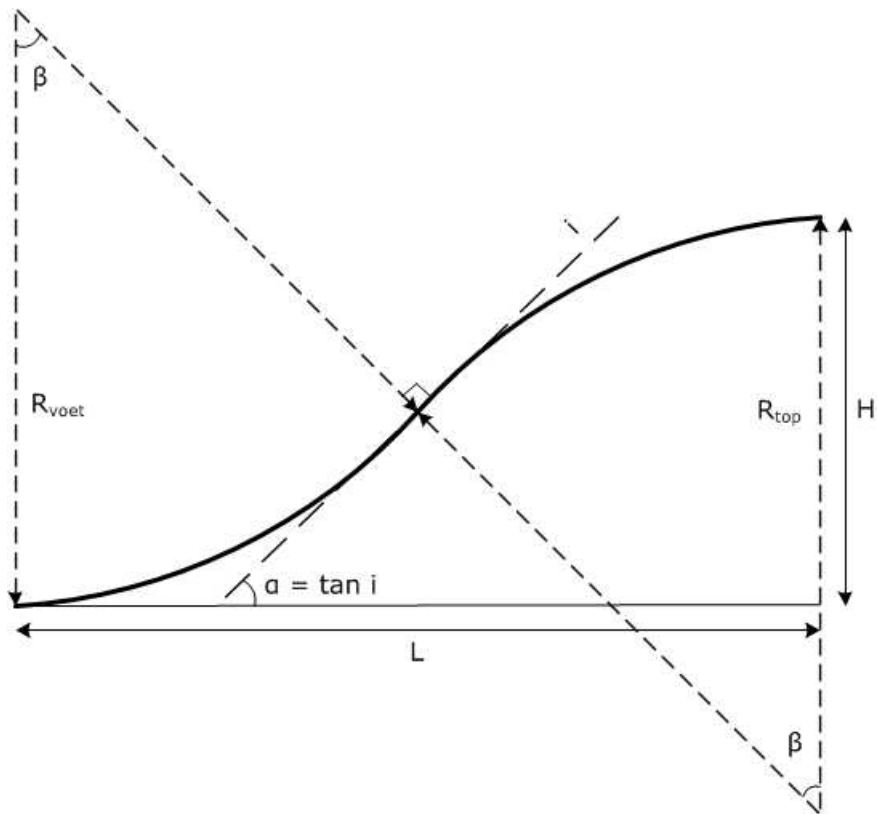
Deze parameters kunnen berekend worden met behulp van Figuur 3.15. De stippellijn door het buigpunt snijdt de hoogte van de top en de onderkant van de helling op ongeveer een kwart van de horizontale afstand aan beide zijden. Dus dan moet gelden voor de helling in het buigpunt:

$$i = \frac{H}{\frac{1}{2}L} = \frac{2H}{L}$$

Omdat het hellingspercentage  $p$  in procenten uitgedrukt wordt, moet deze waarde vermenigvuldigd worden met 100:

$$p = \frac{2H}{L} * 100 = \frac{200H}{L}$$

VERGELIJKING 3.16



FIGUUR 3.16: PARAMETERS BIJ ELKAAR RAKENDE TOP- EN VOETBOOG (2)

De helling  $i$  kan ook uitgedrukt worden in  $R_{top}$ ,  $R_{voet}$ ,  $H$  en  $L$ . Hoe dit grafisch zit is te zien in Figuur 3.16. De stralen van de voet- en topboog staan haaks op de helling  $i$ . Daarom zijn de hoeken  $\beta$  in de figuur gelijk aan hoek  $\alpha$ , die gelijk is aan  $\tan(i)$ . Er geldt dan dat de hoek  $\beta$  gelijk is aan de horizontale afstand  $L$ , gedeeld door de verticale afstand, die gelijk is aan  $R_{voet} + R_{top} = \sum R$  minus  $H$ .

De volgende relatie wordt dus gevonden:

$$\alpha = \beta = \tan(i) = \frac{L}{\sum R - H}$$

Omdat  $i$  een hellingspercentage is geldt dus ook:

$$i = \frac{L}{\sum R - H}$$

Met  $\sum R = R_{voet} + R_{top}$

Maar omdat  $H$  ten opzichte van  $\sum R$  heel klein is, kan deze verwaarloosd worden:

$$i = \frac{L}{\sum R}$$

VERGELIJKING 3.17

Combineren van 3.16 en 3.17 levert:

$$i = \frac{H}{\frac{1}{2}L} = \frac{L}{\sum R}$$

⇓

$$\frac{1}{2}L^2 = H \sum R$$

⇓



$$L = \sqrt{2H \sum R}$$

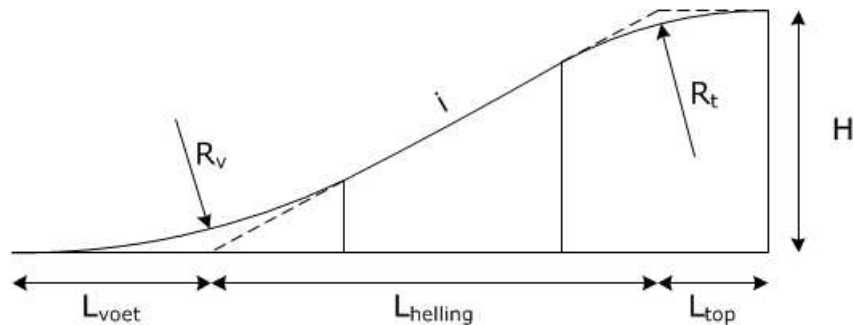
VERGELIJKING 3.18

waarin  $L$  = horizontale lengte van voet- en topboog samen [m];  
 $H$  = totale hoogteverschil [m];  
 $\sum R$ : = som van voet- en topboog ( $R_{voet} + R_{top}$ ) [m];  
 $i$  = helling in het buigpunt [-].

In het geval dat de lengte  $L$  een vaststaand gegeven is, kan de som van de stralen worden teruggerekend, in de gewenste verhouding opgesplitst en vergeleken met de minimumwaarden in relatie tot de ontwerpsnelheid.

Desgewenst kan de positie van het buigpunt worden gevonden door de afstanden  $L$  en  $H$  in dezelfde verhouding op te delen als tussen  $R_{voet}$  en  $R_{top}$ .

Als in de voorgaande situatie de helling in het buigpunt de toegestane norm overschrijdt, zullen voet- en topboog uit elkaar moeten worden geschoven en verbonden met een flauwer gekozen helling (zie Figuur 3.17). Dan is er dus sprake van een situatie zoals in Figuur 3.17.



FIGUUR 3.17: PARAMETERS BIJ HELLINGEN EN AFRONDINGSBOGEN

Ook in deze situatie is het nodig een formule te vinden voor de lengte van de helling.

De breedte van de helling wordt verdeeld in drie delen zoals aangegeven in Figuur 3.17, namelijk  $L_{voet}$ ,  $L_{helling}$  en  $L_{top}$ .

Herschrijven van 3.17 geeft de breedte van de top- en voetboog:

$$L_{totale-voetboog} + L_{totale-topboog} = i \sum R$$

In Figuur 3.15 is te zien dat de breedte van de top- en voetboog te verdelen is in twee ongeveer even grote delen. In Figuur 3.17 is te zien dat  $L_{voet}$  en  $L_{top}$  allebei de helft van de totale top- en voetboog zijn, dus:

$$L_{voet} + L_{top} = \frac{1}{2} (L_{totale-voetboog} + L_{totale-topboog}) = \frac{i \sum R}{2}$$

Voor  $L_{helling}$  geldt dat deze uit Figuur 3.17 is af te lezen:

$$L_{helling} = \frac{H}{i}$$

De benodigde lengte kan dan berekend worden:

$$L = L_{voet} + L_{top} + L_{helling} = \frac{i \sum R}{2} + \frac{H}{i}$$

Uitgaande van het hellingspercentage  $p$  in plaats van de helling  $i$  wordt dit:

$$L = \frac{p \sum R}{200} + \frac{100H}{p}$$

VERGELIJKING 3.19

waarin:  $L$  = horizontale lengte van beide bogen en helling samen [m];  
 $p$  = hellingspercentage [%];  
 $\sum R$ : = som van voet- en topboog ( $R_1 + R_2$ ) [m];  
 $H$  = totale hoogteverschil [m].

Een gebiedsontsluitingsweg ( $V_{ontwerp} = 80$  km/h) kruist ongelijkvloers een spoorlijn; het hoogteverschil bedraagt 7 meter. De bijbehorende minimum-topboog  $R_t$  is 5000 m (Tabel 3.7). De voetboog wordt het dubbele:  $R_v = 10.000$  m. De benodigde lengte  $L = \sqrt{2H \sum R} = \sqrt{2 * 7 * (5000 + 10000)} = 460$  m (opgesplitst: 307 m voor de voetboog, 153 m voor de topboog). De helling  $i = 200 H/L = 200 * 7/460 = 3,04$  %. Dit is ruim binnen de maximumnorm van 6% van het Handboek Wegontwerp (zie Tabel 3.6).

Zou men desondanks niet steiler willen gaan dan bijvoorbeeld 2 %, dan wordt de lengte:  $L = 2 * 15000/200 + 100 * 7/2 = 500$  m. Uit dit voorbeeld blijkt dat een flauwere maximumhelling relatief weinig extra lengte vergt.

De lengtes van de afzonderlijke elementen bedragen:

$$\begin{aligned} L_{voetboog} &= 0.01R_i = 100 * 2 &= 200 \text{ m} \\ L_{topboog} &= 0.01R_i = 50 * 2 &= 100 \text{ m} \\ L_{helling} &= 500 - 300 &= 200 \text{ m} \end{aligned}$$

Nu de lengtes van de afrondingsbogen bekend zijn, kunnen met de paraboolformule de hoogtes van de tangentialpunten en eventueel tussenliggende punten worden bepaald.

VOORBEELD 3.6

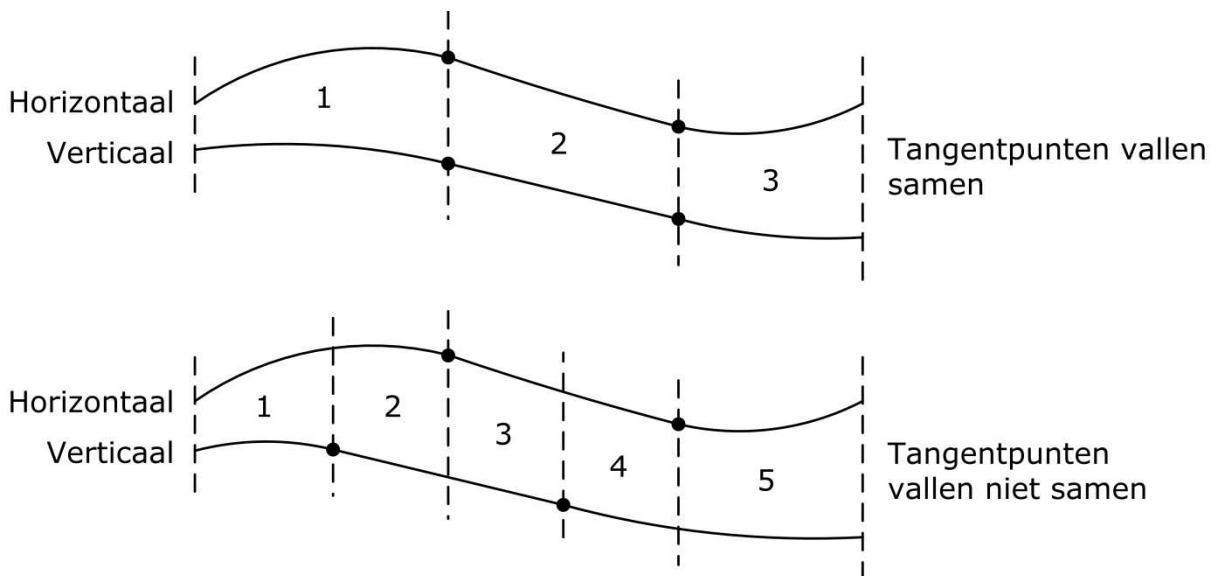
In een enkelbaansweg met een ontwerpsnelheid van  $v = 100$  km/h moet tussen een opgaande helling van 1,4 % en een neergaande helling van 0,6 % een verticale afrondingsboog worden aangebracht. Er moet ter plekke veilig kunnen worden ingehaald. Uit Tabel 2.8 volgt dat de zichtafstand dan minimaal 700 m bedraagt. Hierbij hoort een topboog met een straal van  $R = 700^2 / 2(\sqrt{1,1} + \sqrt{1,1})^2 \approx 56.000$  m (formule 3.11). De lengte van de verticale boog bedraagt  $(1,4 + 0,6) 56.000 / 100 = 1120$  m (formule 3.17). (N.B. De zichtlengte is kleiner dan de booglengte: formule 3.9 is dus toepasbaar en er zitten aan weerszijden van de top van de afrondingsboog twee tangentialen, waardoor gedeeld moet worden door 100.)

Vanaf de opgaande helling tot de top is de boog  $1,4 * 56.000 / 100 = 784$  m lang en vanaf de top tot de neergaande helling  $0,6 * 56.000 / 100 = 336$  m. De overgang van helling van 1,4 % naar topboog bevindt zich op  $784^2 / (2 * 56.000) = 5,5$  m onder de top, de overgang van topboog naar de helling van 0,6 % op  $336^2 / (2 * 56.000) = 1,0$  m onder de top (formule 3.12).

VOORBEELD 3.7

### 3.5.2 Wegbeeld

Om vanuit de geometrie gezien een rustig wegbeeld te verkrijgen, verdient het aanbeveling te streven naar beperking van het aantal ruimtelijke elementen. Een ruimtelijk element is een deel van de ruimtelijke lijn die in het horizontale en in het verticale vlak geen wisseling van krommingsrichting geeft. Dit kan worden bereikt door de tangentialpunten van het horizontale en verticale alignment zoveel mogelijk te laten samenvallen (zie Figuur 3.18). Een afrit zou men bijvoorbeeld kunnen vormgeven door achtereenvolgens een rechtsdraaiende bolle boog, een hellende rechte en een linksdraaiende holle boog toe te passen. De ervaring heeft geleerd dat de aanwezigheid van meer dan drie à vier ruimtelijke elementen achter elkaar, tegelijkertijd zichtbaar in het wegbeeld, een onrustige indruk geeft.



FIGUUR 3.18: RUIMTELIJK ELEMENT

## 3.6 Knooppunten, kruispunten, aansluitingen en rotondes

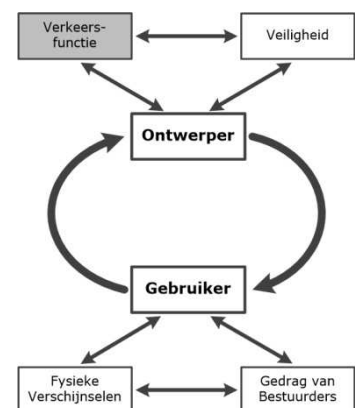
### 3.6.1 Verkeersfunctie

Het is onvermijdelijk dat wegen en straten op elkaar aansluiten en elkaar kruisen, zodat men van de ene op de andere weg kan komen. Op de kruispunten zullen de banen van de voertuigen (mits geen fysieke maatregelen zijn getroffen) elkaar in hetzelfde vlak kruisen. Als gevolg daarvan kunnen conflicten optreden, ook al blijft elk van de voertuigen in de door de ontwerper voorbestemde baan of rijstrook.

#### *Indeling naar aspecten*

Kruispunten (hier nog als algemene benaming gebruikt, want in vakjargon is de betekenis specifieker) kunnen worden onderscheiden naar een aantal invalshoeken:

- wegtype,
- niveau,
- voorrangsregeling,
- vormgeving,



*Wegtype*

- Een ontmoeting tussen twee rijbanen waar het verkeer niet kan of mag afslaan, wordt **kruising** genoemd. Voorbeeld: een fietspad dat een busbaan kruist, maar ook een spoorwegovergang.
- Een ontmoeting tussen twee rijbanen (niet deel uitmakend van een autosnelweg) wordt **kruispunt** genoemd. Voorwaarde is dat het verkeer op het gemeenschappelijke kruisingsvlak moet kunnen afslaan.
- Een ontmoeting tussen een autosnelweg en een niet-autosnelweg waar uitwisseling van voertuigen plaatsvindt, wordt **aansluiting** genoemd. Kenmerkend hierbij is dat de toe- en afritten van de autosnelweg min of meer haaks worden aangesloten op de niet-autosnelweg. De doorgaande hoofdstromen kruisen elkaar op ongelijke niveaus.
- Een ontmoeting tussen twee autosnelwegen wordt **knooppunt** genoemd. Kenmerkend is de vrije verkeersafwikkeling in alle richtingen. De doorgaande hoofdstromen kruisen elkaar op ongelijke niveaus. Alle afslaande stromen met dezelfde richting beschikken over een eigen rijbaan (verbindingsweg) die zodanig vloeiend is vormgegeven dat de afslagmanoeuvre wordt gereduceerd tot uitvoegen, eventueel snelheid aanpassen en weer invoegen.

*Niveau*

Twee kruisende verkeersstromen kunnen elkaar gelijkvloers dan wel ongelijkvloers ontmoeten. Het begrip "ongelijkvloers kruispunt" wordt alleen voor twee gewone wegen of straten gebruikt. Voorbeeld: de Maastunneltraverse door Rotterdam. Ook kruisingen kunnen ongelijkvloers zijn, zoals een plattelandsweg die onder een autoweg doorgaat.

*Voorrangsregeling*

Ten aanzien van de regeling van het verkeer op het kruisingsvlak wordt onderscheid gemaakt tussen:

- ongeregelde kruispunten, met de regel "rechts gaat voor";
- kruispunten met een bijzondere voorrangsregeling door middel van borden;
- geregelde kruispunten door middel van verkeerslichten (zie Deel 4 Hoofdstuk 2).

*Vormgeving*

Verreweg het grootste deel van de gelijkvloerse kruispunten kan wat betreft de vorm worden ingedeeld in de volgende types:

- volledig of recht kruispunt (vier armen);
- T-aansluiting (aansluithoek varieert tussen 72° en 90°);
- Y-splitsing (hoek van de vork kleiner dan 72°);
- rotonde.

Bij autosnelwegen is de hoofdindeling als volgt:

- volledig knooppunt;
- T-knooppunt;
- volledige aansluiting;
- eenzijdige aansluiting.

Knooppunten kunnen zich in vele gedaanten voordoen; aansluitingen echter hebben een beperkt aantal hoofdvormen.

*Knooppunten in autosnelwegen*

Knooppunten – kruispunten tussen autosnelwegen onderling – worden gekenmerkt door een vrije verkeersafwikkeling in alle richtingen. De eis dat de afslaande richtingen met relatief hoge snelheid bereden moeten kunnen worden (50-100 km/h), resulteert in een ruimtebeslag dat een veelvoud van dat van aansluitingen bedraagt (zie hierna).

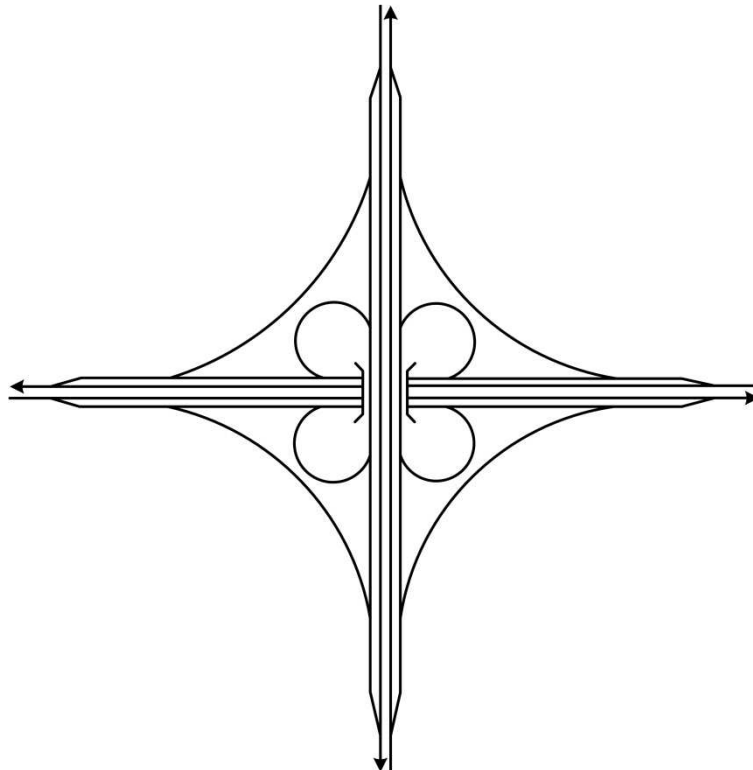
De eenvoudigste vorm van een volledig knooppunt is het klaverblad (zie Figuur 3.19). Ondanks zijn grote oppervlakte (circa 35 ha) is dit een relatief goedkope oplossing omdat er maar één centraal kunstwerk in voorkomt. De grens voor de toepassingsmogelijkheid wordt meestal bepaald door de capaciteit van de weefvakken tussen de lussen (circa 1200 pae/h). Kenmerkend is dat een aparte rangeerbaan wordt gebruikt waarop het verkeer van de klaverbladen kan in- en uitvoegen op relatief korte weefvakken en dus het verkeer op de hoofdrijbaan hierdoor niet wordt verstoord. Een rangeerbaan is een rijbaan parallel aan de hoofdrijbaan waar in- en uitvoegen plaatsvindt.

In Figuur 3.19 zijn verder het ster-, turbine- en trompetknooppunt weergegeven. De voor- en nadelen zijn in Tabel 3.9 op een rij gezet.

Knooppunt-vorm	Voordelen	Nadelen
<b>Klaverblad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eenvoudige vorm</li> <li>- één kunstwerk</li> <li>- geen problematische verbouwing</li> <li>- goedkoop</li> <li>- beperkt ruimtebeslag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- beperkte capaciteit weefvakken tussen lussen</li> <li>- ongunstige bewegwijzering lussen</li> </ul>
<b>Turbine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geen weefvakken</li> <li>- ruime bogen</li> <li>- betere afwikkeling linksafslaand verkeer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vijf kunstwerken (vier met forse afmetingen)</li> <li>- krappe lengteprofielen tussen kunstwerken</li> <li>- complexe geometrie</li> <li>- groot ruimtebeslag</li> </ul>
<b>Ster</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geen rangeerbanen en weefvakken</li> <li>- directe verbindingen in alle richtingen</li> <li>- ruime bogen</li> <li>- uitstekende afwikkeling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stapeling van kunstwerken in drie niveaus</li> <li>- zeer grote hoogteverschillen</li> <li>- aanzienlijk grondverzet</li> <li>- duur</li> <li>- groot ruimtebeslag</li> </ul>

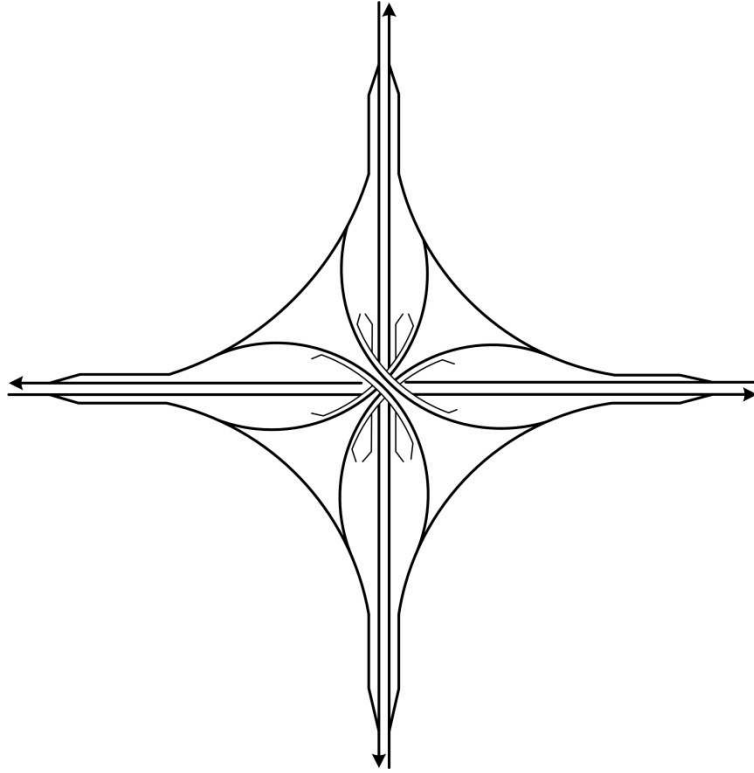
TABEL 3.9: KARAKTERISTIEKEN VAN VIERARMIGE KNOOPPUNTVORMEN IN AUTOSNELWEGEN

Bij de knooppuntvormen zijn vele variaties en combinaties mogelijk. Zo is het knooppunt Oudenrijn bij Utrecht een combinatie van het (voormalige) klaverblad en de turbine; twee diagonaal tegenover elkaar gelegen lussen zijn vervangen door twee ruime linksdraaiende bogen om de overgebleven lussen heen. Behalve deze zogenoemde klaverturbine zijn ook oplossingen denkbaar als de klaverster.

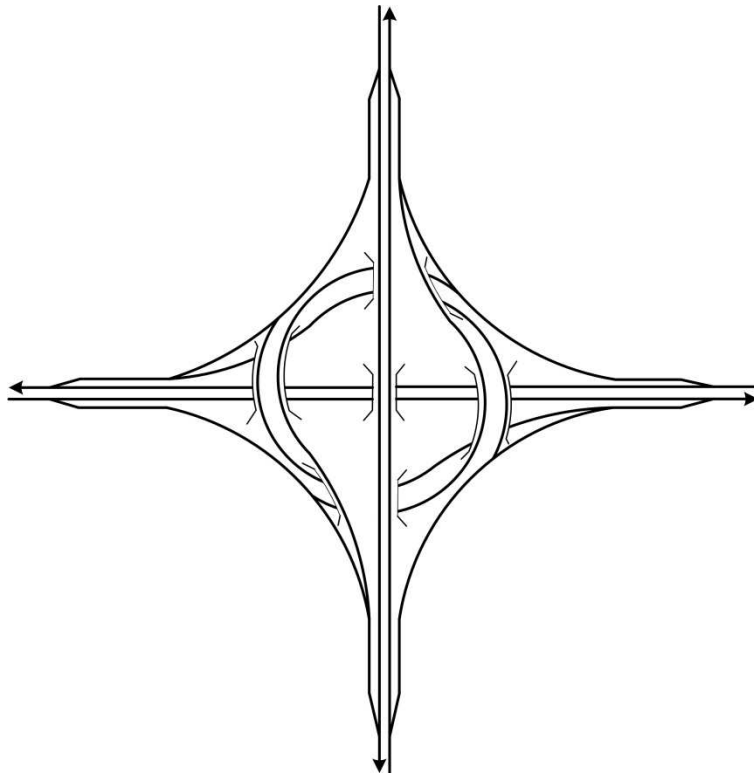


KLAVERBLAD-KNOOPPUNT

FIGUUR 3.19: KNOOPPUNTVORMEN

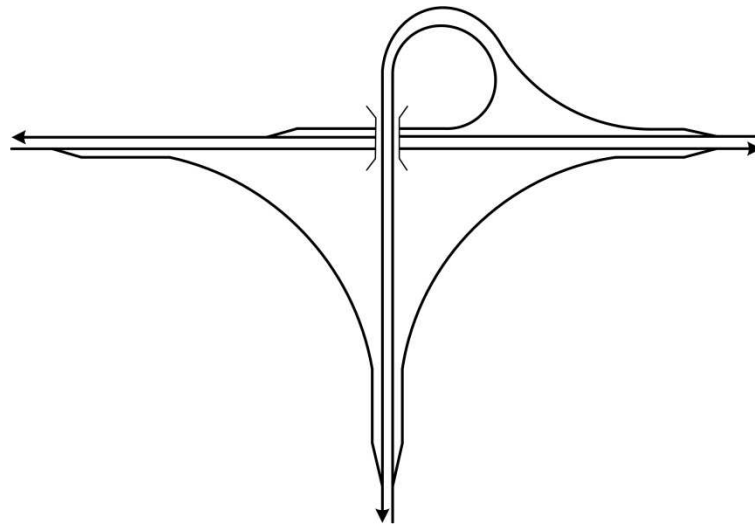


STER-KNOOPPUNT



TURBINE-KNOOPPUNT

FIGUUR 3.19 (VERVOLG): KNOOPPUNTVORMEN



TROMPET-KNOOPPUNT

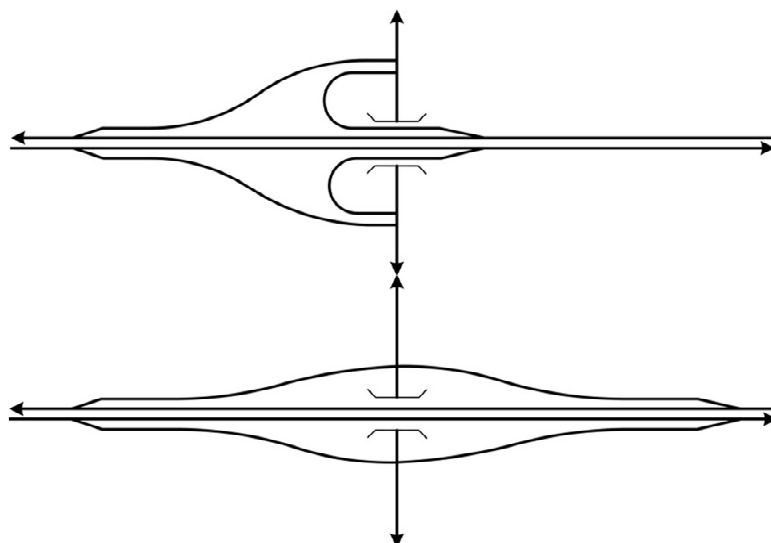
FIGUUR 3.19 (VERVOLG): KNOOPPUNTVORMEN

De rotonde komt in het autosnelwegennet alleen nog voor in oude situaties. In verband met de beperkte capaciteit en het niet aansluiten bij het verwachtingspatroon van de weggebruiker (snelheidsbeperking, gelijkvloers kruisende verkeersstromen) worden deze op den duur vervangen door de hiervoor genoemde vormen.

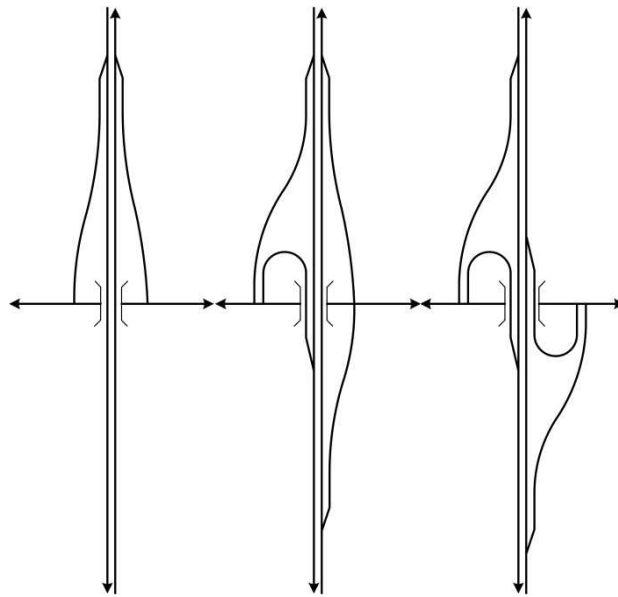
#### *Aansluitingen in autosnelwegen*

Aansluitingen van wegen van een lager type aan stroomwegen zijn onder te brengen in twee basistypes: de Haarlemmermeer-aansluiting en de halfklaverblad-aansluiting (zie Figuur 3.20). Via de toerit rijdt men kruisingsvrij de autosnelweg op en via de afrit er weer vanaf. Op de onderliggende weg zijn er kruispunten of rotondes ter plaatse van toe- en afrit.

De Haarlemmermeer-aansluiting is een eenvoudige en overzichtelijke kruispunt-oplossing, waarbij de situering van de toe- en afritten overeenkomt met het richtinggevoel van de weggebruiker. Alleen in zeer speciale gevallen kan worden overwogen een eenzijdige aansluiting toe te passen (zie Figuur 3.21) als er voor de ontbrekende takken logische alternatieve verbindingen zijn binnen de bestaande infrastructuur. In het algemeen moet echter worden gestreefd naar oplossingen die in alle richtingen compleet zijn.



FIGUUR 3.20: HALFKLAVERBLAD-AANSLUITING (BOVEN) EN HAARLEMMERMEER-AANSLUITING (ONDER)



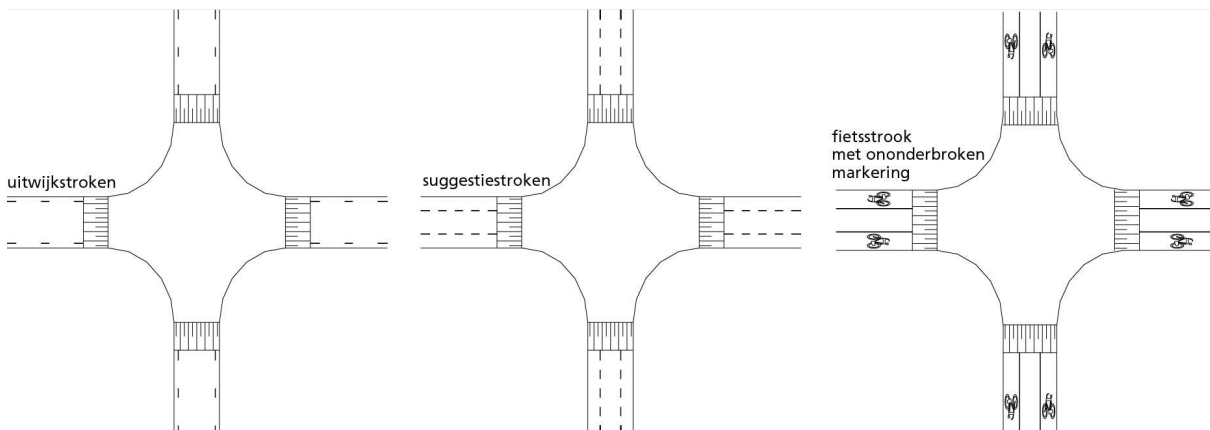
FIGUUR 3.21: MOGELIJKE VARIANTEN BIJ AANSLUITINGEN: EENZIJDIGE AANSLUITING (LINKS), COMBINATIE (MIDDEN), ASYMMETRISCH (RECHTS)

De halfklaverblad-aansluiting kan worden toegepast wanneer er sprake is van een belemmering langs één kant van de secundaire weg (kanaal, spoorlijn, parallelweg, bebouwing). Nadeel van deze oplossing is dat een van de lussen in een afrit ligt, wat een grote snelheidsaanpassing vereist. Een asymmetrisch halfklaverblad zoals geschetst in Figuur 3.21 heeft dit bezwaar niet (daar bevinden alleen de opritten zich in een lus). Een minder gunstige eigenschap van halfklaverblad-aansluitingen is de verhoogde kans op spookrijders omdat de toe- en afrit naast elkaar liggen.

Qua ruimtebeslag ontlopen de Haarlemmermeer en het halfklaverblad elkaar niet veel in een 'standaard' uitvoering (circa 5 ha). Het ruimtebeslag van een Haarlemmermeeraansluiting kan echter sterk worden verkleind door het toepassen van verticale grondkerende constructies tussen de hoofdrijbaan van de stroomweg en de toe- en afritten.

*Kruispunten in niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom*

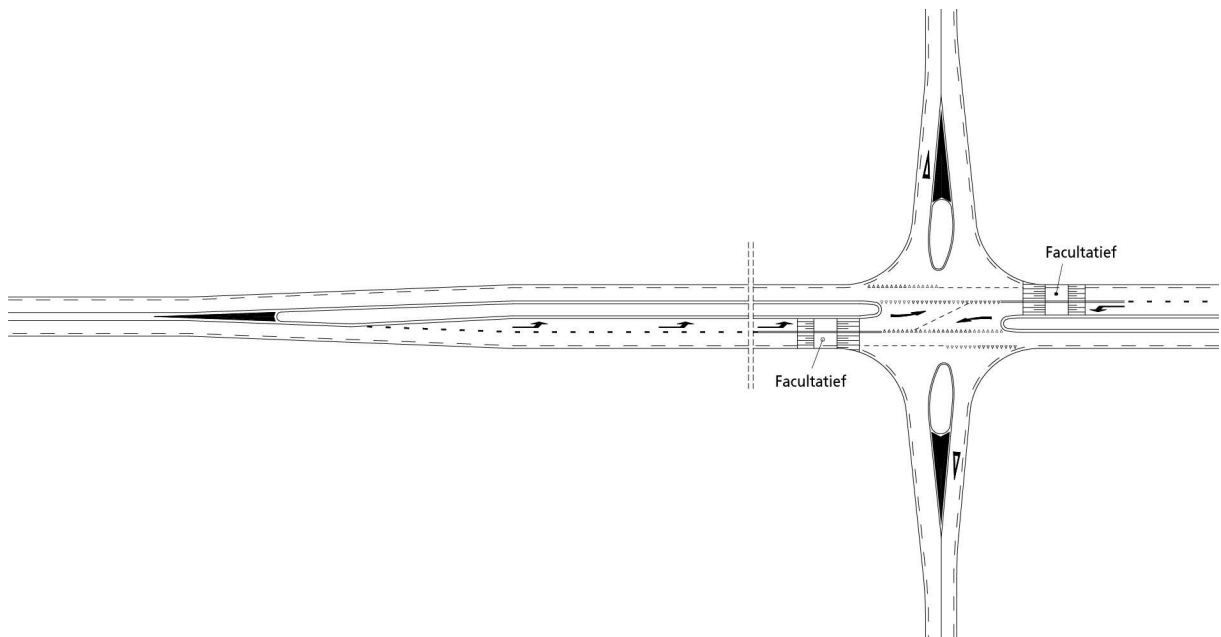
Waar erftoegangswegen elkaar ontmoeten, kan met een eenvoudige vormgeving worden volstaan (zie Figuur 3.22). De intensiteiten zijn dermate laag dat enige vorm van voorrangsregeling niet nodig is. Bovendien past het toepassen van gelijkwaardige kruispunten tussen erftoegangswegen onderling bij de gewenste uniformiteit in kruispuntoplossingen. Om redenen van verkeersveiligheid kan het overigens lokaal gewenst zijn om toch een voorrangsregeling toe te passen, bijvoorbeeld als een van de kruisende wegen relatief meer doorgaand verkeer heeft en snelheidsremmende maatregelen onvoldoende zijn om gelijkwaardige kruispunten te kunnen toepassen. Het ontwerp van het kruispunt verandert hierdoor echter niet wezenlijk.



FIGUUR 3.22: GELIJKWAARDIG KRUISPUNT MET DRIE VARIANTEN: MET UITWIJKSTROKEN, SUGGESTIESTROKEN EN FIETSSTROKEN.

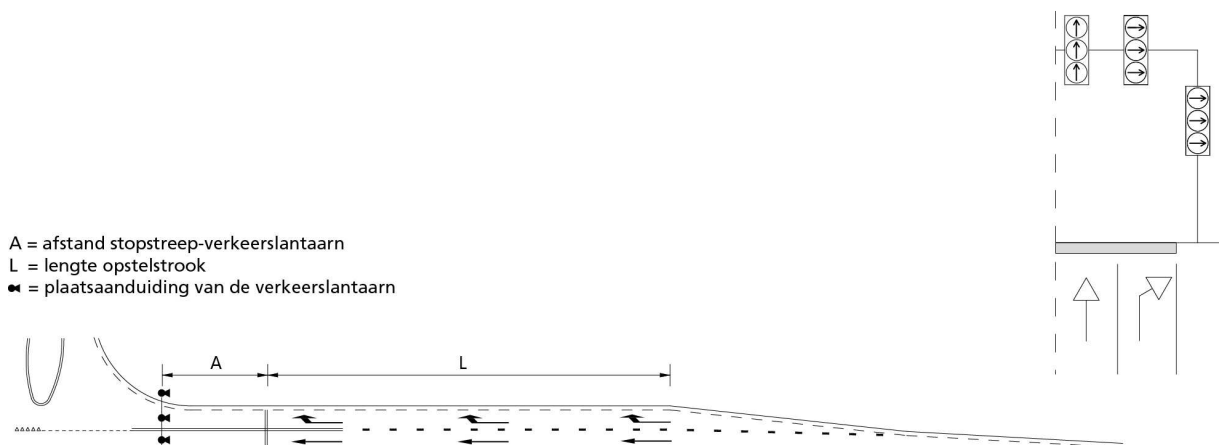


Tussen gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen worden in principe altijd voorrangskruispunten toegepast. Tussen gebiedsontsluitingswegen onderling kan alleen een voorrangskruispunt worden toegepast als de verkeersintensiteit voldoende laag is, met name op de zijweg. Daarbij is het uit oogpunt van verkeersveiligheid noodzakelijk om linksafvakken aan te brengen voor het van vanaf de hoofdweg links afslaande verkeer (zie Figuur 3.23). De functie daarvan is tweeledig: afremmen buiten het doorgaande verkeer en het bieden van een opstel­mogelijkheid tijdens het wachten op een geschikte hiaat in de tegen­stroom. Naarmate de intensiteit op de hoofdweg groter wordt en de snelheden hoger, wordt het voor verkeer uit de zijweg moeilijker de hoofdweg over te steken dan wel op te rijden (linksafslaand verkeer). Een baansplitsing maakt oversteken in twee etappes mogelijk.



FIGUUR 3.23: VOORRANGSKRUISPUNT

Bij hogere intensiteiten kan het uit oogpunt van doorstroming en verkeersveiligheid noodzakelijk zijn om een verkeersregelin­stallatie (VRI) toe te passen, zeker als een rotonde (zie verderop in dit hoofdstuk) niet inpasbaar is of onvoldoende capaciteit biedt. Om het kruispunt ook zonder ingeschakelde VRI veilig te laten functioneren, bijvoorbeeld als deze 's nachts wordt uitgeschakeld, is het wenselijk om de kruispuntinrichting zo min mogelijk te laten afwijken van een kruispunt zonder VRI (zie hierboven). Voor een efficiënte, conflictvrije verkeersregeling (zie ook deel D van dit dictaat) zal het echter vaak wenselijk zijn om aparte opstel­stroken toe te passen voor rechtsafslaand verkeer (zie Figuur 3.24).



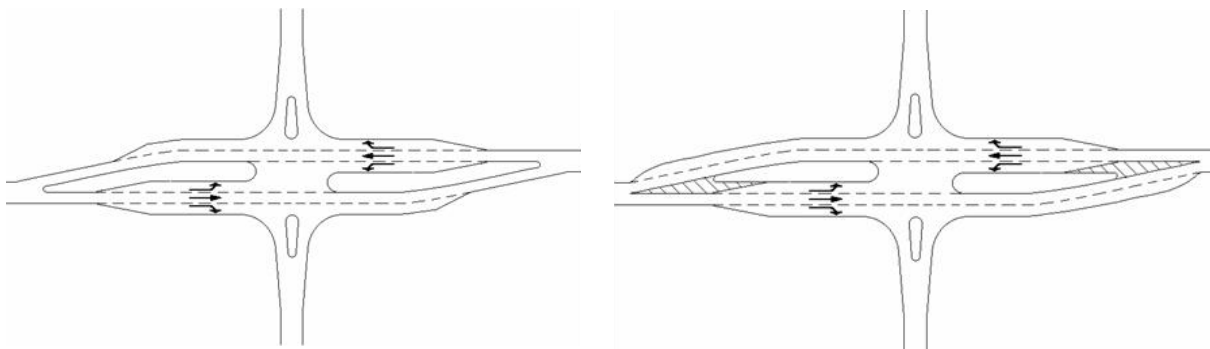
- A = afstand stopstreep-verkeerslantaarn
- L = lengte opstel­strook
- ◼ = plaatsaanduiding van de verkeerslantaarn

FIGUUR 3.24: KRUISPUNT MET VRI: DETAIL VOORSORTEERSTROOK

Bij hogere intensiteiten kan het bovendien wenselijk zijn om meer parallelle opstelstroken per richting te bieden. Bij meer dan drie rijstroken per rijbaan, of het ontbreken van een opstelstrook tussen beide rijbanen in, acht het Handboek Wegontwerp het noodzakelijk uit oogpunt van verkeersveiligheid dat de verkeersregelinstantie altijd in bedrijf is, dus ook gedurende stille uren.

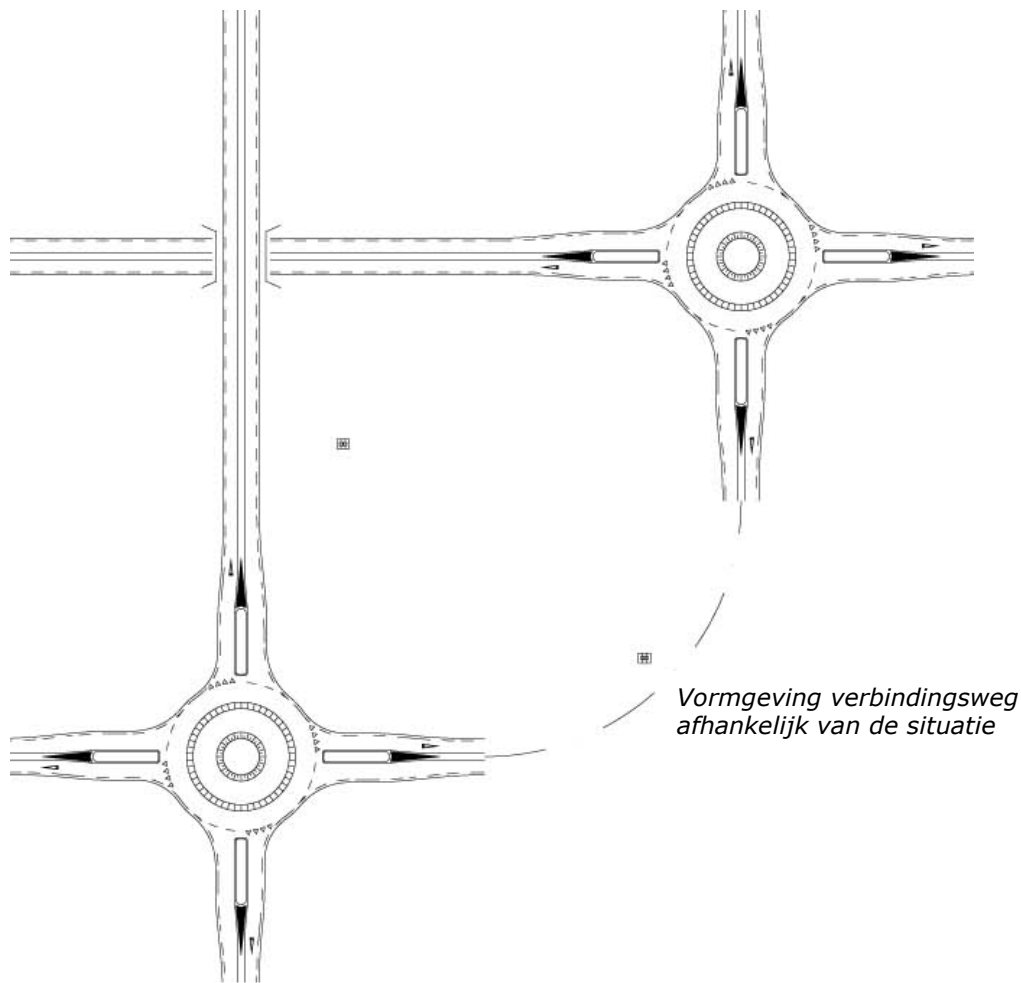
In de RONA, de oude ontwerprichtlijnen voor wegen buiten de bebouwde kom, waren ook typen kruispunten opgenomen met aparte uitvoegstroken voor zowel rechts- als linksafslaand verkeer. Het Krimpenerwaard-kruispunt kenmerkt zich door een brede baansplitsing (opstelstrook voor lange gelede voertuigen) en fysieke rugdekking voor vanaf de hoofdweg afslaand verkeer door middel van verhoogde opsluitbanden. Het Quatre-Bras-kruispunt heeft een smalle baansplitsing (om overstekende (brom)-fietsers ruimte te bieden) en biedt afslaand verkeer een quasi-rugdekking in de vorm van afstreekmarkering op het wegdek (zie Figuur 3.25).

Kruispunten zonder verkeersregeling met rechtsafvakken worden tegenwoordig bij voorkeur niet meer toegepast. In tegenstelling tot linksafvakken, die een gunstig effect hebben op de verkeersveiligheid, kunnen rechtsafvakken zorgen voor afdekongevallen. Het rechtsafslaande verkeer op het rechtsafvak belemmert namelijk gedeeltelijk het zicht van het verkeer op de zijweg op het rechtdoorgaand verkeer op de hoofdweg. Toepassing van een rechtsafvak is echter te overwegen in bijzondere situaties, bijvoorbeeld als zich rechts van de weg een spoorwegovergang, beweegbare brug of een toeritten van een stroomweg bevindt.



FIGUUR 3.25: KRUISPUNT MET RECHTSAFVAK: LINKS KRIMPENERWAARD-KRUISPUNT, RECHTS QUATRE-BRAS-KRUISPUNT

In het geval dat beide kruisende wegen een belangrijke verkeersfunctie hebben kan het op grond van capaciteit nodig zijn het kruispunt ongelijkvloers uit te voeren. Beide wegen worden op elkaar aangesloten door een aparte verbindingsweg, waarlangs de verkeersuitwisseling plaatsvindt. Deze quadrantoplossing is in feite samengesteld uit een ongelijkvloerse kruising voor het doorgaande verkeer en twee T-kruispunten of rotondes (zie Figuur 3.26).



FIGUUR 3.26: QUADRANTOPLOSSING

### *Kruispunten binnen de bebouwde kom*

Binnen de bebouwde kom hebben verreweg de meeste kruispunten de vorm van een T-kruispunt (81 %); het aandeel vierarmige kruispunten is 17 % [ASVV 2012]. Er is geen algemene voorkeur voor een van deze twee types. Wel bestaat er een aanwijzing dat de gemiddelde ernst van de ongevallen op T-kruispunten geringer is. In verband met het uitzicht verdient het aanbeveling de takken van een kruispunt haaks op elkaar aan te sluiten. Rotondes komen in Nederland steeds vaker als kruispuntoplossing voor (zie hierna).

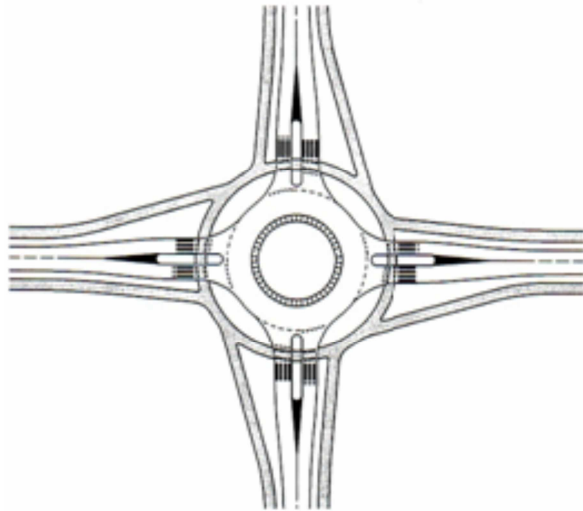
Naast rotondes wordt binnen de bebouwde kom een relatief grote verscheidenheid aan kruispuntvormen toegepast. In het ASVV 2012 staan 12 varianten van (gelijkwaardige) kruispunten en T-aansluitingen tussen erftoegangswegen en 5 varianten voor voorrangskruispunten voor toepassing op gebiedsontsluitingswegen (naast enkele rotondevarianten).

Wanneer de capaciteit van deze kruispuntvormen tekortschiet, dan komt het ongelijkvloers voeren van een of meer verkeersstromen over het kruisingsvlak heen of eronderdoor in aanmerking. In verband met het relatief geringe ruimtebeslag wordt dan meestal de Haarlemmermeeroplossing toegepast.

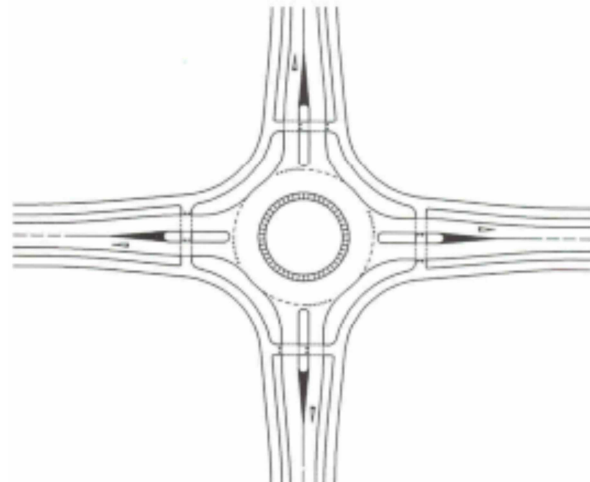
### *Rotondes*

De populariteit van de rotonde is vooral gelegen in de sterke reductie van de (ernstige) verkeersongevallen als gevolg van de afgedwongen snelheidsverlaging (zie volgende subparagraaf) en de relatief hoge capaciteit ten opzichte van traditionele kruispunten (al of niet voorzien van verkeersregelinstallaties). De rotonde is op grond van verkeersveiligheidsoverwegingen de

voorkeursoplossing voor aansluiting van gebiedsontsluitingswegen onderling (zowel binnen als buiten de bebouwde kom) en tussen gebiedsontsluitingswegen en erftoegangswegen type I (buiten de bebouwde kom). Daarnaast kan de rotonde ook binnen de bebouwde kom prima worden toegepast op aansluitingen van erftoegangswegen op gebiedsontsluitingswegen.



FIGUUR 3.28: ROTONDE MET VRIJLIGGEND FIETSPAD  
MET VOORRANG VOOR DE FIETS



FIGUUR 3.28: ROTONDE MET VRIJLIGGEND FIETSPAD  
MET VOORRANG VOOR DE AUTO

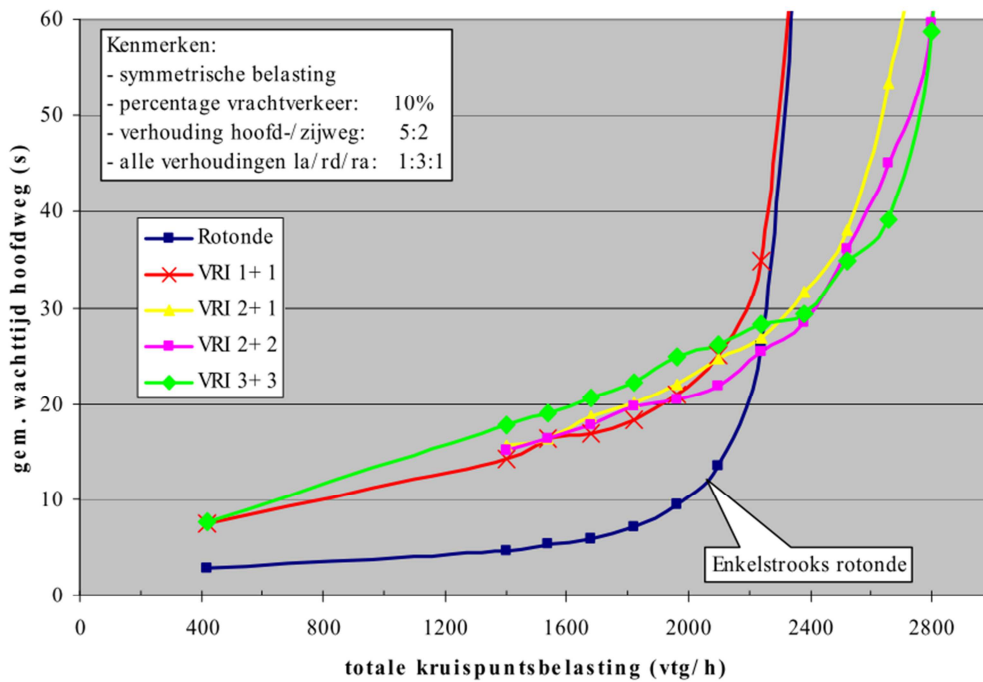
De meest toegepaste vorm is de enkelstrooksrotonde waarbij de toe- en afritten en de rijbaan uit één rijstrook bestaan. Rotondes met voorrang voor de fiets (Figuur 3.28) verhogen het comfort voor de fietsers, omdat zij maximaal één keer moeten stoppen en nauwelijks hoeven te wachten. Op rotondes zonder voorrang voor fietsers (Figuur 3.28) is de oversteekbaarheid voornamelijk afhankelijk van de hiaten in de stroom oprijdende en afslaande voertuigen, alsmede de snelheid van het afslaande verkeer en de aanwezigheid van een middengeleider. Het verkeer op de rotonde geniet in de meeste landen voorrang, zodat opstoppen op de rotonde worden voorkomen.

Een belangrijk punt van discussie is de vraag of het uit oogpunt van verkeersveiligheid niet wenselijker zou zijn fietsers geen voorrang te geven op rotondes. Vanwege de scherpe hoek tussen fietspad en afrit is het fietsgedrag door de autobestuurder moeilijk in te schatten is en de voorrang voor de fiets zou een verhoging van de ongevalkans betekenen. Onderzoek van de SWOV [Van Minnen, 1995] en in opdracht van het CROW heeft geleid tot de aanbeveling:

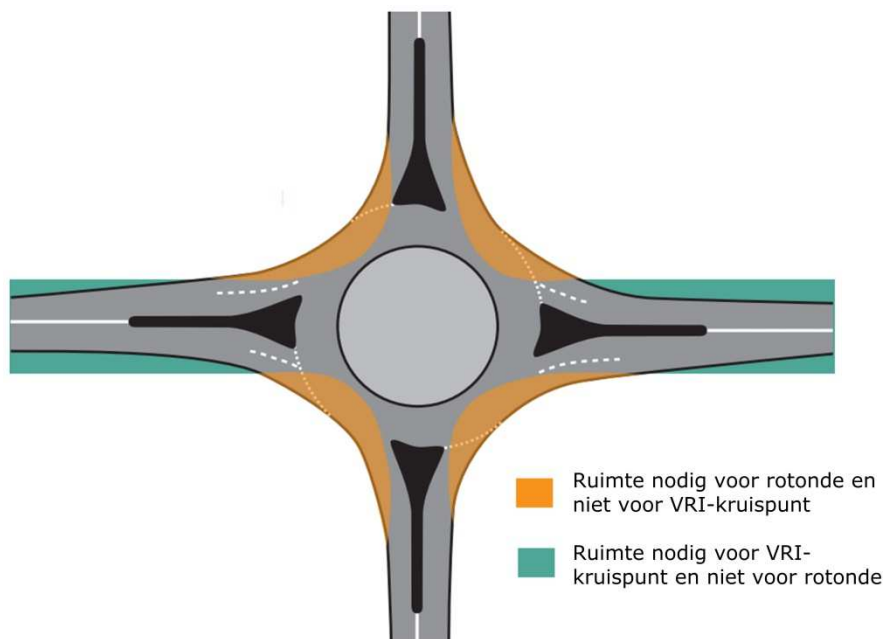
- binnen de bebouwde kom fietsers in de voorrang, voetgangers bij voorkeur vrije doorgang;
- buiten de bebouwde kom fietsers uit de voorrang en voetgangers geen vrije doorgang.

Een fietsstrook op de rotonde zelf is niet aan te raden omdat het risico van snijongevallen bij de afritten zeer hoog is. Deze aanbevelingen zijn ook opgevolgd in het ASVV en het Handboek Wegontwerp.

Uit microsimulatie blijkt dat de gemiddelde wachttijd op de hoofdweg van een rotonde in geval van een totale verkeersintensiteit op het kruispunt van minder dan 2200 vtg/h duidelijk minder te zijn dan van verschillende soorten met verkeerslichten geregelde kruispunten (Figuur 3.29). T.a.v. de verkeersveiligheid is het aantal slachtofferongevallen op 48 rotondes die sinds 1989 door de provincie Zuid-Holland werden aangelegd (fietsers uit de voorrang) gemiddeld met 81 % per jaar afgenomen. Het ruimtebeslag van de enkelstrooksrotonde is echter groter dan bij een door verkeerslichten geregeld kruispunt met twee opstelstroken (Figuur 3.30).



FIGUUR 3.29: VERLIESTIJDEN VOOR DE HOOFDSTROOM OP VRI-KRUISPUNTEN EN ENKELSTROOKSROTONDE (DE LEEUW, 2001)



FIGUUR 3.30: RUIMTEBESLAG VAN VRI-KRUISPUNT EN ENKELSTROOKSROTONDE

Voor dichtbebouwde gebieden met smal wegprofiel is de minirotonde ontwikkeld, die alleen maar bestaat uit een overrijdbaar middeneiland met een diameter van minimaal 4 m, een buitendiameter tussen de 13 en 25 m en zo mogelijk rechthoekige takken (Figuur 3.31). Voor auto's is een rijstrookbreedte van 4,50 m voldoende, terwijl vrachtwagen en bussen over het middeneiland moeten rijden. Daarom is de maximale hoogte van het overrijdbare deel beperkt tot 12 cm. De minirotonde is sinds 1996 met veel succes toegepast in een aantal steden in Nordrhein-Westfalen in Duitsland.



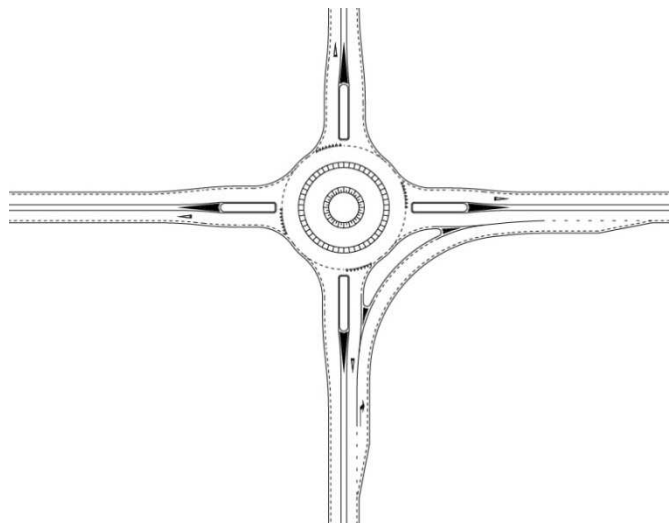
FIGUUR 3.31: MINI-ROTONDE MET OVERRIJDBAAR MIDDENEILAND

Naast enkelstrooksrotondes kunnen ook meerstrooksrotondes worden toegepast. Een enkelstrooksrotonde heeft de voorkeur uit oogpunt van verkeersveiligheid en daarom worden meerstrooksrotondes in principe alleen toegepast op plaatsen waar de capaciteit van enkelstrooksrotondes onvoldoende is. Meerstrooksrotondes kunnen in de volgende groepen worden ingedeeld:

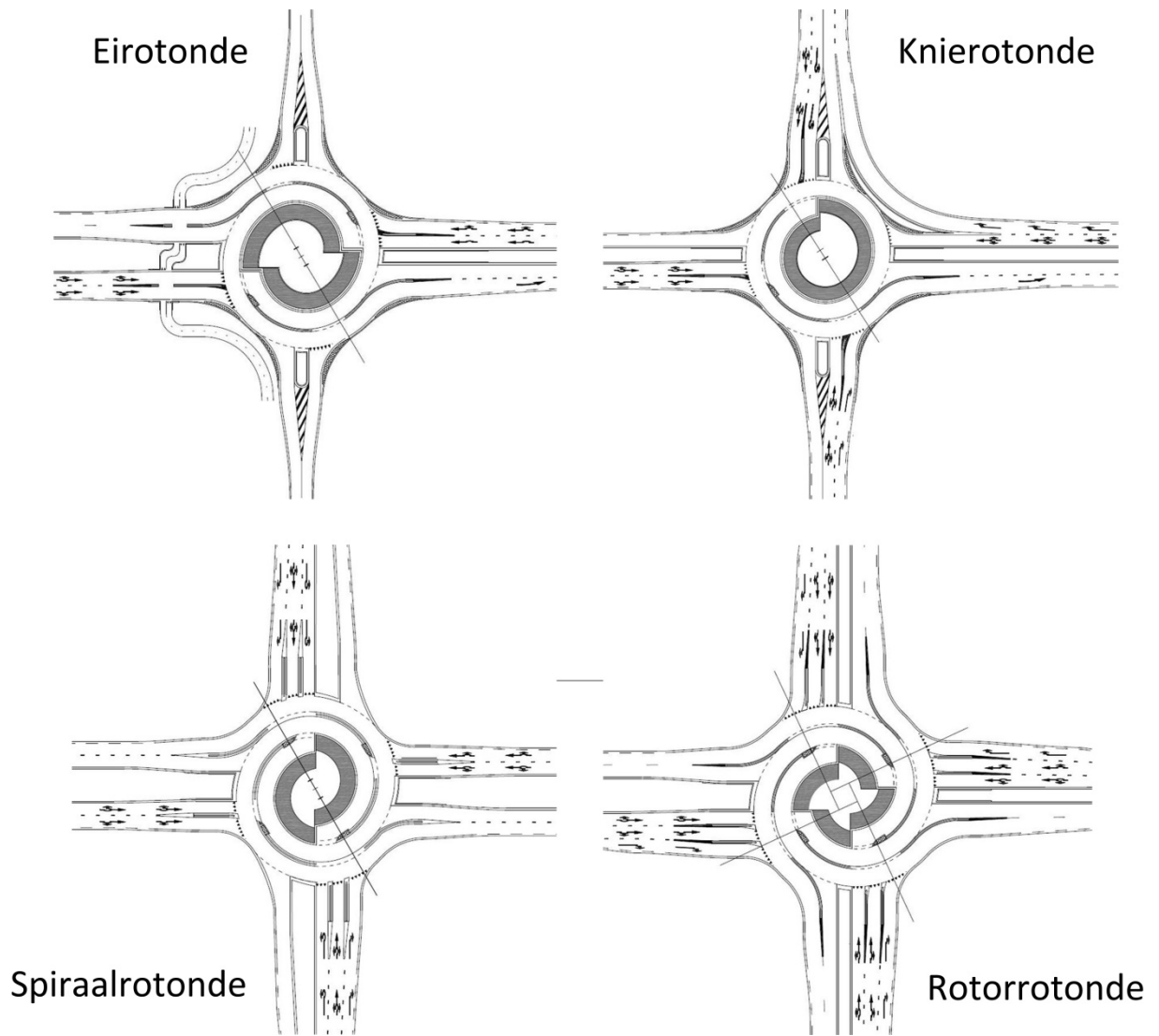
- meerstrooksrotondes met concentrische belijning
- passeerbaanrotondes
- turborotondes
- door verkeerslichten geregelde rotondes.

Meerstrooksrotondes met concentrische belijning hebben meestal twee en soms drie rijstroken en standaard enkelstrooksafritten, bij uitzondering tweestrooksafritten. Het bezwaar daarvan is dat de berijder van de linker aanvoerstrook op de rotonde op zeer korte afstand moet weven om de rotonde te kunnen verlaten. Bij toepassing van twee afvoerstroken ontstaat een ernstige conflictsituatie als de berijder van de buitenste rotondestrook toch de rotonde vervolgt in plaats van af te slaan. Meerstrooksrotondes met concentrische belijning worden in Nederland steeds minder toegepast; de ontwerprichtlijnen geven de voorkeur aan het toepassen van passeerbanen en turborotondes (zie hieronder).

Het capaciteitstekort op één of twee zwaar belaste takken van de rotonde kan door een extra passeerbaan (*bypass*) buiten de rotonde om worden opgevangen (Figuur 3.32). De uitmonding van de afzonderlijke strook moet echter circa 100 m doorlopen om veilig te kunnen invoegen.



FIGUUR 3.32: PASSEERBAANROTONDE



FIGUUR 3.33: VARIANTEN VAN DE TURBOROTONDE



FIGUUR 3.34: IR. L.G.H. FORTUINROTONDE N459/RIJKSWEG A12 TE REEUWIJK

De turborotonde, in 1996 ontwikkeld door ir. L. Fortuin, wordt gekenmerkt door toepassing van niet meer dan twee stroken op de rotonde en spiraalbelijning. Daarbij zijn verschillende varianten mogelijk, zoals eirotonde, knierotonde, spiraalrotonde en rotorrotonde (Figuur 3.33 en Figuur 3.34). De turborotonde voorkomt weven op de rotonde en één keuzestreek in elk segment waarop de weggebruiker kan kiezen om de rotonde te verlaten of te vervolgen.

Rotondes zijn vooral geschikt op plaatsen waar een snelheidsreductie bij de overgang van stroomwegen op gebiedsontsluitingswegen gewenst is, zoals aan de rand van de bebouwde kom of van verblijfsgebieden. De haalbare snelheid op een rotonde binnen de bebouwde kom dient uit veiligheidsoverwegingen zo dicht mogelijk bij de 30 km/h-grens te liggen, waardoor de kans op ernstig letsel bij een conflict sterk gereduceerd wordt.

Bij een gelijkmatige verdeling van de verkeersintensiteiten van de hoofd- en zijstromen bedraagt de capaciteit van de enkelstrooksrotonde ruim 2000 pae/h, terwijl de tweestrooksrotonde ongeveer 3000 pae/h kan verwerken [Harte,1997]. De capaciteit van de enkelstrooksrotonde ligt daarmee ruim 50 % boven een voorrangskruispunt en circa 30 % beneden een tweestrooksrotonde, waaruit volgt dat de rotonde een behoorlijke verhoging van de capaciteit en de veiligheid ten opzichte van een ongeregeld kruispunt met zich mee brengt, maar de capaciteitstoename en de ongevalkans van de meerstrooksrotonde tegenvallen. De capaciteit wordt beïnvloed door een aantal factoren zoals:

- intensiteit van het conflicterende verkeer,
- intensiteit van het afslaande verkeer dat niet de rijrichting aangeeft,
- intensiteit van overstekende fietsers en voetgangers,
- aantal rijstroken op de rotonde,
- aantal en breedte van de rijstroken op de toeritten,
- breedte van de middengeleider,
- gedrag van de weggebruikers (hiaatacceptatie, wacht- en volgtijden),
- weersomstandigheden.

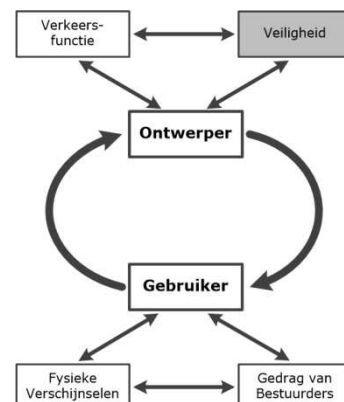
### 3.6.2 Veiligheid

In deze subparagraaf wordt ingegaan op twee veiligheidsaspecten die een belangrijke rol spelen op kruispunten. Dit zijn de ligging van de conflictpunten op het kruispunt en de zichtbaarheid van het kruispunt. Verder wordt ingegaan op de toepassing van de Duurzaam-Veilig-principes op kruispunten (zie ook Tabel 2.2).

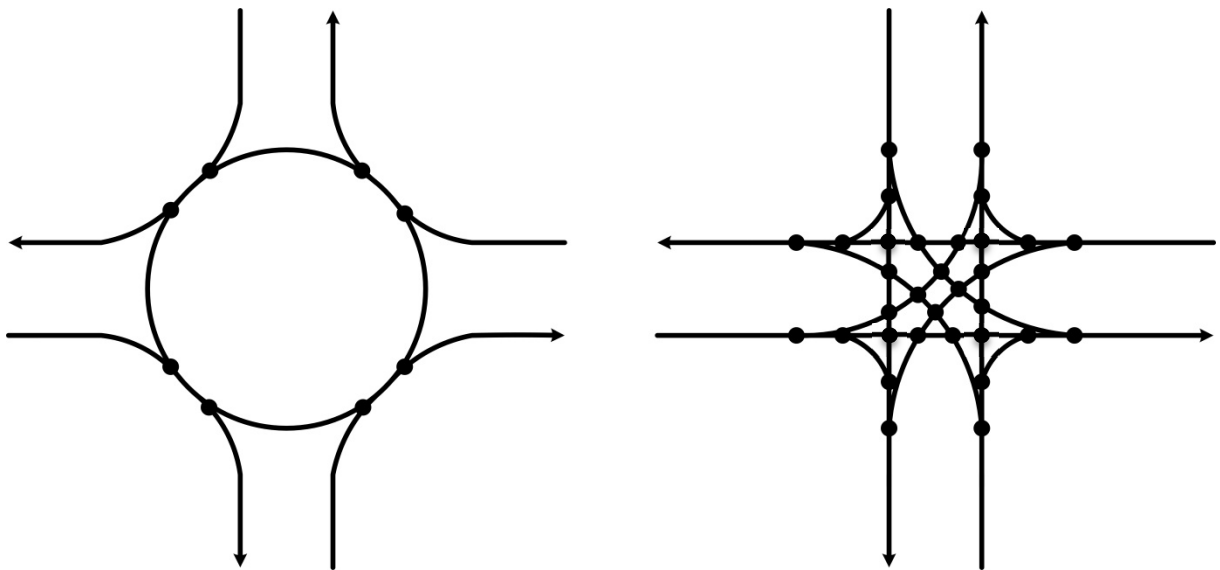
#### *Ligging conflictpunten*

Het aantal en de ligging van de conflictpunten bepaalt in hoge mate de overzichtelijkheid en de veiligheid van een kruispunt. Een conflictpunt is een punt waarop twee of meer rijlijnen van voertuigen elkaar kruisen. Dit zijn dus punten waar voertuigen uit verschillende richtingen elkaar kunnen raken.

Voor de veiligheid op een kruispunt is het van belang dat de bestuurder de conflictpunten duidelijk kan zien. Hij moet zich ervan bewust zijn op welke plaatsen hij met andere voertuigen in conflict kan komen. Het aantal en de ligging van conflictpunten verschilt per kruispunttype. Op een eenvoudig, gelijkvloers kruispunt liggen de conflictpunten vaak dicht bij elkaar in het midden van het kruispunt. Op een rotonde zijn de conflictpunten juist uit elkaar getrokken. Een rotonde vermindert het aantal conflictpunten van 32 tot 8 (Figuur 3.35).



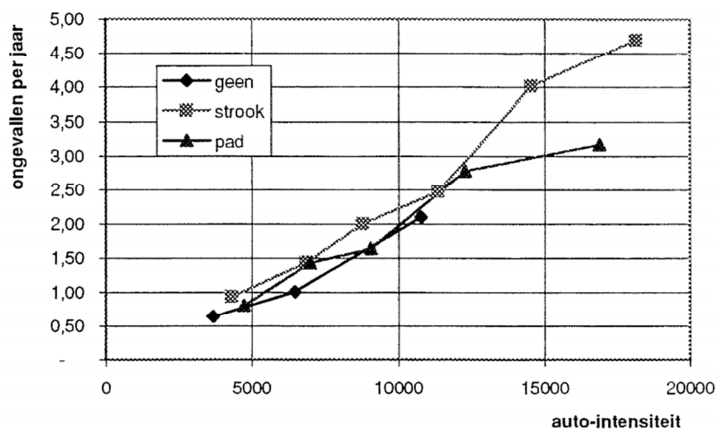




FIGUUR 3.35: CONFLICTPUNTEN OP ENKELSTROOKSROTONDES EN KRUISPUNTEN

Een tangentiële aansluiting van de toe- en afvoerstroken leidt door de krappe boogstralen tot een effectieve vermindering van de snelheid op de rotonde, waardoor de verkeersonveiligheid in vergelijking met ongeregelde en met verkeerslichten geregelde kruispunten met 50 à 70 % afneemt [SWOV 1993]. Daarom worden sinds het begin van de jaren tachtig in veel Europese landen binnen en buiten de bebouwde kom rotondes toegepast. Figuur 3.36 toont echter dat het aantal ongevallen stijgt met de intensiteit van het autoverkeer.

Aantallen ongevallen naar fietsvoorziening



FIGUUR 3.36: AANTALLEN ONGEVALLen PER JAAR ALS FUNCTIE VAN DE INTENSITEIT [VAN MINNEN, 1995]

### Zichtbaarheid

Een kruispunt behoort op voldoende grote afstand zichtbaar te zijn om het de verkeersdeelnemer mogelijk te maken zijn gedrag tijdig aan te passen aan de eisen die het kruispunt stelt. Daartoe is het nodig de verkeersdeelnemer te attenderen op de aanwezigheid van een kruispunt, (ruim) voordat hij eventuele kruisende voertuigen waarneemt, dat wil zeggen op een afstand groter dan de lengte van de zogenoemde anticipatieruimte. De zichtbaarheid van een kruispunt kan op verschillende wijzen worden verbeterd:

- door *stedenbouwkundige* maatregelen, zoals een plaatselijke verruiming van het profiel van de belendende bebouwing, een andere soort hoekbebouwing (winkels op hoeken!), een duidelijk verspringen in de goothoogte, een doorgaande laanbeplanting duidelijk onderbreken of met een andere soort beplanting afwisselen;

- door *verkeerstechnische* maatregelen, zoals de toeleidende straten iets hoger te leggen dan het kruispunt (10 à 20 cm), waardoor de onderbreking van de trottoirranden duidelijker zichtbaar wordt; het aanbrengen van verschillende soorten verhardingen op kruispunt en toeleidende wegen; het accentueren van het onderbreken van de trottoirrand door blokken, hekwerken;
- door *verkeerskundige* maatregelen, zoals het plaatsen van waarschuwborden, wegdekmarkeringen, bewegwijzering, het aanbrengen van verhoogde verkeersdruppels of -eilanden, waardoor het beeld van het wegprofiel wordt gewijzigd. Het is zelfs mogelijk met behulp van verkeersborden de aard van het kruisende verkeer aan te duiden (schoolkinderen, spoorwegovergang, fietsen, dieren).

### 3.6.3 Fysieke verschijnselen

De berijdbaarheid van het kruispunt of de rotonde is van groot belang. Alle voertuigen die het kruispunt of de kruising mogen passeren, moeten dit zonder problemen kunnen doen.

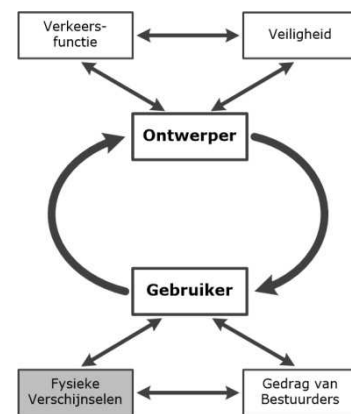
#### *Kruispunten*

Bij adequate voor-waarschuwing en voldoende uitzicht op de te kruisen weg mag men aannemen dat de "normale" bestuurder in staat is de nodige maatregelen te nemen om een botsing met een kruisend voertuig te vermijden en het kruispunt op een veilige wijze over te steken. Het berijden en ontruimen van het kruispunt zal in het algemeen bij rechtuit rijden geen moeilijkheden geven, indien het voorbij het kruispunt gelegen afrijvak vrij is (dus bushaltes, noch geparkeerde auto's). De tijd van ontruiming wordt bepaald door de rijsnelheid, respectievelijk het acceleratievermogen en de lengte van het voertuig.

Bij afslaan bewegingen wordt de snelheid beperkt door het nemen van de bocht. De grotere rolweerstand in de bocht veroorzaakt een geringere versnelling, terwijl de mogelijke maximumsnelheid beperkt wordt door de stabiliteit van het voertuig en het comfort van inzittenden en lading. De ontruimingstijd van een kruispunt wordt ongunstig beïnvloed door de geringe snelheid van het afslaan verkeer, in het bijzonder van het links afslaan verkeer. Vergroting van de boogstraal voor het links afslaan verkeer en daarmee gepaard gaande verhoging van de mogelijke maximumsnelheid doen de kruisingontruimingstijd weer afnemen. Een rechts afslaan voertuig kan alleen achterop worden gereden nadat het is afgeslagen. Als de cirkel van de trottoirband kleiner is dan de mechanisch kleinst mogelijke draaicirkel wordt het voertuig op de linkerrijstrook gedrongen, met de mogelijkheid van een frontale botsing. De minimum-stralen van de binnenbocht die een auto(achter)wiel kan beschrijven zijn:

- voor personenauto's:  $R_{min} = 6,00 \text{ m}$ ,
- voor vrachtauto's:  $R_{min} = 11,50 \text{ m}$ .

De uiteindelijke keuze van boogstralen is sterk afhankelijk van de betreffende situatie. Zo zal bij intensief verkeer en een groot percentage vrachtverkeer zonder meer uitgegaan moeten worden van laatstgenoemde boogstralen. Bij zeer geringe intensiteiten en nauwelijks vrachtverkeer is het echter niet bezwaarlijk dat een rechts afslaan vrachtauto over korte afstand de linkerweghelft gebruikt. Dan zijn relatief kleine boogstralen acceptabel. Een gebruikelijke minimumstraal in woonbuurten is 2 m.



### Rotondes

Het ruimtebeslag van een enkelstrooksrotonde (circa 1800 m<sup>2</sup>) is vanwege het middeneiland meer dan twee keer zo groot als een voorrangskruispunt (circa 800 m<sup>2</sup>), maar duidelijk minder dan een tweestrooksrotonde (circa 3000 m<sup>2</sup>). De ontwerpvariabelen van rotondes en de aanbevolen waarden staan in Tabel 3.10 vermeld.

Ontwerpvariabelen (m)	Enkelstrooks-rotonde	Tweestrooks-rotonde
<b>Binnendiameter</b>	13-30	24-80
<b>Buitendiameter</b>	25-40	44-108
<b>Rijbaanbreedte</b>	5-6	9-11
<b>Breedte overrijdbare strook</b>	2-3	5
<b>Afrondingboog toerit</b>	10-14	10-100
<b>Afrondingsboog afrit</b>	10-14	12-100
<b>Rijstrookbreedte toerit en afrit</b>	3-4	3-4.5
<b>Breedte middengeleider</b>	2-5	1.6-1.8
<b>Afstand oversteekplaats</b>	5-10	5-10

TABEL 3.10: AANBEVOLEN WAARDEN VOOR HET ONTWERP VAN ROTONDES

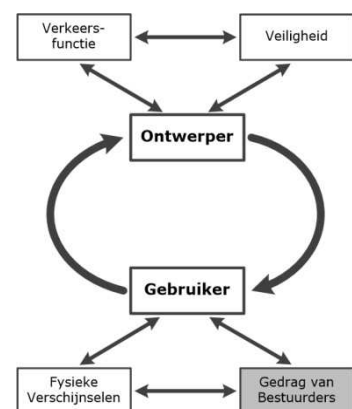
Indien de rotonde vaker door vrachtwagens wordt bereden, lijkt een minimale rijstrookbreedte van de toe- en afrit van 4,0 – 4,5 m beter te voldoen om schade aan de trottoirbanden te beperken.

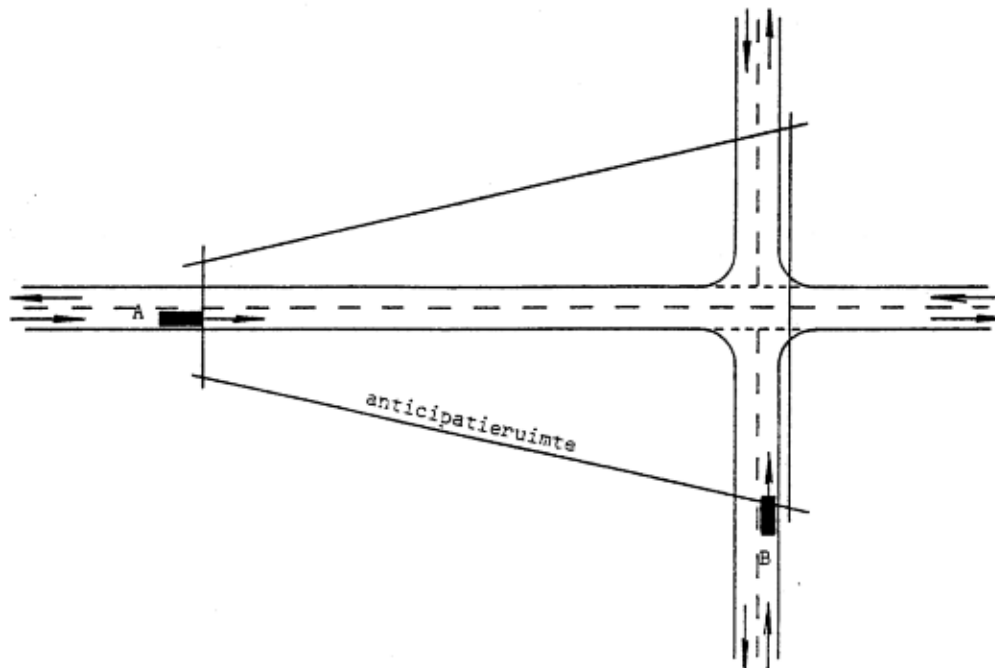
Bij het bepalen van de vormgeving van de rotonde moet naast de ontwerpsnelheid en capaciteit ook de bereikbaarheid door het maatgevende ontwerpvoertuig worden gegarandeerd. De rijstrook op de rotonde wordt om die reden van een verhoogde overrijdbare strook aan de binnenkant voorzien, zodat bussen en vrachtwagens daarvan gebruik kunnen maken zonder dat de auto's daaroverheen met een ongewenst hoge snelheid rijden. In het verleden werden op enkele plaatsen in Nederland mini-rotondes aangelegd met een binnendiameter van minder dan 12 m, waardoor gelede bussen en vrachtwagencombinaties in de knel kwamen.

#### 3.6.4 Gedrag van bestuurders

Het is van groot belang dat bestuurders het kruispunt of de rotonde goed kunnen overzien en ook begrijpen. Een van de aspecten is het oprijzicht, dat reeds uitgewerkt is in paragraaf 2.3.5. De overzichtelijkheid en begrijpelijkheid van het kruispunt is echter afhankelijk van meer aspecten dan het beschikbare oprijzicht.

Hoge snelheden op de hoofdweg zijn moeilijk in te schatten, evenals de afstanden waarop voertuigen zich bevinden. Voertuigen op de zijwegen kunnen een automobilist op de voorrangsweg enorme schrikreacties bezorgen indien zij met onverminderde snelheid op het kruispunt toe rijden om pas op het allerlaatste moment af te remmen. In dat geval kan zijn anticipatie, op grond van het gedrag van de kruisende auto, de automobilist op de voorrangsweg tot de conclusie leiden dat een botsing onvermijdelijk is. Een botsing zal optreden, indien de hoek van peiling ( $\alpha$ ) constant blijft (zie Figuur 3.37).





FIGUUR 3.37: ANTICIPATIERUIMTE VAN HET VOERTUIG A OP DE HOOFDWEG

In een vlak gebied met een ruime horizon is, bij een constante hoek van peiling, een kruisend voertuig bijzonder moeilijk waar te nemen. Het kruisende voertuig blijft in dat geval namelijk op dezelfde plaats in de voorruit; het voertuig lijkt in het landschap niet van plaats te veranderen; het wordt alleen groter bij het naderbij komen. Men kan dit probleem oplossen door het aanbrengen van coulissen in het landschap (bijvoorbeeld bomen langs de te kruisen weg). Doordat de bomen nu namelijk wegschieten ten opzichte van het kruisende voertuig, is de beweging van dit voertuig wel te zien.

Als maximale waarde voor de afstand waarop naderende voertuigen op een recht wegvak kunnen worden waargenomen, wordt 300 m aangehouden. Bij een snelheid van 100 km/h op de hoofdweg betekent dit een interval van circa 11 s. Voor een vrachtauto met aanhanger (18 m) is dit onvoldoende voor het uitvoeren van bijvoorbeeld een linksafbeweging vanaf de zijweg. Een goed onderling samenspel tussen bestuurders is dan noodzakelijk met een daarbij aangepaste rijnsnelheid van het verkeer op de hoofdweg.

Op kruispunten waar de voorrang niet met borden is geregeld, moeten de verkeersdeelnemers op alle toeleidende takken op dezelfde wijze naderen met een hoog attentieniveau (aangepast naderingsgedrag), zodat aan gemotoriseerd verkeer van rechts voorrang kan worden verleend. Als het past in het verwachtingspatroon en indien dit aan de weggebruikers voldoende duidelijk is te maken, kan theoretisch op alle toeleidende takken worden volstaan met de voor het oprijzichts opgegeven maat. Wanneer dit niet het geval is, moet de voorrang met borden worden geregeld.