

De flexibele rijbaanindeling

De mogelijkheid en gevolgen van een praktische
inpassing

Eindrapport

Delft, 16 juni 2014

Door:
Max van Rest
4159624

Begeleiders:
Dr. Victor L. Knoop
Ir. Paul B.L. Wiggendaad

Bachelor Eindwerk
Afdeling Transport & Planning
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
TU Delft

Voorwoord

Voor u ligt het rapport van mijn bachelor eindproject waarmee ik het bachelor gedeelte van de opleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit in Delft afrond. In een periode van ongeveer tien weken heb ik aan dit project gewerkt en deed dat voornamelijk in Delft, de stad waar ik studeer en nu ruim twee jaar woon. Tijdens deze weken heb ik niet alleen kennis gemaakt met het onderwerp van dit project, maar ook met alle aspecten van het universitair onderzoek doen. Deze hebben tot de nodige positieve en negatieve verrassingen geleid.

Ik heb onwijs veel bewondering voor mensen die oplossingen voor problemen bedenken die niet voor de hand liggen, uit een totaal nieuwe hoek komen en daardoor geniaal kunnen zijn. Ik heb het idee dat deze oplossingen vaak ontstaan wanneer er puur naar de basis van een probleem wordt gekeken en bekende oplossingen even aan de kant worden gezet. Omdat ik veel interesse heb in transport en planning ben ik gaan brainstormen over de huidige infrastructuur. Twee keer per dag, tijdens de spitsuren, zijn er veel meer weggebruikers dan de rest van de dag. Zouden we hierop kunnen anticiperen? Ik kreeg een prachtig idee waar nog nooit iemand aan gedacht kon hebben, dacht de naïeve ik, toen nog 20 jaar. De oplossing die ik bedacht bleek natuurlijk totaal geen nieuw idee te zijn en was al heel vaak onderzocht. Gelukkig bleven er, zoals bij vrijwel elk onderzoek, nog een aantal open vragen voor me over.

Voordat ik het onderzoek inleid, wil ik nog een aantal dingen kwijt over de TU Delft en voornamelijk haar medewerkers. Ik ben van mening dat de TU een uitstekende omgeving heeft om te studeren en te onderzoeken. De werksfeer is fantastisch en hoogleraren, afgestudeerden en studenten staan altijd open voor vragen, zelfs als ze dit veel tijd en moeite kost. Ik wil alle betrokkenen van dit project bedanken, waarvan drie personen in het bijzonder:

Dr. Victor L. Knoop, voor de begeleiding die vanaf de eerste dag zowel waardevol voor de totstandkoming van mijn rapport was als interessant en leerzaam voor mijzelf was en voor het altijd open staan voor vragen.

Ir. Paul B.L. Wiggenraad, voor de ondersteuning tijdens het kiezen van mijn projectonderwerp, voor de organisatorische begeleiding, voor de opbouwende kritiek na de tussenpeilingen en voor het altijd open staan voor vragen.

Ir. Jeroen P.T. van der Gun, voor de opbouwende kritiek na de tussenpeilingen en voor het altijd open staan voor vragen.

Delft, 16 juni 2014

Samenvatting

Een oplossing voor de relatief grote verkeersstroom in de spits op een autosnelweg is de flexibele rijbaanindeling waarbij er geschakeld kan worden tussen verschillende aantallen rijstroken. Er zijn verschillende onderzoeken gedaan naar de mogelijkheden hiervan. Dit onderzoek richt zich op de inpassing van en de gevolgen van de flexibele rijbaanindeling. Op deze manier worden een groot deel van de vragen beantwoord die werden opengelaten in andere onderzoeken.

De flexibele rijbaanindeling zal in dit rapport worden toegepast op een autosnelweg ter plaatse van een strookbeëindiging, waardoor er in de normale situatie een overgang van drie rijstroken naar twee rijstroken plaatsvindt. Wanneer de traditionele tweestrooks rijbaan opgedeeld is in drie rijstroken, zullen de breedtes van deze stroken smaller dan de richtlijnen zijn. Vanwege de verkeersveiligheid en doorstroming wordt er daarom een maximumsnelheid van 70 km/u toegepast bij een baanindeling met drie rijstroken. Gedurende de overige dagdelen zal de maximumsnelheid op 120 km/u worden gehouden.

De breedte van de rijstroken, het aantal rijstroken en de maximumsnelheid van 70 km/u hebben invloed op de capaciteit van de weg. De werkelijke capaciteit wordt in dit rapport benaderd met behulp van het fundamenteel diagram en een reductiefactor voor de smalle stroken uit de Highway Capacity Manual (2000). Ten opzichte van een traditionele tweestrooks autosnelweg heeft de autosnelweg met een flexibele rijbaanindeling een capaciteitswinst van 33,1 procent. Een uitbreiding naar een volwaardige, driestrooks autosnelweg zou daar nog 14,6 procent aan toevoegen. Door ruimtegebrek of andere belemmeringen is zo'n uitbreiding echter niet altijd mogelijk.

Het omschakelen van rijbaanindeling is alleen mogelijk wanneer er een gat in de verkeersstroom wordt gecreëerd door het verkeer tot stilstand te brengen of tijdelijk af te remmen met behulp van een volgauto. Een volgauto heeft een weglengte van ruim 2,5 kilometer nodig vóór het flexibele wegvak om het verkeer tijdig af te remmen en zo een gat in het verkeer te creëren dat groot genoeg is om van indeling te schakelen. Dit schakelen gebeurt per wegvak met een lengte van 300 meter.

Een werkelijke inpassing op de A4 ter hoogte van Leidschendam laat zien dat de toepassing van een flexibele rijbaanindeling een realistische manier is om de capaciteit van een autosnelweg aan te passen op de intensiteit van het verkeer.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	4
Inhoudsopgave	5
1. Inleiding	7
2. Literatuurstudie	9
2.1 Pilot Haalbaarheid Flexibele Rijbaan Indeling	9
2.1.1 Capaciteit	9
2.1.2 Verkeersveiligheid	9
2.1.3 Markering	10
2.1.4 Dwarsprofiel	10
2.1.5 Snelheid	10
2.2 Wat ontbreekt er nog in de onderzoeken?	11
2.2.1 Capaciteit	11
2.2.2 Markering	11
2.2.3 Moment van omschakelen	11
2.3 Welke aspecten worden in dit rapport behandeld?	11
3. Ontwerpschetsen	13
3.1 Buiten de spits	13
3.2 In de spits	13
4. Onderzoeksresultaten	14
4.1 Capaciteit	14
4.1.1 Twee rijstroken (120 km/u)	14
4.1.2 Drie rijstroken (70 km/u)	14
4.2 Volgauto	18
4.2.1 Van twee naar drie rijstroken	18
4.2.2 Van drie naar twee rijstroken	19
4.3 Filegolf	22
4.4 Moment van schakelen	22
4.4.1 Spits- en plusstroken	22
4.4.2 Flexibele rijbaanindeling	23
4.4.2 Schakelenmomenten gebaseerd actuele intensiteit	24
4.4.3 Omschakelen op vaste momenten	24
4.4.4 Schakelen tijdens congestie	25
4.5 Inpassing in de werkelijkheid: bottleneck A4 ter hoogte van Leidschendam	25
4.5.1 Overzicht situatie	26
5. Conclusie en aanbevelingen	29
5.1 Conclusies	29
5.2 Aanbevelingen	30
5.1.2 Aanbevelingen met betrekking tot het ontwerp van Rijkswaterstaat (2001)	30
5.2.2 Nader onderzoek	30
5.2.3 Vervanging van de volgauto	31

Literatuurlijst	32
Bijlagen	33
Bijlage I	33
Bijlage II	34
Bijlage II-1	34
Bijlage II-2	34
Bijlage III	36
Bijlage IV	37
Bijlage IV-1	37
Bijlage IV-2	37
Bijlage V	38
Bijlage V-1	38
Bijlage V-2	38
Bijlage VI	39
Bijlage VII	40

1. Inleiding

Het huidige infrastructuur wordt steeds interactiever. Verkeerslichten springen alleen op groen wanneer er automobilisten voor staan te wachten, maximum snelheden worden met behulp van matrixborden aangepast op de verkeersvraag en spitsstroken worden toegevoegd om extra capaciteit te bieden voor de relatief grote verkeersstroom in de spits. Er is echter meer mogelijk met de technieken die we tegenwoordig kennen. Zo wordt er momenteel veel onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van LED verlichting in het asfalt. 'De weg van de toekomst', de N329 in Oss, beschikt bijvoorbeeld al over LED verlichting die de automobilisten de snelheid van de groene golf aangeeft.

Ondanks de dagelijkse verbetering van de infrastructuur, ontstaat er tijdens de spitsuren nog steeds regelmatig congestie op de autosnelwegen terwijl er van dezelfde wegen relatief weinig gebruik wordt gemaakt gedurende de rest van de dag. Er zijn een aantal pogingen gedaan dit probleem te verhelpen. Zo wordt het reizen buiten de spits aantrekkelijker gemaakt zodat de intensiteitspieken in de spits worden verlaagd en worden er spits- en plusstroken toegepast om de wegcapaciteit in de spits te verhogen. Een andere toepassing om het probleem van congestie gedurende de spits te verhelpen is de flexibele rijbaanindeling.

Een flexibele rijbaanindeling geeft de mogelijkheid het aantal stroken aan te passen op de actuele verkeersvraag. Hierbij is een dynamische markering noodzakelijk. In maart 2001 werd het rapport *Pilot Haalbaarheid Flexibele Rijbaan Indeling* uitgegeven door Rijkswaterstaat. Geschat wordt een capaciteitswinst van 35 tot 40 procent te kunnen behalen met de toepassing van een flexibele rijbaanindeling.

De onderzoeken naar de flexibele rijbaanindeling zijn nog niet volledig. Er zijn nog een aantal gaten in de onderzoeken naar de flexibele rijbaanindeling die met dit rapport worden opgevuld. De hoofdvraag luidt als volgt:

Wat zijn de gevolgen van een flexibele rijbaanindeling en is een inpassing in de werkelijkheid hiervan realistisch?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden is er eerst een literatuurstudie gedaan. In hoofdstuk 2 'literatuurstudie' staan de beweringen, aannames en conclusies uit het rapport van Rijkswaterstaat opgesomd die van belang zijn op deze vervolgstudie. Om een goed beeld te krijgen van de flexibele indeling zijn er ontwerpschetsen gemaakt die in hoofdstuk 3 worden toegelicht. Hoofdstuk 4 bevat de resultaten van het onderzoek die een antwoord bieden op de hoofdvraag. Hierin wordt eerst de capaciteit berekend. Vervolgens

staan in dit hoofdstuk de berekeningen die betrekking hebben op de volgauto en het schakelmoment. Het hoofdstuk eindigt met een inpassing in de werkelijkheid om te laten zien hoe een flexibele rijbaanindeling uiteindelijk moet worden toegepast. Tenslotte zijn de conclusies en aanbevelingen te vinden in hoofdstuk 5.

2. Literatuurstudie

Dit hoofdstuk beschrijft wat er reeds bekend is en onderzocht is met betrekking tot de flexibele rijbaanindeling. Hieruit volgen een aantal aspecten die matig of überhaupt nog niet onderzocht zijn. Op die aspecten is dit onderzoek gericht. Dit hoofdstuk beschrijft eerst wat er bekend is over de flexibele rijbaanindeling uit andere onderzoeken.

2.1 Pilot Haalbaarheid Flexibele Rijbaan Indeling

In het rapport *Pilot Haalbaarheid Flexibele Rijbaan Indeling* (Rijkswaterstaat, 2001) wordt vermeld wat er bekend is uit onderzoeken uit het verleden en wat er onderzocht is over de flexibele rijbaanindeling door de onderzoekers van Rijkswaterstaat zelf. Hieronder staan kort de conclusies en aanbevelingen gericht op de capaciteit, de verkeersveiligheid, de markering, het dwarsprofiel en de snelheid.

2.1.1 Capaciteit

Op basis van onderzoek en expert-opinion wordt de capaciteit geschat op 6400 pae's/uur. Dit betekent een winst van 35 a 40% ten opzichte van een reguliere autosnelweg met twee stroken. Ten opzichte van een volwaardige uitbreiding naar drie stroken betekent dit een reductie van 12%.

2.1.2 Verkeersveiligheid

In het onderzoek van Rijkswaterstaat is gebleken dat een dynamische omschakeling van het dwarsprofiel onmogelijk is in vol verkeer. Dit is alleen mogelijk wanneer verkeer de verkeersstroom volledig wordt onderbroken of wanneer er een volgauto in wordt gezet. Een volgauto kan een gat creëren in de verkeersstroom waarin vervolgens in blokken van 300 meter kan worden omgeschakeld.

Bij langere wegvakken met een versmald profiel wordt een grotere rijtaakbelasting geschat. Op grond van een duurproef met een rijsimulator zal een verhardingsbreedte van 11,50 meter leiden tot een verhoogd risico.

Er zijn ook positieve effecten op de verkeersveiligheid te verwachten. Het voorkomen van congestie zal leiden tot een vermindering van het aantal ongevallen. Zo gaf de spitsstrook op de A28 een reductie van het aantal ongevallen van ongeveer 70%. Andere positieve effecten op de verkeersveiligheid zijn een homogener verkeersproces, een evenwichtiger verdeling van het verkeer over de rijstroken en een kleinere spreiding van de snelheid.

2.1.3 Markering

Er zijn naast de functionele eisen voor traditionele markering nog weinig eisen voor dynamische markering. Dit maakt het voor de industrie lastig om een levensvatbaar en verantwoord product te kunnen ontwerpen. Er zijn weliswaar enige experimenten in de praktijk verricht met dynamische markering, maar verder is er nog onvoldoende praktijkervaring.

De overige onzekerheden van de dynamische markering zijn:

- De snelheidshandhaving;
- de begrijpelijkheid;
- de handhaving breedtebeperking.

2.1.4 Dwarsprofiel

Bij het ontwerpen van het dwarsprofiel is Rijkswaterstaat er vanuit gegaan dat de flexibele rijbaanindeling zonder uitbreiding van de verharding op een bestaand wegvak kan worden toegepast. Een afbeelding van het dwarsprofiel zoals ontworpen door Rijkswaterstaat is te vinden in bijlage I.

2.1.5 Snelheid

De maximumsnelheden die worden aangeraden zijn 120 km/u buiten de spits, respectievelijk 70 km/u in de spits.

2.2 Wat ontbreekt er nog in de onderzoeken?

Uit het onderzoek van Rijkswaterstaat blijkt dat er weldegelijk markt is voor de flexibele rijbaanindeling. Indien het concept goed kan worden toegepast, heeft het genoeg positieve effecten. Echter ontbreekt er nog een praktische oplossing voor het concept. Dit komt omdat er nog onduidelijkheid bestaat over de markering en het moment van omschakeling tussen verschillende rijbaanindelingen. Ook zijn er vraagtekens rondom de capaciteit verschenen:

2.2.1 Capaciteit

Rijkswaterstaat heeft de capaciteit geschat op 6400 pae's per uur. Deze schatting is voornamelijk gebaseerd op bestaande situaties waar de rijstroken smaller zijn dan de Nederlandse richtlijnen. De smalste rijstrook van de flexibele indeling (2,25m) is echter een stuk smaller dan de smalste rijstrook uit de situaties die worden vergeleken (2,5m). Met behulp van extrapolatie wordt er vervolgens een schatting gemaakt. Maar eist een rijstrook met een breedte van slechts 2,25 meter niet speciale aandacht?

2.2.2 Markering

Er zijn verschillende pogingen gedaan een toepasbare dynamische markering te realiseren, maar hier zat nog geen ideaal systeem tussen. Daarom wordt er momenteel door veel verschillende partijen onderzoek gedaan naar een geschikt systeem voor de markering (Altena, 2002).

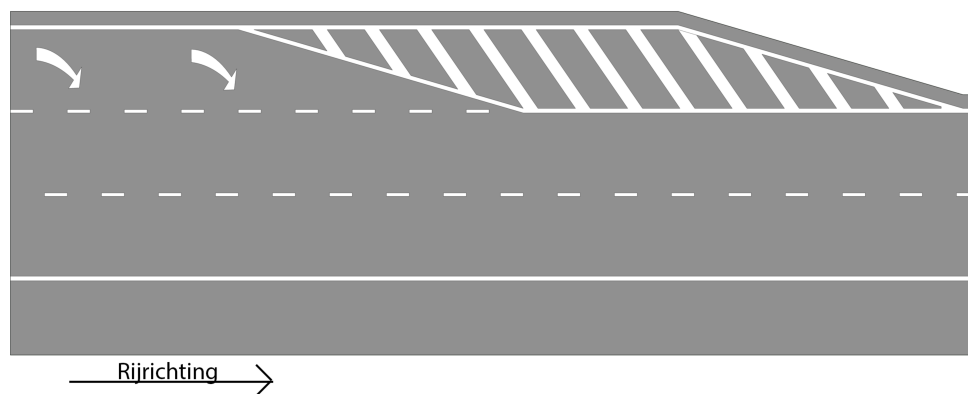
2.2.3 Moment van omschakelen

Uit het onderzoek van Rijkswaterstaat is duidelijk geworden dat het veranderen van de rijbaanindeling alleen mogelijk is wanneer het verkeer volledig wordt stilgelegd of wanneer er een volgauto wordt ingezet. Er is echter nog geen onderzoek gedaan naar hoe deze oplossingen in de praktijk kunnen worden toegepast en wat de gevolgen zullen zijn van deze toepassing.

2.3 Welke aspecten worden in dit rapport behandeld?

In dit onderzoek is er met behulp van berekeningen getracht een nieuwe capaciteitsschatting te maken van de flexibele rijbaanindeling. Vervolgens richt dit rapport zich op een praktische oplossing voor het moment van het aanpassen van de flexibele rijbaanindeling wanneer er gebruik wordt gemaakt van een volgauto. Voor de dynamische markering zal LED verlichting worden gebruikt. Deze keuze is gebaseerd op het onderzoek van Rijkswaterstaat. Omdat deze techniek al door verschillende fabrikanten wordt onderzocht en geoptimaliseerd wordt aan dit aspect in dit rapport geen aandacht besteed.

Congestie ontstaat vrijwel altijd op de hoogte van een invoegende verkeersstroom. Rijkswaterstaat heeft in het rapport een ontwerp gemaakt voor de toepassing van de dynamische markering op de locatie van een oprit. In dit rapport wordt er naar een punt gekeken wanneer een autosnelweg met drie rijstroken door een strookbeëindiging een autosnelweg met twee stroken wordt. Het figuur hieronder geeft deze situatie schematisch weer.



Figuur 2.1
Schematische
weergave
invoeging

3. Ontwerpschetsen

Het is van belang een goed beeld te krijgen van de flexibele rijbaanindeling en de toepassing ervan. Daarom zijn er een aantal schetsen gemaakt die als bijlagen zijn toegevoegd aan het rapport. Deze schetsen bevatten alleen de overgang van het traditionele wegvak naar het flexibele wegvak. De overgang aan het einde van het flexibele wegvak terug naar het traditionele zal afhangen van de situatie. Het flexibele wegvak kan namelijk eindigen wanneer er weer ruimte is voor drie volwaardige stroken, wanneer de baan wordt samengevoegd met een andere baan of wanneer er een grote uitvoegende stroom is en zo zijn er nog veel meer mogelijkheden.

3.1 Buiten de spits

Bijlage II-1 bevat een schets van de situatie buiten de spits. De drie stroken aan de linker zijde zijn volgens de NOA gedimensioneerd, de twee stroken aan de rechter zijde volgens de flexibele rijbaanindeling zoals Rijkswaterstaat deze heeft ontworpen. In de schets is de breedte-as uitgerekt ten opzichte van de lengte-as zodat de markering duidelijk zichtbaar is.

3.2 In de spits

Bijlage II-2 bevat een schets van de situatie in de spits. De drie stroken aan de linker zijde zijn volgens de NOA gedimensioneerd, de drie stroken aan de rechter zijde volgens de flexibele rijbaanindeling. Wederom is in deze schets de breedte-as uitgerekt ten opzichte van de lengte-as.

Deze ontwerpschetsen zullen in de volgende hoofdstukken worden gebruikt voor berekeningen en toepassingen.

4. Onderzoeksresultaten

Dit hoofdstuk beschrijft het onderzoek en geeft de resultaten. Om te bepalen op welke momenten er het best kan worden omgeschakeld van rijbaanindeling is het van belang kennis te hebben van een aantal aspecten:

- De capaciteit van beide rijbaanindelingen (4.1)
- De praktische toepassingen van de volgauto en de gevolgen daarvan (4.2)
- Het ontstaan van een filegolf en de gevolgen daarvan (4.3)

In hoofdstuk 4.4 wordt het beste schakelmoment bepaald met behulp van deze aspecten. Ten slotte geeft hoofdstuk 4.5 een inpassing in de bestaande infrastructuur om te laten zien dat een flexibele rijbaanindeling daadwerkelijk toepasbaar is en hoe dat in zijn werk gaat.

4.1 Capaciteit

De toepassing van een flexibele rijbaanindeling zorgt voor twee verschillende situaties met verschillende capaciteiten: een indeling met twee rijstroken en een indeling met drie rijstroken. Als eerste wordt de capaciteit bij een tweestrooks indeling, vervolgens de capaciteit bij drie rijstroken.

4.1.1 Twee rijstroken (120 km/u)

Wenselijk is dat beide stroken door vrachtwagens bereden kunnen worden, zodat inhalen of ruimte geven aan invoegend verkeer mogelijk te maken. De richtlijnen voor de breedte van de stroken volgens de NOA (tabel 7-12) zijn:

Redresseerstrook:	0,60m
Linker strook:	3,30m
Rechter strook:	3,30m
Vluchtstrook:	3,15m

Alle stroken zijn breder dan deze gegeven waardes. De strookbreedtes zullen hierdoor niet voor negatieve effecten op de capaciteit zorgen. De capaciteit van de stroken tezamen kan volgens de NOA worden aangenomen op 4326 mvt/u (15% vrachtverkeer).

4.1.2 Drie rijstroken (70 km/u)

Om de capaciteit van de autosnelweg te berekenen wanneer deze is onderverdeeld in drie rijstroken is er kennis nodig van twee aspecten, namelijk de capaciteit van een rijstrookstrook bij een maximumsnelheid van 70 km/u en de reductiefactor met betrekking op de smalle strookbreedtes.

Capaciteit van een rijstrook met 70 km/u

In de tabel die te vinden is in bijlage III (HCM, 1994) staan de intensiteiten voor verschillende afwikkelingsniveaus bij bepaalde snelheden. Te zien is dat de capaciteit bij 70 km/u 2200 a 2300 pae/u is. Het is echter opvallend dat deze waarde voor elke maximum snelheid geldt. Gezien het fundamenteel diagram waarbij er maar voor één snelheid de maximale capaciteit haalbaar is, zijn deze waardes discutabel en is nader onderzoek wenselijk.

De capaciteit van een rijstrook bij 70 km/u is te bepalen met behulp van het fundamenteel diagram. Dit diagram is met de volgende gegevens te schetsen:

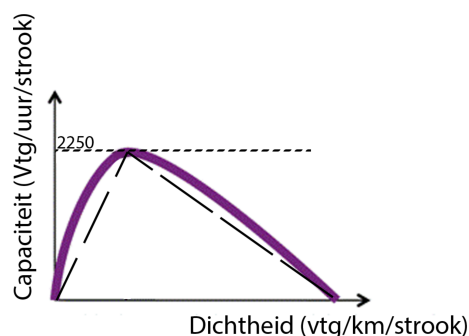
- De maximale capaciteit van een rijstrook is ongeveer 2250 pae/u (Van Lint, Van Ness, Sanders, Wiggenraad, 2011).
- Deze capaciteit wordt behaald bij een snelheid rond de 85 a 90 km/u (Idem)
- De lijn tussen de maximale capaciteit en de maximale dichtheid heeft een richtingscoëfficiënt van ongeveer -18 (Hoogendoorn, Lint, Schreiter, Yuan, 2009)

De capaciteit van een rijstrook met 70 km/u wordt voor twee situaties berekend: Bij de eerste situatie is er vanuit gegaan dat de maximale capaciteit bereikt wordt bij een snelheid van 85 km/u, bij de tweede situatie is er een snelheid van 90 km/u gebruikt. De schetsen van het fundamenteel diagram zijn in bijlage IV te vinden.

In bijlage IV-1 staat een schets van het fundamenteel diagram wanneer er gebruik wordt gemaakt van een maximale capaciteit bij een snelheid van 85 km/u. In werkelijkheid bestaat het fundamenteel diagram uit een kromme zoals te zien is in afbeelding 4.1. In de schetsen is dit versimpeld met rechte lijnen zodat met behulp van goniometrie de capaciteit en dichtheid is te benaderen bij 70 km/u: de capaciteit is 2162 pae/u met een dichtheid van 31 pae/km.

Wanneer we uitgaan van een optimale capaciteit bij een snelheid van 90 km/u ziet het diagram er uit zoals te zien is in bijlage IV-2. De capaciteit is dan 2148 pae/u. De dichtheid blijft 31 mvt/km.

De gemiddelde maximale capaciteit bij 70 km/u van berekende capaciteiten wordt 2155 pae/u. Deze waarde zal iets lager zijn dan de werkelijke capaciteit omdat de werkelijke kromme in het fundamenteel diagram is geschematiseerd met rechte lijnen die de kromme als het ware 'afsnijden', zoals in de figuur hiernaast is te



Figuur 4.1 Fundamenteel diagram (paars, dik) met schematisering (zwart, stippellijn)

zien. De werkelijke capaciteit zal echter onder de maximale capaciteit van 2250 pae/u liggen.

De capaciteit zal dus tussen 2155 en 2250 pae/u liggen. Voor de berekeningen die hierop volgen wordt er daarom aangenomen dat de 2200 pae/u bedraagt.

Reductiefactor strookbreedte

Het dwarsprofiel van de flexibele rijbaanindeling met driestroken bevat erg smalle stroken. Deze zullen resulteren in een reductie van de maximale capaciteit bij een volwaardig dwarsprofiel. In de HCM (2000) is de volgende formule gegeven voor de reductiefactor met betrekking tot de strookbreedte:

EXHIBIT 16-7. ADJUSTMENT FACTORS FOR SATURATION FLOW RATE ^a			
Factor	Formula	Definition of Variables	Notes
Lane width	$f_w = 1 + \frac{(W - 3.6)}{9}$	W = lane width (m)	W ≥ 2.4 If W > 4.8, a two-lane analysis may be considered

Figuur 4.2 Formule voor reductiefactor volgens de Highway Capacity Manual (2000)

Er moeten een aantal opmerkingen worden gemaakt over deze formule. In de formule wordt gebruik gemaakt van de strookbreedte uit de Amerikaanse richtlijnen voor autosnelwegen: 3,6 meter. In Nederland wordt volgens de NOA een strookbreedte van 3,5 meter toegepast. Dit passen we aan in de formule.

Ook is er te zien dat deze formule geldt voor een strookbreedte van 2,4 meter of breder terwijl er in de flexibele rijbaanindeling een strookbreedte van 2,25 meter is toegepast. Omdat 2,4 meter in verhouding met 3,6 meter relatief weinig verschilt met 2,25 meter in verhouding met 3,5 meter (3,6%) zullen we toch deze formule gebruiken. Daarnaast is de gemiddelde voertuigbreedte in de Verenigde Staten groter dan die in Nederland, waardoor verondersteld kan worden dat het rekenen met iets kleinere waardes dan 2,4 toelaatbaar is.

Totale capaciteit drie stroken

Met de berekende capaciteit en reductiefactor kunnen we het werkelijke aantal motorvoertuigen per uur per rijstrook en vervolgens de totale capaciteit van de rijbaan bepalen. De linker rijstrook zal niet beschikbaar zijn voor vrachtverkeer. Het aantal motorvoertuigen per uur zal hier dus gelijk zijn aan het personenauto-equivalent per uur. De middelste en rechter rijstrook zijn wel toegankelijk voor vrachtverkeer. Volgens de richtlijnen van de NOA moet er rekening worden gehouden met 15% vrachtverkeer. De berekening voor de werkelijke capaciteit is als volgt:

- Capaciteit linker strook (2,25m breed)

$$\text{Reductie factor: } tw = 1 + (2,25 - 3,5) / 9 = 0,86$$

$$\text{Capaciteit} = 0,86 * 2200 = 1894 \text{ vtg/u}$$

- Capaciteit middelste en rechter rijstrook (3m breed)

Hier wordt rekening gehouden met 15% vrachtverkeer:

$$C' = C / \{1 + (f_{pae} - 1) * (\%va)\} \quad (\text{NOA})$$

C = capaciteit in pae/h

C' = capaciteit in mvgt/h

f_{pae} = pae-waarde

$\%va$ = aandeel vrachtverkeer

$$C' = 2200 / \{1 + (1,5 - 1) * (0,15)\} = 2047 \text{ vtg/u}$$

$$\text{Reductiefactor: } tw = 1 + (3 - 3,5) / 9 = 0,94$$

$$\text{Werkelijk capaciteit} = 0,94 * 2047 = 1932 \text{ vtg/u}$$

Totale capaciteit van de rijbaan met drie rijstroken =

$$1894 + 2 * 1932 = 5760 \text{ vtg/u}$$

Dit betekent een winst van 33,1% op de capaciteit ten opzichte van twee rijstroken en een verlies van 14,6% ten opzichte van een volwaardige driestrooks autosnelweg. Er is echter nog geen rekening gehouden met het moment van schakelen.

4.2 Volgauto

Dit hoofdstuk bevat de berekeningen die betrekking hebben op de volgauto. De stappen die moeten worden ondernomen voor het schakelen zijn als volgt:

1. De volgauto begint met signalering.
2. De volgauto remt af.
3. De volgauto houdt de lagere snelheid aan tot er genoeg ruimte is om te kunnen schakelen.
4. Zodra er een verkeersinterval van 300 meter is ontstaan kan er worden overgeschakeld naar de andere rijbaanindeling.

De maximumsnelheid voor vrachtauto's is wettelijk bepaald op 80 km/u (RVV 1990). Het verkeersinterval zal ontstaan tussen het verkeer achter de volgauto en het langzaamste voertuig voor de volgauto. Die zal met een snelheid van ongeveer 80 km/u rijden.

Om het overzichtelijker te maken zijn de verschillende snelheden als volgt met verschillende kleuren aangegeven:

120 km/u = 33,33 m/s

80 km/u = 22,22 m/s

70 km/u = 19,44 m/s

Bij onderstaande berekeningen maken we gebruik van een remvertraging van 1,5 m/s². Volgens de NOA (2010) is dit een comfortabele remvertraging.

4.2.1 Van twee naar drie rijstroken

Voor het schakelen van twee naar drie rijstroken worden de besproken stappen als volgt genomen:

1. Volgauto begint met signalering

De volgauto wacht nog met afremmen tot het voor iedere automobilist helder is dat hij of zij achter de volgauto moet blijven rijden. Hier wordt 10 seconde voor uitgetrokken. De afgelegde afstand in deze periode is:

$$10 * 33,33 = 333,3 \text{ meter}$$

2. Volgauto remt af van 120 km/u naar 70 km/u

Zolang de volgauto 80 km/u (= 22,22 m/s) of harder rijdt zal er nog geen interval ontstaan vanwege het 80 km/u rijdende vrachtverkeer.

Het afremmen van 120 km/u naar 80 km/u:

Tijd van afremmen: $(33,33 - 22,22) / 1,5 = 7,4$ seconde.

Afgelegde afstand: $((33,33 + 22,22) / 2) * 7,4 = 205,6$ meter

De volgauto blijft nu afremmen tot **70 km/u**. Vanaf nu ontstaat er een gat in de verkeersstroom.

Het afremmen van **80 km/u** naar **70 km/u**:

Tijd van afremmen: $(22,22 - 19,44) / 1,5 = 1,9$ seconde

Afgelegde afstand: $((22,22 + 19,44) / 2) * 1,9 = 38,6$ meter

De afgelegde afstand van het verkeer vóór de volgauto in dezelfde tijd bedraagt $22,22 * 1,9 = 42,2$ meter.

De ontstane ruimte is $42,2 - 38,6 = 3,6$ meter.

3. Volgauto behoudt de snelheid (70 km/u)

Voor het switchen naar de andere rijbaanindeling is 300 meter tussenruimte nodig. Er is dus nog 296,4 meter extra nodig.

De voorlopers rijden 10 km/u ($= 2,78$ m/s) harder dan de volgauto.

De 300 meter tussenruimte zal worden bereikt in:

$$296,4 / 2,78 = 106,7 \text{ seconde}$$

De volgauto heeft in deze tijd $28,0 * 19,44 = 2074,3$ meter afgelegd.

4. Omschakelen van rijbaanindeling per wegvak van 300 meter.

De minimale totale tijd van het voorbereidingsproces vóór het omschakelen bedraagt:

$$10 + 7,4 + 1,9 + 106,7 = \underline{126 \text{ seconde}}$$

De minimale totale afgelegde afstand van de volgauto vóór het omschakelen bedraagt:

$$333,3 + 205,6 + 38,6 + 2074,3 = \underline{2651,8 \text{ meter}}$$

4.2.2 Van drie naar twee rijstroken

Om te kunnen schakelen van drie naar twee rijstroken zal er wederom een tussenruimte van 300 meter moeten worden gecreëerd. Het verkeer afremmen gebeurt nog voor het weggedeelte met de dynamische indeling. De maximumsnelheid is hier de reguliere snelheid op autosnelwegen, 120 km/u. Met deze snelheid zal de volgauto volgens dezelfde stappen werken als bij de omschakeling van twee naar drie rijstroken.

Wanneer er een zeer hoge dichtheid is op de weg, zal het snelheidslimiet van 70 km/u op het dynamische weggedeelte effect hebben op het verkeer op het weggedeelte voorafgaand aan het dynamische weggedeelte. Met onderstaande berekeningen gaan we uit van dit slechtste geval waarbij het verkeer op de reguliere driestrooks autosnelweg ook een snelheid van 70 km/u heeft aangenomen.

Om een interval te creëren zal het verkeer moeten worden afgeremd tot een lagere snelheid dan 70 km/u. Deze snelheid zal invloed hebben op de tijd en afstand van de volgauto voor het schakelen. We nemen aan dat al het verkeer 70 km/u rijdt in de beginsituatie. Het verband komt dan als volgt tot stand:

t_s = Tijd van signaleren

v_o = Snelheid van het verkeer in beginsituatie (m/s)

v_n = Snelheid waar het verkeer naar wordt afgeremd (m/s)

a_{rem} = Remvertraging (m/s²)

Δ = Benodigde interval (m)

Stappen:

1. Tijd van signaleren = t_s
 Afgelegde afstand = $t_s * v_o$

2. Tijd van afremmen: $T_{rem} = \frac{v_o - v_n}{a_{rem}}$
 Afgelegde afstand: $X_{rem} = \frac{v_o + v_n}{2} * T_{rem}$
 = $\frac{v_o^2 - v_n^2}{2 a_{rem}}$
 Ontstane ruimte = $v_o * T_{rem} - X_{rem}$

3. Extra ruimte nodig = $\Delta - v_o * T_{rem} - X_{rem}$
 Tijd hiervoor nodig: $T_{vn} = \frac{\Delta - v_o * T_{rem} - X_{rem}}{v_o - v_n}$
 Afgelegde afstand: $X_{vn} = T_{rem} * v_n$

Uit bovenstaande gegevens volgen de formules voor de totale afgelegde afstand en de totale tijd:

Totale afgelegde afstand

$$= t_s * v_0 + \frac{v_0^2 - v_n^2}{2 a_{rem}} + \frac{v_n(v_n - v_0)}{2 a_{rem}} + \frac{\Delta * v_n}{v_0 - v_n} \text{ (m)}$$

Totale tijd

$$= \frac{\Delta}{v_0 - v_n} + \frac{v_0 - v_n}{2 a_{rem}} + t_s \text{ (s)}$$

In dit onderzoek zijn er al een aantal gegevens bekend:

$$t_s = 10$$

$$v_0 = 19,44$$

$$a_{rem} = 1,5$$

$$\Delta = 300$$

De formule voor de totale afgelegde afstand wordt dan:

$$= 10 * 19,44 + \frac{19,44^2 - v_n^2}{3} + \frac{v_n(v_n - 19,44)}{3} + \frac{300 * v_n}{19,44 - v_n} \text{ (m)}$$

En voor de totale tijd:

$$= \frac{300}{19,44 - v_n} + \frac{19,44 - v_n}{3} + 10$$

De grafieken van bovenstaande formules zijn te vinden in bijlage V.

Het is praktisch om voor beide schakelingen een even grote afgelegde afstand van de volgauto te hebben, zodat de volgauto voor beide situaties op hetzelfde startpunt kan beginnen. In dat geval moet de schakeling van drie naar twee stroken ook 2652 meter zijn. Met de formule voor de totale afgelegde afstand is nu de snelheid te berekenen waarnaar de volgauto zal moeten afremmen (v_n).

$$10 * 19,44 + \frac{19,44^2 - v_n^2}{3} + \frac{v_n(v_n - 19,44)}{3} + \frac{300 * v_n}{19,44 - v_n} = 2652$$

$$v_n = 17,3 \text{ m/s}$$

$$(\text{= } 62,3 \text{ km/u})$$

Deze waarde ligt net boven de 60 km/u. Wanneer de volgauto afremt naar 60 km/u zal de totale afstand wat minder zijn dan de totale afstand bij het schakelen van twee naar drie stroken. De totale afgelegde afstand van de volgauto zal dan 2044 meter worden.

4.3 Filegolf

Als gevolg van het afremmen van het verkeer zal er achter de volgauto een filegolf ontstaan. Dit kan gepaard gaan met een stroomopwaarts bewegende schokgolf waardoor de capaciteit zal dalen tot de filegolf is opgelost. Indien er vroegtijdig wordt geschakeld zal dit probleem minder groot zijn dan wanneer er pas geschakeld wordt bij een relatief hoge I/C-verhouding. Een vroegtijdige schakeling brengt wel het nadelige gevolg met zich mee dat de reistijden van automobilisten langer worden.

4.4 Moment van schakelen

In dit hoofdstuk wordt een keuze gemaakt voor het moment van schakelen tussen de verschillende baanindelingen. Hiervoor zijn de reglementen die gelden bij het open- en dichtstellen van plus- en spitsstroken geraadpleegd. Deze hebben namelijk ook het doel de grotere verkeersstroom in de spits op te vangen door ze op bepaalde momenten te openen of te sluiten.

4.4.1 Spits- en plusstroken

Bij spits- en plusstroken zijn er drie verschillende criteria die bepalen of de strook wordt opengesteld of niet (Rijkswaterstaat, 2007):

- Verkeersintensiteit
Dit criterium bepaalt voor de meeste spits- en plusstroken of deze kunnen worden opengesteld of niet. Bij een I/C ratio die groter is dan 0,8 is er een aanzienlijke kans op filevorming. Voor 2007 werd bij een intensiteit van 1500 vtg/uur de spitsstrook opengesteld. De I/C-ratio is dan 0,7. In 2007 is besloten om een intensiteit van 1350 vtg/uur aan te houden omdat dit gunstig blijkt te zijn voor de doorstroming van het verkeer. De IC-ratio is dan ongeveer 0,6.
- Vaste gesloten periode
Spitsstroken hebben naast het eerste criterium ook vaste sluitingstijden. Tussen 23.00 uur en 6.00/7.00 uur veroorzaakt een spitsstrook te veel geluid en wordt daarom gesloten gedurende dit tijdsinterval.
- Weersomstandigheden
Voordat een spits- of plusstrook wordt opengesteld, wordt de strook eerst met camera's nagekeken op stilstaand verkeer of andere objecten die voor gevaar kunnen zorgen. Slechte

weersomstandigheden kunnen ervoor zorgen dat er onvoldoende zicht is voor deze camera's. De spits- en plusstroken zullen dan gesloten blijven.

4.4.2 Flexibele rijbaanindeling

De drie criteria die gelden voor spits- en plusstroken zullen ook aannemelijk zijn voor de flexibele rijbaanindeling, maar dan met enkele aanpassingen vanwege de negatieve gevolgen van het omschakelen.

- Verkeersintensiteit

Daar waar het openstellen van spits- en plusstroken weinig tot geen nadelen heeft met betrekking tot de capaciteit en de doorstroming, zal het schakelen bij een dynamische rijbaanindeling resulteren in een filegolf, een lagere maximumsnelheid en tijdelijk een nog lagere snelheid achter de volgauto. Hierdoor is het schakelen minder aantrekkelijk dan bij spits- en plusstroken.

De volgende handelingen zijn wenselijk:

- Zo min mogelijk schakelmomenten per dag. Er zullen maximaal vier schakelmomenten per dag zijn, voor en na de ochtend- en avondspits. Wanneer de intensiteit tijdens een spitsperiode relatief laag is, zal het schakelen naar drie stroken meer nadelen hebben (langere reistijden en extra schakelmomenten) dan voordelen.
- Als er moet worden omgeschakeld, zal dit het verkeer het minst hinderen wanneer dit gedaan wordt voordat er een hoge dichtheid is.
- Zo kort mogelijke periodes met drie stroken en een snelheidslimiet van 70 km/u. Wanneer het snelheidslimiet 70 km/u is, worden de reistijden langer dan wanneer dit 120 km/u is. Daarnaast is, gezien de smalle strookbreedtes, de indeling in twee stroken veiliger voor het verkeer. Dit betekent dat er, in tegenstelling tot de vorige wens, er pas bij een hoge dichtheid omgeschakeld dient te worden.

De laatste wens wordt boven de tweede wens verkozen met de volgende reden: De periode met een snelheidslimiet van 70 km/u zal dan weliswaar iets langer worden, maar het aantal automobilisten die dankzij deze verlenging een langere reistijd krijgen is relatief klein in vergelijking met het aantal automobilisten die door een eventuele filegolf na omschakelen bij een hoge dichtheid een langere reistijd krijgen.

Bij een I/C verhouding van hoger dan 0,8 is er kans op congestie. Een lagere waarde zal over het algemeen voor een goede verkeersafwikkeling zorgen (Daamen, Goemans, Heikoop, 2011). Om er zeker van te zijn dat de dichtheid laag genoeg is om het

omschakelen soepel te laten verlopen is een I/C verhouding van 0,7 een goede keuze. De intensiteit is op dat moment ongeveer 3000 vtg/u.

- Vaste gesloten periode
In 2011 heeft Rijkswaterstaat besloten bepaalde spitsstroken permanent open te stellen. Uit onderzoek blijkt namelijk dat de geluidstoename ten gevolgen van de openstelling van spits- en plusstroken bijna verwaarloosbaar klein is. Vaste sluitingstijden hoeven, gezien dit feit en het feit dat bij drie stroken de relatief lage maximum rijsnelheid voor minder geluidsbelasting zal zorgen, ook bij de flexibele rijbaanindeling niet te worden hoeven toegepast.
- Weersomstandigheden
Doordat de spitsstrook behouden blijft tijdens het schakelen zal camerabewaking niet noodzakelijk zijn. De LED verlichting heeft positieve effecten op de zichtbaarheid van de markering bij slecht weer.
Omdat de verkeersveiligheid door de smalle stroken afneemt is het te overwegen om bij gladheid de flexibele indeling op twee stroken te houden.

4.4.2 Schakelenmomenten gebaseerd actuele intensiteit

Als men wil schakelen wanneer er een bepaalde intensiteit is bereikt, moet er worden rekening gehouden met het feit dat de intensiteit op een weg niet geleidelijk aan toe- of afneemt. Dit gebeurt met pieken en dalen. Er moet één keer voor en één keer na een spits worden geschakeld en niet bij elke uitschietende intensiteitswaarde. Dit kan worden voorkomen door bijvoorbeeld de gemiddelde intensiteit over een periode zoals een kwartier te nemen. Hoe korter deze periode, hoe gevoeliger het systeem is voor uitschieters, maar hoe langer deze periode is, hoe minder nauwkeurig het systeem is. Schakelen kan dan te vroeg of te laat gebeuren.

Dit probleem doet zich uiteraard ook voor bij plus- en spitsstroken. Het is aan te raden om hetzelfde algoritme te gebruiken als daar is toegepast zodat dit probleem ook bij de flexibele rijbaanindeling te verhelpen.

4.4.3 Omschakelen op vaste momenten

Wanneer er gebruik wordt gemaakt van de actuele intensiteit zal dit resulteren in verschillende tijdstippen van schakelen. Dit betekent dat er rond de spits altijd een volgauto klaar zal moeten staan om direct te kunnen handelen en dat de intensiteit nauwlettend in de gaten zal moeten worden gehouden. Dit is inefficiënt en zal extra arbeidsuren kosten.

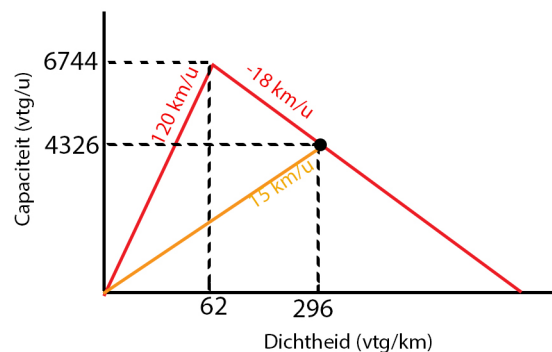
Schakelen op vaste tijdstippen zal dit probleem verhelpen. Met meetgegevens die zijn verworven door detectielussen is het mogelijk een verwachting van de intensiteit over de dag op te stellen. Hieruit kunnen de tijdstippen worden gehaald waarbij er verwacht wordt dat de intensiteit de

schakelintensiteit zal over- of onderschrijden. Hierdoor weet de bestuurder van de volgauto en overige betrokkenen precies wanneer zij aan de slag moeten gaan en zal een groot deel van de arbeidskosten bespaard blijven.

4.4.4 Schakelen tijdens congestie

Het kan voorkomen dat er vanwege de bottleneck al sprake is van congestie voordat er naar de spitsindeling wordt geschakeld. De snelheid is dan laag en zal wederom nog lager moeten worden om een gat voor het schakelen te creëren.

De intensiteit op de autosnelweg vóór het wegvak met de flexibele indeling zal dan gelijk zijn aan de capaciteit van de twee rijstroken van de flexibele indeling: 4326 vtg/u. De snelheid zal hierdoor worden verlaagd naar 15 km/u. (Zie het onderstaande fundamenteel diagram)



Figuur 4.3

Fundamenteel diagram voor het schakelen tijdens congestie

De formules die in hoofdstuk 4.2 zijn opgesteld geven voor deze situatie een snelheid van 13,5 km/u om over dezelfde afgelegde afstand van de volgauto het gat te creëren. Het is praktischer om de volgauto pas later te laten starten en te laten afremmen naar een lagere snelheid. Zo hoeft de bestuurder van de volgauto niet 2,5 kilometer lang met lage snelheid te rijden. Een mogelijke optie is:

- Afremmen tot 10 km/u
- Afgelegde afstand van de volgauto: 644 meter
- Duur: ongeveer 4 minuten.

4.5 Inpassing in de werkelijkheid: bottleneck A4 ter hoogte van Leidschendam

In dit hoofdstuk is te zien hoe een flexibele rijbaanindeling is in te passen in de werkelijkheid. Driestrooks autosnelwegen met een snelheidslimiet van 120 km/u die door middel van een strookbeëindiging overgaan in twee stroken zijn in Nederland alleen te vinden op plaatsen waar de intensiteit laag genoeg is om congestie te vermijden. Er zijn echter wel situaties waar een snelheidslimiet van 100 km/u is toegepast, terwijl er ontworpen is op een snelheidslimiet van 120 km/u. Omdat de intensiteit de laatste jaren boven de ontwerpcapaciteit is gestegen is Rijkswaterstaat genoodzaakt de maximumsnelheid te verlagen. Dit geeft wel degelijk aan dat zo'n strookbeëindiging een problematische situatie is. Door toepassing van een flexibele rijbaanindeling is een verlaging van de maximumsnelheid op deze wegen alleen in de spits noodzakelijk.

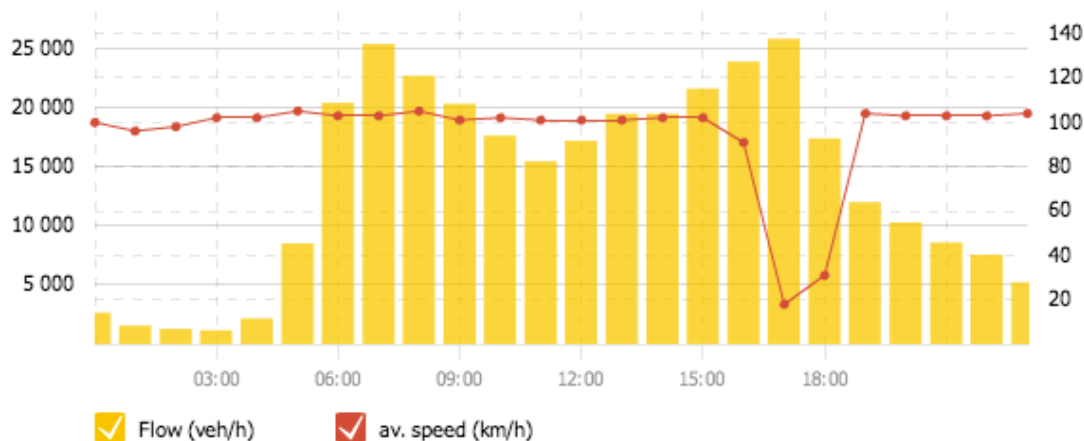
In dit hoofdstuk kijken we naar de A4 ter hoogte van Leidschendam richting Amsterdam. Dit is echter geen ideale situatie om een flexibele rijbaan in te passen: Er is maar net genoeg ruimte voor de volgauto om het verkeer af te remmen, in het wegvak waar wordt afgeremd bevindt zich een afrit en het wegvak met twee stroken (waarop een flexibele rijbaanindeling zal worden toegepast) is vrij kort. Toch kiezen we deze locatie om te laten zien dat een flexibele rijbaanindeling niet alleen toepasbaar is op een ideale situatie.

Er is geen uitgebreid onderzoek gedaan naar de locatie, waardoor het niet duidelijk is of de flexibele rijbaanindeling werkelijk verbetering zal zijn voor deze locatie. Er is bijvoorbeeld kort na het gekozen weggedeelte een overgang van vier naar drie rijstroken. Daardoor is er een kans dat met de inpassing van de flexibele indeling alleen het probleem wordt verschoven. Dit hoofdstuk laat echter wel zien dat het absoluut geen slecht idee is om een flexibele indeling te overwegen voor deze locatie en voor soortgelijke locaties.

Overzicht situatie

In deze situatie hebben we te maken met het knooppunt Prins Clausplein en de aansluiting met de N14 waaronder zich een autosnelweg met drie stroken bevindt. Het knooppunt en de aansluiting hebben geen invloed op de verkeersstroom op deze stroken omdat de rangeerbaan het invoegende verkeer opvangt. Na de aansluiting met de N14, voordat de rangeerbaan aan de driestrooks autosnelweg wordt toegevoegd, is er sprake van een strookbeëindiging. Hierop volgt een wegvak van 500 meter met twee rijstroken. In bijlage VI is het betreffende weggedeelte en de op- en afritten afgebeeld. Het groene weggedeelte beschikt over drie rijstroken en de oranje gedeeltes over twee. Het rode gedeelte geeft de bottleneck weer, waar één strook wordt beëindigd.

Aan gemeten data van verkeerslussen vlak voor de strookbeëindiging is te zien dat er over het algemeen weinig congestie optreedt ten gevolge van de bottleneck. (jaargemiddelde, www.regiolab-Delft.nl) Toch zijn er verschillende weekgemiddelden die aangeven dat er weldegelijk kans is op congestie. In afbeelding 4.4 is een voorbeeld te zien van een gemiddeld flow-speed diagram van een week uit maart 2014 (www.regiolab-Delft.nl). Te zien is dat er twee pieken in de flow zijn, tijdens de ochtend- en middagspits. Ook is er aan de gemiddelde snelheid te zien dat de middagspits voor congestie heeft gezorgd. Een flexibele rijbaanindeling kan er wellicht voor zorgen dat deze congestie ten gevolge van de bottleneck nooit meer zal voorkomen.



Figuur 4.4 Weekgemiddelde capaciteit en snelheid A4 vlak voor de bottleneck.

De intensiteitspieken liggen rond de 25000 vtg/u (som van gemiddelden over een week). Op één dag is dit is gemiddeld 3571 vtg/u. Normaal gesproken zou er bij zo'n piek geen flexibele rijbaanindeling worden toegepast, omdat het de kleine duur van eventuele files wenselijker is dan de nadelige gevolgen van de flexibele rijbaanindeling. Mocht er toch gestreefd worden naar een

geheel filevrije situatie kan er gekozen voor een inpassing van de flexibele rijbaanindeling.

Inpassing

Ter hoogte van de strookbeëindiging begint het wegvak met de flexibele indeling zoals we in hoofdstuk 3 'Ontwerpschetsen' hebben ontworpen (zie bijlage II-1). 500 meter verder, wanneer de andere rijbaan is toegevoegd, zal het wegvak met de flexibele indeling ophouden. Wanneer de flexibele baanindeling twee rijstroken bevat, is deze overgang alleen een geleidelijke verbreding van de stroken. In de spits, wanneer het flexibele wegvak in drie stroken is opgedeeld, zal na toevoeging van de rangeerbaan eerst de smalle linker strook worden beëindigd waarna de twee overige stroken worden verbreed tot ze aansluiten op het traditionele dwarsprofiel.

Omschakelen

Er dient omgeschakeld te worden bij een intensiteit van 3000 vtg/u (hoofdstuk 4.4.1). Dit is gelijk aan 21000 vtg/u over een week gezien. In het flow/speed diagram is te zien dat er rond 6:30u, 8:30u, 15:00u en 18:00u geschakeld dient er worden.

Het wegvak met drie stroken vóór het wegvak met de flexibele indeling is 2700 meter lang. Dit is net iets meer dan de benodigde 2652 meter. De volgauto dient dus direct na de samenvoeging van de tweestrooks rijbanen te beginnen met signaleren.

Bebording

Er bevinden zich in de huidige situatie al meerdere matrixborden boven het gedeelte met drie stroken voor de bottleneck. Deze kunnen gebruikt worden om de wisselende maximumsnelheid aan te geven.

Wat levert het op?

Na het overschakelen is de capaciteit van dit gedeelte van de A4 5760 vtg/u. De I/C verhouding gedurende spitspieken zal rond de 0,6 liggen. Met die I/C ratio is er een goede verkeersafwikkeling. Verkeer dat 70 km/u rijdt zal maar 8 seconden langer over de 500 meter doen dan verkeer dat 100 km/u. De winst op de reistijd die wordt gemaakt door toepassing van een maximumsnelheid van 120 km/u op de overige weggedeeltes en het voorkomen van congestie zal veel groter zijn.

Kosten

Naast de aanlegkosten van het flexibele wegvak, zullen ook de kosten tijdens de levenstijd van de weg hoger zijn dan bij een traditioneel wegvak. De LED verlichting vergt goed onderhoud, defecten zouden namelijk voor grote problemen kunnen zorgen. Ook het inzetten van een volgauto zal dagelijks voor extra kosten zorgen.

5. Conclusie en aanbevelingen

Dit hoofdstuk bevat de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek. De onderzoeksvraag is beantwoord, maar er blijven nog een aantal onzekerheden over die nader onderzoek noodzakelijk maken voordat een flexibele rijbaan werkelijk kan worden ingepast.

5.1 Conclusies

Dit onderzoek heeft tot een aantal conclusies geleid. Deze geven antwoord op de hoofdvraag van dit onderzoek:

Wat zijn de gevolgen van een flexibele rijbaanindeling en is een inpassing in de werkelijkheid hiervan realistisch?

De conclusies hebben betrekking tot de capaciteit, een praktische inpassing en de nadelen van de flexibele rijbaanindeling:

Capaciteit

Toepassing van een flexibele rijbaanindeling geeft een capaciteitswinst van 33,1 procent wanneer deze wordt toegepast op een autosnelweg met twee stroken. Deze winst is iets minder dan Rijkswaterstaat (2002) schatte, maar alsnog noemenswaardig. Vergeleken met een volwaardige uitbreiding naar drie stroken heeft het flexibele wegvak 14,6 procent minder capaciteit.

Praktische inpassing

Een praktische inpassing van de flexibele rijbaanindeling is goed mogelijk. De toepassing van LED verlichting in de rijbaan maken de dynamische markering mogelijk. Het schakelen wordt geleid door een volgauto. Deze zal een gat in het verkeer creëren waarin geschakeld kan worden per wegvak van 300 meter. Hier zal ongeveer een ruimte van ongeveer 2,7 km voor nodig zijn voorafgaand aan het wegvak waar de flexibele indeling is toegepast. De volgauto zal worden ingezet op vaste tijdstippen die uit meetwaarden van verkeerslussen in de weg kunnen worden bepaald.

Nadelen van de flexibele rijbaanindeling

Uit het literatuuronderzoek en dit onderzoek blijkt dat de flexibele rijbaanindeling ook nadelen met zich meebrengt:

- De smalle stroken zorgen voor een afname van de verkeersveiligheid.

- De aanlegkosten, gebruikskosten en onderhoudskosten van een flexibel wegvak zullen hoger zijn dan die van het traditionele wegvak.
- De lage maximumsnelheid van 70 km/u resulteert in langere reistijden wanneer er onnodig wordt geschakeld.
- Indien er al sprake is van congestie wanneer er geschakeld wordt naar de spitsindeling, zal het verkeer naar een nog lagere snelheid moeten worden afgeremd om een gat te creëren. Dit heeft negatieve gevolgen voor de doorstroming en reistijden.

5.2 Aanbevelingen

Er dienen een aantal aanbevelingen gemaakt te worden die volgen op dit onderzoek. Deze bestaan uit aanbevelingen die betrekking hebben op het ontwerp van Rijkswaterstaat, aanbevelingen over nader onderzoek en een kleine toekomstvisie rondom de volgauto.

5.1.2 Aanbevelingen met betrekking tot het ontwerp van Rijkswaterstaat (2001)

Rijkswaterstaat constateert dat er een verkeersinterval van 300 meter moet worden gecreëerd zodat er per wegvak met een lengte van 300 meter geschakeld kan worden. In theorie zou dit precies passen, maar in werkelijkheid kan dit voor onduidelijkheid zorgen voor de automobilisten direct achter de volgauto. Zij zullen namelijk vlak voor het flexibele wegvak pas de nieuwe indeling te zien krijgen en moeten hier snel op reageren. Ook een automobilist uit het verkeer vóór de volgauto kan hier problemen mee hebben wanneer hij of zij een lagere snelheid heeft dan wordt verwacht van de langzaamste automobilist. Het is daarom een betere keuze om het eerste wegvak met een dynamische indeling een kleinere lengte te geven dan 300 meter. Het verkeersinterval wordt door het verschil in maximumsnelheden van het verkeer voor en achter de volgauto steeds groter, waardoor het tweede wegvak wel een lengte van 300 meter kan hebben.

Rijkswaterstaat heeft het dwarsprofiel zo ontworpen dat de middelste en rechter rijstrook beide toegankelijk zijn voor vrachtverkeer. Hierdoor krijgt de linker rijstrook een breedte van slechts 2,25 meter. Wellicht heeft dit meer negatieve gevolgen voor de doorstroming dan wanneer het vrachtverkeer alleen van de rechter rijstrook gebruik zou kunnen maken. De linker rijstrook zou op die manier een stuk breder kunnen worden ontworpen wat aanzienlijk zal schelen in de doorstromingen en verkeersveiligheid.

5.2.2 Nader onderzoek

Er zijn verschillende onderzoeken gedaan naar de gevolgen van een gereduceerde strookbreedte. Sommige onderzoeken geven zulke negatieve resultaten voor de snelheid die automobilisten zullen aannemen dat een flexibele indeling met een dwarsprofiel zoals Rijkswaterstaat heeft ontworpen onmogelijk naar behoren kan functioneren.

FOSIM smalle rijstroken en 80 km/u zones (Hoogendoorn, Daamen 2007)

In dit onderzoek is er met behulp van simulatie een verband tot stand gekomen tussen de laterale afstand en de gemiddelde snelheid die door automobilisten daarbij wordt aangenomen. Dit verband is weergegeven in bijlage VII. Volgens de grafiek zal een strookbreedte die zorgt voor een kleinere laterale afstand dan ongeveer 0,8 resulteren in een lagere snelheid dan 70 km/u (=19,4m/s). De rekenwaarde voor de breedtes van voertuigen is volgens de NOA (95-percentiel-waarde):

Personenauto's: 1,77m

Vrachtwagens: 2,60m

Uit de voertuigbreedtes en strookbreedtes volgt dat de laterale afstand wanneer er een personenauto en twee vrachtwagens naast elkaar rijden veel lager is dan 0,8. De snelheid van 70 km/u zal dan niet haalbaar zijn.

Veiligheid Spitsstroken en Plusstroken (RWS, 2003)

Rijkswaterstaat heeft een simulatorstudie gedaan naar smalle dwarsprofielen en kwam met de conclusie dat vooral oudere automobilisten moeite hebben met het rijden in rijstroken smaller dan 2,75 meter, zelfs met een rijnsnelheid van 70 km/u. Ook blijkt de gemiddelde weggebruiker het risico van de smalle rijstroken niet goed te kunnen inschatten en daardoor harder rijdt dan verantwoord is.

5.2.3 Vervanging van de volgauto

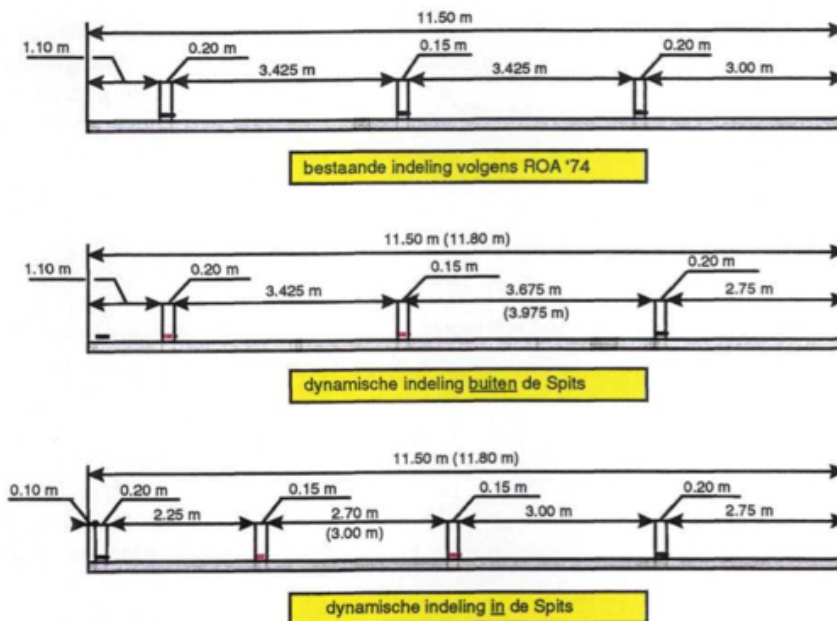
Wellicht is het in de toekomst mogelijk het schakelen zonder volgauto te laten gebeuren, bijvoorbeeld door snelheden aan te geven met de dynamische markering. Zo kan het systeem volledig geautomatiseerd worden wat zal leiden tot een verlaging van de arbeidskosten en een optimaal gebruik van de flexibele rijbaanindeling. Ook zelfbesturende auto's waar momenteel veel onderzoek naar wordt gedaan kan een mogelijke uitkomst bieden.

Literatuurlijst

- Altena, H.W. van (2002). Kennisinventarisatie Instrumentatie Flexibele Rijbaanindeling. Rotterdam: AVV
- Daamen, W., Goemans, J.W., & Heikoop, H. (2011) Handboek Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen (CIA).
- Hoogendoorn, S. P., & Daamen, W. (2007). FOSIM smalle rijstroken en 80 km/u zones: modelontwikkeling, kalibratie en validatie. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Hoogendoorn, S. P., Lint, J.W.C. van, Schreiter, T., Yuan, Y. (2009). Propagation Wave Speed Estimation of Freeway Traffic with Image Processing Tools.
- Lint, J.W.C. van, Ness, R. van, Sanders, F.M., & Wiggeraad, P.B.L. (2011). Dictaat CT2710 Transport & Planning. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (1990). Reglement verkeersregels en verkeerstekens (RVV 1990), Artikel 22.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2007). Schultz neemt besluit voor verruimde openstelling 51 spitsstroken. Verkregen van www.rijksoverheid.nl (geraadpleegd op 06-06-14).
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2011). Verruiming openstelling spitsstroken. Verkregen van www.rijksoverheid.nl (geraadpleegd op 06-06-14).
- Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2001). Haalbaarheid Pilot Flexibele Rijbaan Indeling. Rotterdam: AVV.
- Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2007). Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen. Rotterdam: AVV.
- Transportation Research Board (1994). Highway Capacity Manual. Washington DC: National Research Council.
- Transportation Research Board (2000). Highway Capacity Manual. Washington DC: National Research Council.

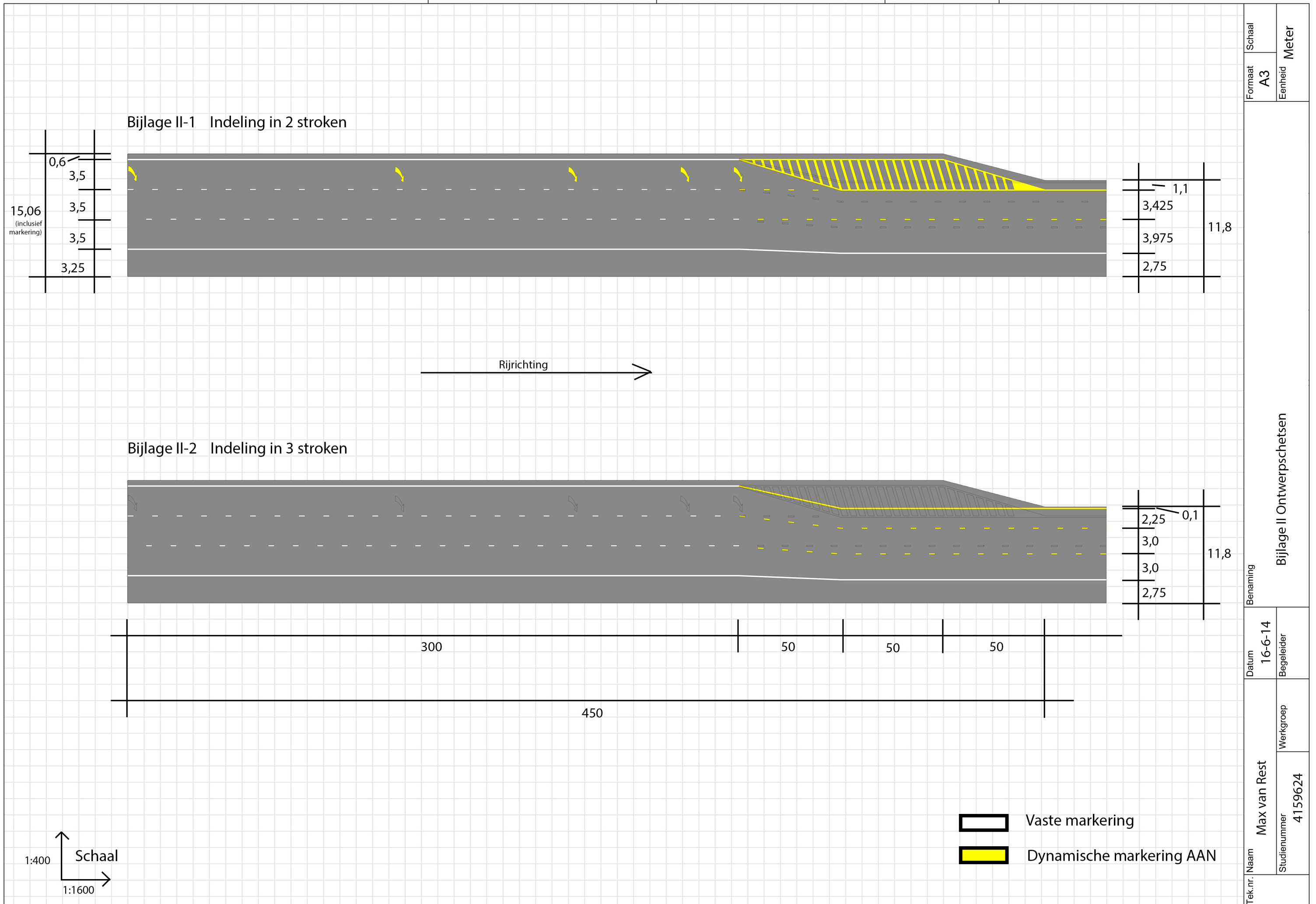
Bijlagen

Bijlage I



Figuur 7.1 Dwarsprofiel flexibele rijbaanindeling (Rijkswaterstaat 2001)

De getallen tussen haakjes zijn de breedtes die nodig zijn wanneer de middelste rijstrook toegankelijk moet zijn voor vrachtverkeer. Rijkswaterstaat besluit deze waarden aan te nemen omdat het gewenst is om vrachtverkeer de mogelijkheid te geven in te halen of uit te wijken bij een grote invoegende stroom.



Bijlage III

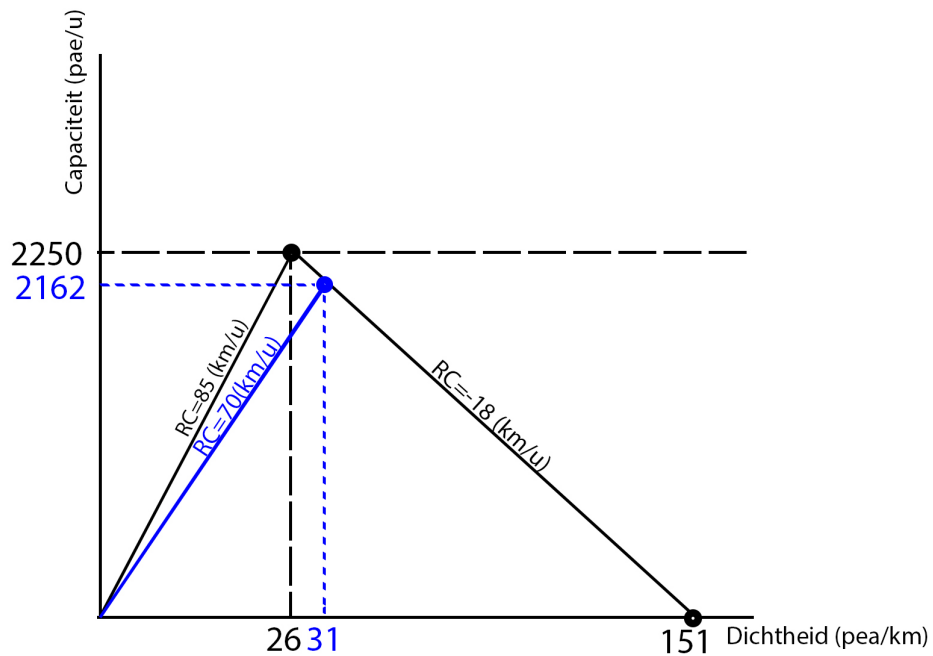
BASIC FREEWAY SECTIONS				
LEVEL OF SERVICE CRITERIA FOR BASIC FREEWAY SECTIONS				
LEVEL OF SERVICE	MAXIMUM DENSITY (PC/M/LN)	MINIMUM SPEED (MPH)	MAX SERVICE FLOW RATE (PCPHPL)	MAXIMUM W/C RATIO
FREE-FLOW SPEED = 70 MPH				
A	10.0	70.0	700	0.318/0.304
B	16.0	70.0	1,120	0.509/0.487
C	24.0	68.5	1,644	0.747/0.715
D	32.0	63.0	2,015	0.916/0.876
E	36.7/39.7	60.0/58.0	2,200/2,300	1.000
F	var	var	var	var
FREE-FLOW SPEED = 65 MPH				
A	10.0	65.0	650	0.295/0.283
B	16.0	65.0	1,040	0.473/0.452
C	24.0	64.5	1,548	0.704/0.673
D	32.0	61.0	1,952	0.887/0.849
E	39.3/43.4	56.0/53.0	2,200/2,300	1.000
F	var	var	var	var
FREE-FLOW SPEED = 60 MPH				
A	10.0	60.0	600	0.272/0.261
B	16.0	60.0	960	0.436/0.417
C	24.0	60.0	1,440	0.655/0.626
D	32.0	57.0	1,824	0.829/0.793
E	41.5/46.0	53.0/50.0	2,200/2,300	1.000
F	var	var	var	var
FREE-FLOW SPEED = 55 MPH				
A	10.0	55.0	550	0.250/0.239
B	16.0	55.0	880	0.400/0.383
C	24.0	55.0	1,320	0.600/0.574
D	32.0	54.8	1,760	0.800/0.765
E	44.0/47.9	50.0/48.0	2,200/2,300	1.000
F	var	var	var	var

NOTE: In table entries with split values, the first value is for four-lane freeways, and the second is for six- and eight-lane freeways.

Figuur 7.2 Tabel afwikkelingsniveaus voor wegvakken van autosnelwegen (HCM, 1994)

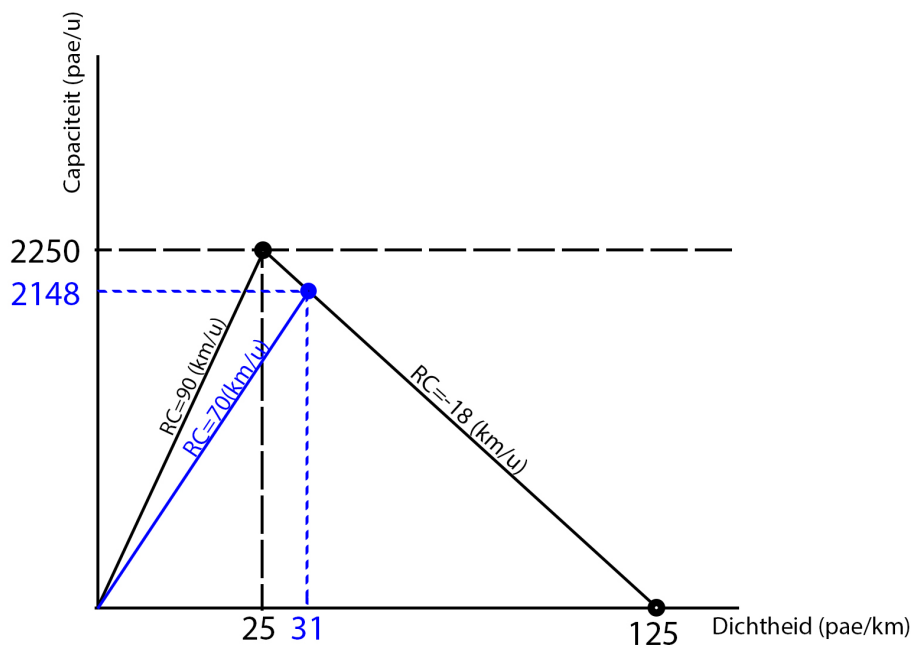
Bijlage IV

Bijlage IV-1



Figuur 7.3 Fundamenteel diagram, snelheid bij maximale capaciteit: 70 km/u)

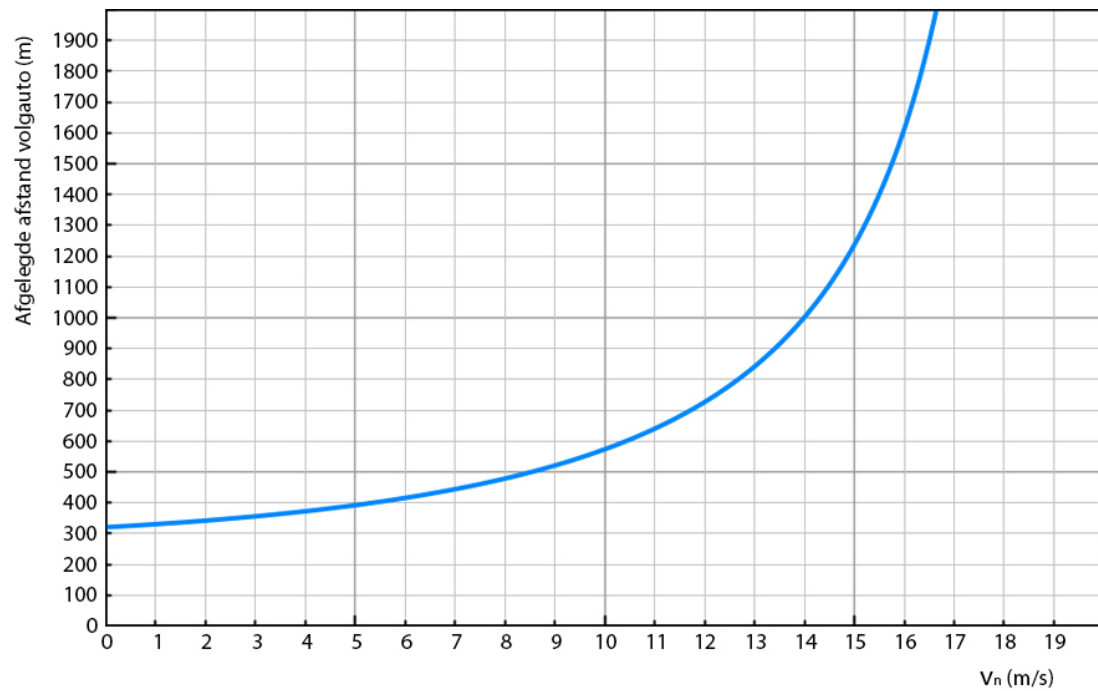
Bijlage IV-2



Figuur 7.4 Fundamenteel diagram, snelheid bij maximale capaciteit: 70 km/u)

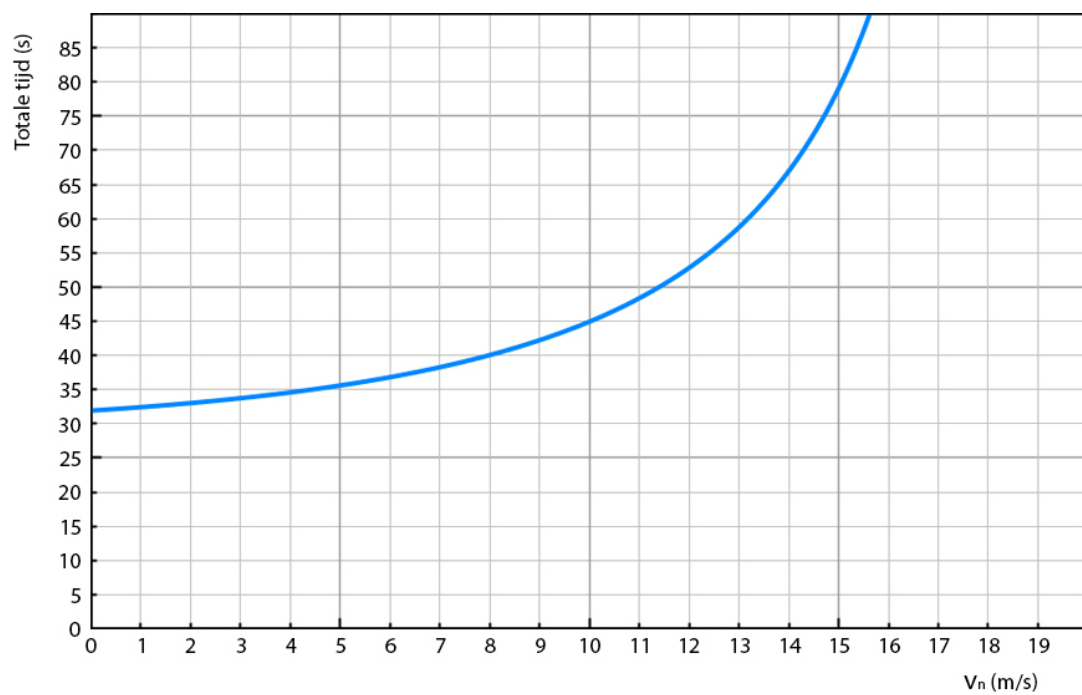
Bijlage V

Bijlage V-1



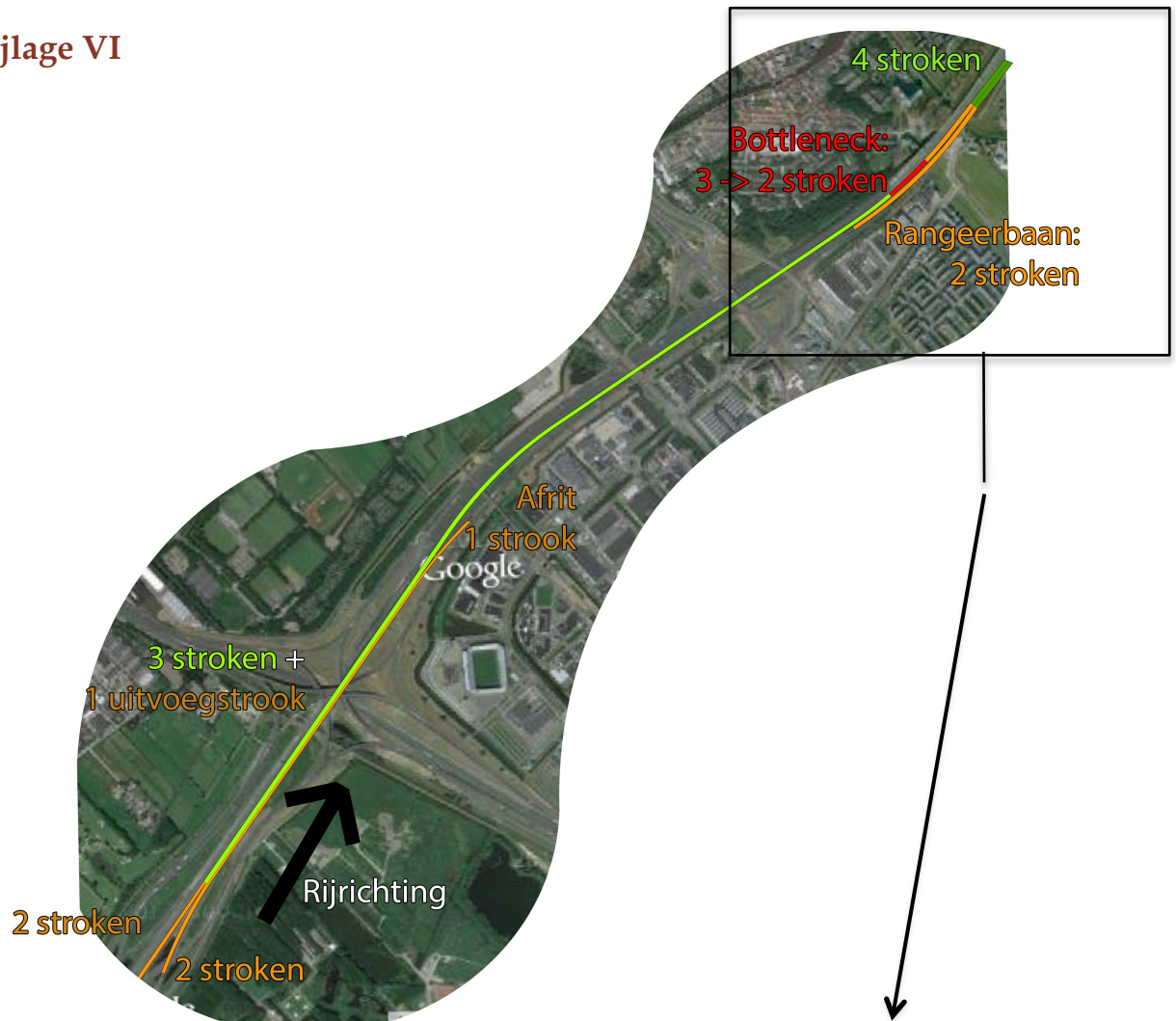
Figuur 7.5 Diagram snelheid waarnaar afgeremd dient te worden / afgelegde afstand volgauto

Bijlage V-2

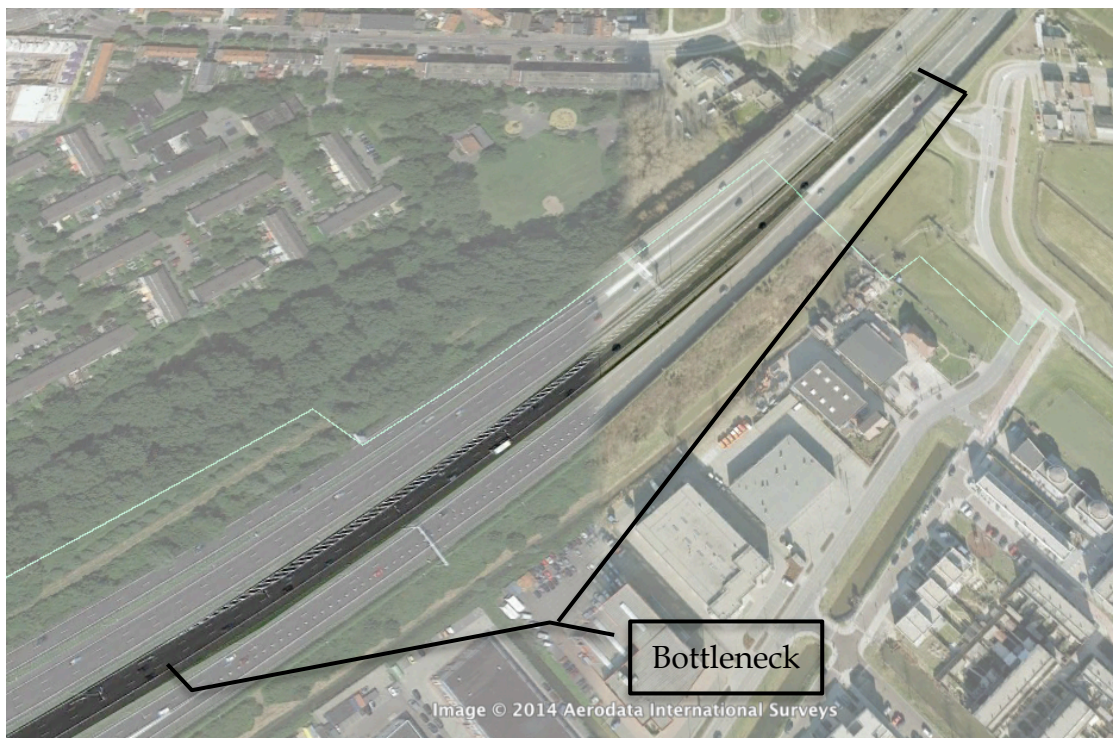


Figuur 7.6 Diagram snelheid waarnaar afgeremd dient te worden / totale duur van het schakelen

Bijlage VI

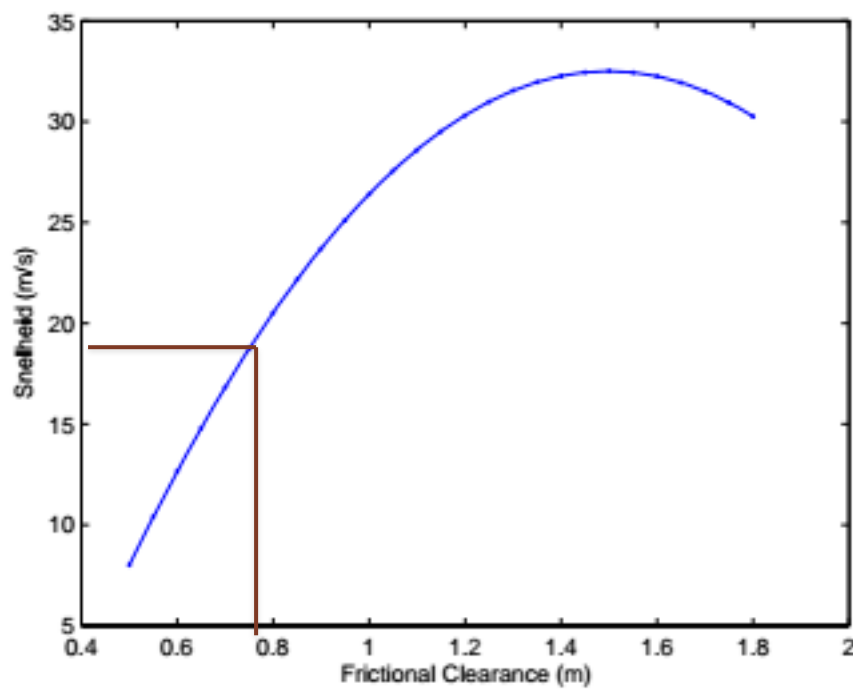


Figuur 7.7 Situatieschets A4 ter hoogte van Leidschendam



Figuur 7.8 Situatieschets A4 ter hoogte van de rijstrookbeëindiging

Bijlage VII



Figuur 7.9 Verband laterale afstand / gemiddelde aangenomen snelheid automobilisten (Hoogendoorn, Daamen, 2007)