

Telematica en verkeersstroomgeleiding

Een onderzoek naar kwantitatieve veiligheidscriteria ten behoeve van verkeersstroomgeleiding

R-94-78

Ir. T. Heijer & dr. P.H. Polak

Leidschendam, 1994

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV
Postbus 170
2260 AD Leidschendam
Telefoon 070-3209323
Telefax 070-3201261

Samenvatting

De toenemende verkeersbelasting op Nederlandse autosnelwegen vereist intensiever verkeerstoezicht dan op dit moment met de beschikbare middelen mogelijk is. Voor de ontwikkeling van regelsystemen die het hoofd kunnen bieden aan deze omstandigheden, en die tegelijkertijd een aanvaardbaar veiligheidsniveau kunnen handhaven, zijn criteria nodig die gedetailleerdere informatie verschaffen over de verkeersafwikkeling dan de gangbare 'klassieke' parameters.

Het onderzoek waarvan dit rapport verslag doet, heeft geleid tot de ontwikkeling van een eerste proeve van zo'n criterium. Het criterium is gebaseerd op een eenvoudige theorie inzake verkeersgedrag en kan gemakkelijk worden berekend uit de gegevens van standaard meetapparatuur.

Het rapport beschrijft de elementaire theorievorming en bespreekt tevens voorbeelden van toepassingen van het criterium op meetgegevens afkomstig van zowel autosnelwegen als niet-autosnelwegen.

Summary

The increasing traffic demand on Dutch motorways calls for more rigorous control than is currently available. In order to develop control systems that can cope with these conditions and can meanwhile maintain an acceptable level of safety, we need controlling criteria that provide more detailed information about traffic conditions than the current 'classical' parameters. The research reported here led to the development of a first attempt at such a criterion. It is based upon a simple theory concerning traffic behaviour and can easily be calculated from data of standard monitoring equipment. The report contains the basic theoretical considerations as well as examples of application of the criterion to measurement data taken from both motorways and rural roads.

Inhoud

1.	<i>Inleiding</i>	6
1.1.	Probleemveld	6
1.2.	Veiligheidsindicatoren	6
2.	<i>Theorievorming</i>	9
2.1.	Kenmerken van menselijk regelgedrag	9
2.2.	De empirische relatie volgtijd-rijnsnelheid	11
2.3.	Het samengesteld model	12
2.4.	Veiligheidscriteria	13
2.4.1.	Gedragsmodi	13
2.4.2.	Verstoringsen	14
2.4.3.	Het samengestelde veiligheids criterium	15
3.	<i>Praktische toepassing van het criterium</i>	17
3.1.	Toepassing op praktijkgegevens	17
3.2.	De relatie tussen criterium en stroomkenmerken	20
3.3.	De invloed van toe- en afritten	22
3.4.	Voorlopige conclusies	22
4.	<i>Criteria voor niet-autosnelwegen</i>	23
4.1.	Verschillen met autosnelweg	23
4.1.1.	Factoren die de veiligheid beïnvloeden	23
4.2.	Het empirisch model voor niet-autosnelwegen	24
4.3.	Het snelwegcriterium toegepast op niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom	26
4.3.1.	Meetgegevens	26
4.3.2.	Toepassingen van het criterium	26
4.3.3.	Voorlopige conclusies	28
4.4.	Het snelwegcriterium toegepast op wegen binnen de bebouwde kom	29
4.5.	Wegen met meer dan een rijstrook per richting	30
4.6.	Samenvatting en discussie	31
5.	<i>Veiligheidsindicatoren en verkeersstroomgeleiding</i>	33
5.1.	Aard van de toepassing van indicatoren	33
5.2.	Mogelijke maatregelen	34
5.2.1.	Algemeen	34
5.2.2.	Maatregelen naar wegtype	35
5.3.	Invloed van veiligheidscriteria op verkeersstroom- geleiding	35
6.	<i>Samenvatting en conclusies</i>	37
7.	<i>Mogelijke voortzetting van het onderzoek</i>	38
	<i>Literatuur</i>	39
	<i>Appendix</i>	41

1. Inleiding

1.1. Probleemveld

Het streven naar een duurzaam-veilig wegverkeer heeft geleid tot een herbezinning op middelen en methoden om het wegverkeer veiliger en efficiënter te laten verlopen. Een van de concepten die daarbij een rol speelt, is de 'self explaining road': een weg die door eenduidigheid van al zijn kenmerken de weggebruiker beweegt tot het 'juiste' gedrag.

Behalve allerlei ingrepen van infrastructurele aard die nodig zijn voor de vormgeving van zo'n self explaining road, lijken ook meer flexibele, 'telematische' informatiesystemen toegepast te kunnen worden om weggebruikers tot veilig gedrag te bewegen.

Inmiddels is er op grote schaal gewerkt aan de ontwikkeling van telematische systemen zowel voor autosnelwegen als voor andere wegtypen. Daarbij moet overigens worden aangetekend dat veiligheid in veel gevallen niet de primaire invalshoek bij die ontwikkelingen is. Wel is uiteraard altijd de randvoorwaarde dat een systeem de veiligheid niet in gevaar brengt. Grofweg zijn de ontwikkelingen in te delen in drie soorten systemen:

- systemen die de verkeersprestatie in stand proberen te houden door de verkeersbelasting te beïnvloeden (verkeerstoedeling, routegeleiding, doseren);
- systemen die de veiligheid trachten te bevorderen, onder andere door collectieve informatieverschaffing zoals het signaleren van incidenten, filevorming en slechte weersomstandigheden;
- een variëteit aan middelen voor individuele informatie of ondersteuning van de bedieningstaken van weggebruikers.

Bij het inpassen van deze middelen in het concept 'duurzaam-veilig' zullen we moeten kunnen beschikken over een goed inzicht in de mate en de wijze waarop ze de veiligheid beïnvloeden: dit is het hoofdthema van dit rapport.

1.2. Veiligheidsindicatoren

Er zijn verschillende maten voor de veiligheid van de verkeersafwikkeling denkbaar waarmee we het bedoelde inzicht kunnen verkrijgen. De uiteindelijke maat is uiteraard altijd gerelateerd aan de hoeveelheid en de ernst van de werkelijk optredende ongevallen. Deze maat is echter een globale maat die 'achteraf' wordt vastgesteld en zegt weinig over de momentane mate van veiligheid van een verkeersstroom.

Een 'on line'-beoordeling van die veiligheid vereist goed hanteerbare maten voor de veiligheid van de verkeersafwikkeling van een geheel andere soort. Deze maten moeten als regelcriterium *binnen* een telematisch systeem kunnen worden gebruikt, en tegelijkertijd als evaluatiecriterium *van* een systeem.

Er zijn verschillende uitgangspunten mogelijk voor de definitie van zo'n veiligheidsindicator, maar de basis is toch altijd gelegen in een of andere definitie van speciale gebeurtenissen in het verkeersproces: de 'ongevalsprecursors'. Dit soort maten evalueert de min of meer lokale verkeers-

omstandigheden en doet een uitspraak over de *ongevalskans*; aldus kan er in beide soorten toepassing mee gewerkt worden. In de praktijk blijkt dit soort maten echter vaak moeilijk interpreteerbaar doordat er meestal geen direct verband met 'echte' onveiligheid in de vorm van ongevallen te leggen valt. Een beter alternatief is echter niet voorhanden.

Als basis voor dit soort criteria is een variëteit aan methoden beschikbaar, zoals: de ongevalsanalyse methode waarbij een statistische correlatie tussen ongevallen en verkeersparameters als maat wordt gebruikt, conflict-observatiemethoden die gebaseerd zijn op maten als *Time To Collision* en dergelijke, en methoden gebaseerd op gedragstheorieën.

Dit rapport richt zich op veiligheidscriteria gebaseerd op ongevals-precursors, en wel op het type dat gebaseerd is op een gedragsmodel. De reden voor deze toespitsing is dat zo'n criterium niet alleen inzicht kan geven in de mate van verkeersonveiligheid, maar ook in het soort van gedragingen dat dat gevaar veroorzaakt. Daarmee is er ook een verband te leggen met gerichte maatregelen; een verband dat bij anderssoortige criteria ontbreekt.

In het algemeen bevatten op gedrag gebaseerde criteria twee elementen: kenmerken van het verkeersgedrag en kenmerken van de omstandigheden waaronder dit gedrag wordt vertoond (drukte, infrastructuur, weersomstandigheden enzovoort). We moeten dus op een of andere manier kunnen beschikken over metingen van die kenmerken.

Het eenvoudigst zijn uiteraard kenmerken van de infrastructuur: die liggen doorgaans vast, en als ze variëren is de aard van de verandering goed bekend bij de gebruiker van de criteria (wegbeheerder).

Praktisch gesproken zijn we voor het meten van verkeersgedrag (vooralsnog) aangewezen op meetlussen (vooral in autosnelwegen) of radar-metingen (op niet-autosnelwegen). Andere meetmethoden zoals videowaarneming en video-analyse, gecombineerd met image-processing technieken, zijn wel uitvoerbaar maar worden vooralsnog niet op grote schaal toegepast. Ook de meting van relevante (slechte) weerscondities is mogelijk maar wordt vooreerst zelden verricht.

In het onderhavige rapport wordt een beschrijving gegeven van veiligheidscriteria die zijn ontwikkeld op basis van bestaande gegevens.

Deze bestaan vooral uit meetlusgegevens van een tweetal autosnelwegen en een aantal radarwaarnemingen van andere wegtypen. De meetgegevens bevatten slecht oppervlakkige informatie over weersomstandigheden en daarom is er in dit onderzoek voorlopig alleen gebruik gemaakt metingen die met zekerheid plaatsvonden onder goede weersomstandigheden.

Verder zijn we voornamelijk uitgegaan van metingen op de autosnelweg; de redenen hiervoor zijn:

- de nauwkeurigheid van beschikbare gegevens: meetlusgegevens van snelwegen bevatten meer en nauwkeuriger informatie dan radar-metingen;
- de invloed van de infrastructuur is aanzienlijk kleiner op snelwegen dan op de overige wegen.

Binnen deze beperkingen is gezocht naar de formulering van criteria die verklaarbaar zijn vanuit een zo algemeen mogelijk model van verkeersgedrag. Daarbij is het uitgangspunt dat veiligheid samenhangt met individueel gedrag in een beperkte verkeersomgeving, en dat er dus gezocht

moet worden naar kenmerken van dat individuele gedrag en van die beperkte omgeving.

Deze aanpak is enigszins te vergelijken met die in het DRIVE-project *Melyssa*, waar individueel gevaarlijke omstandigheden worden gedetecteerd. Het verschil met *Melyssa* is vooral, dat hier niet alleen het optreden van gevaarlijke omstandigheden op zich als criterium wordt genomen, maar dat ook de beheersbaarheid van de omstandigheden door het individu wordt meegewogen. Op deze wijze is getracht een uniforme basis te vinden voor het meten van veiligheid op verschillende wegtypen.

De uiteindelijk geformuleerde criteria zijn toegepast in het DRIVE-project *HOPES*, op meetlusgegevens van een autosnelweg. Daarbij vond tevens, ter hoogte van de meetlussen, video-observatie plaats aan de hand waarvan de criteria konden worden geverifieerd.

Deze video-observaties moeten als een zeer nuttige bron van informatie worden beschouwd omdat ze in principe alle gegevens die meetlussen leveren ook kunnen produceren, en daarenboven tevens informatie leveren over het rijstrookwisselgedrag en inhaalgedrag.

Deze video-analyses zijn op dit moment beperkt tot 'handmatige' verwerking en dus nog ongeschikt voor on-line toepassing in de praktijk. Het automatisch verwerken van video-informatie is echter een terrein waarop snelle ontwikkeling plaatsvindt en het is goed mogelijk dat deze techniek in de niet al te verre toekomst de techniek van de meetlussen zal vervangen op die meetplaatsen waar een zo goed mogelijk inzicht in het verkeersproces van belang is.

2. Theorievorming

In het voorgaande is erop gewezen dat een karakterisering van de veiligheid samenhangt met individueel gedrag. Een vereiste voor de bestudering van veiligheidsfenomenen is dus een bruikbare theorie omtrent individueel verkeersgedrag, liefst samengevat in een hanteerbaar model. Er zijn vele denkbare invalshoeken voor het modelleren van dat verkeersgedrag en het heeft daarom zin de keuze van de beschrijving af te stemmen op gestelde problemen.

In ons geval gaat het niet om een model dat in detail alle besturingsbeslissingen en handelingen moet kunnen beschrijven (een microscopisch model), maar om een model dat vooral gericht is op de wijze waarop een individu met de directe verkeersomgeving interageert (een mesoscopisch model).

In dit hoofdstuk wordt zo'n model voorgesteld. Het uitgangspunt daarvoor is de, in termen van verkeersgedrag, meest eenvoudige verkeersomgeving: de autosnelweg. Deze omgeving is niet alleen vanwege de relatieve eenvoud van gedrag gunstig als start voor theorievorming, maar ook vanwege de aanwezigheid van veel meetstations, waardoor een grote hoeveelheid praktijkgegevens voorhanden is.

De hier voorgestelde theorie is gebaseerd op een zo eenvoudig mogelijke voorstelling van het bestuurdersgedrag. Dat model is opgebouwd uit twee delen: een algemeen model van het (adaptieve) menselijk rijgedrag, aangevuld met een empirische relatie tussen volgtijd en rijnsnelheid.

2.1. Kenmerken van menselijk regelgedrag

De rijtaak kan worden beschouwd als een grotendeels routinematig uitgevoerde besturings- en waarnemingstaak van langere duur. De menselijke regelaar beschikt onder dergelijke omstandigheden over verschillende mechanismen om de taakuitvoering te optimaliseren en de taakbelasting te verminderen:

- herkennen en rubriceren en automatiseren van steeds terugkerende elementen;
- herkennen en rubriceren van relaties tussen die elementen; en
- herkennen en rubriceren van patronen in die relaties.

Dit mechanismen tezamen dienen om patronen en relaties op korte termijn te voorspellen. Die voorspelling maakt het mogelijk om noodzakelijke veranderingen in het eigen gedrag tijdig te voorzien, waardoor dit geleidelijk en adequaat kan gebeuren.

Deze geleidelijkheid houdt ook in dat er voldoende tijd is om het effect van verandering in het eigen gedrag te voorspellen (en eventueel te corrigeren) en daarmee wordt zowel motorisch als mentaal een optimale nauwkeurigheid en een geringe inspanning mogelijk. Dit voorspellende gedrag leidt daarmee ook tot een zo laag mogelijke taakbelasting.

Predictief gedrag is slechts onder bepaalde voorwaarden mogelijk. In de eerste plaats moet de voorspeller een of meer eenvoudige interne modellen van het gedrag van andere verkeersdeelnemers hebben opgebouwd (ervaring). Dit impliceert dat die andere verkeersdeelnemers zich ook

redelijk voorspelbaar moeten gedragen; in feite betekent het dat deelnemen aan het verkeer een wederzijdse afstemming, mogelijk zelfs simplificatie, van gedrag vereist, opdat de individuele modellen zo goed mogelijk kunnen aansluiten.

In de tweede plaats moet er voldoende waarnemingstijd kunnen worden besteed aan alle voor de weggebruiker relevante verkeersdeelnemers in zijn omgeving, teneinde de interne modellen te verwerken.

Verder moet er voldoende tijd zijn om die modellen toe te passen en gedrag te extrapoleren. Veranderingen in de verkeersomgeving moeten dus voldoende 'traag' verlopen.

Wanneer aan deze randvoorwaarden is voldaan kan de verkeersdeelnemer in de praktijk bruikbare korte termijn-voorspellingen genereren. Er is daarbij voldoende tijd om de onvermijdelijke kleine fouten in de voorspelling te kunnen compenseren.

Binnen deze gedragsmodus is het goed mogelijk om de waarnemingen en verwerking te verrichten die samenhangen met snelheidskeuze en volgtijden en met speciale manoeuvres als rijstrookwisselingen en inhalen. Als de waarnemingstijd te beperkt wordt, bijvoorbeeld omdat er in de omgeving veel verandert en de aandacht te zeer verdeeld moet worden, neemt de kwaliteit van de voorspellingen af en moeten er meer fouten worden weggeregeld. Dit leidt uiteindelijk tot het opgeven van het voorspellend gedrag en het concentreren op reactieve foutcompensatie: het *volggedrag*.

Bij dit volggedrag wordt de aandacht vooral gericht op het direct voorafgaande voertuig en wordt alleen getracht snelheid en afstand ten opzichte van de voorligger binnen zekere grenzen te houden. De (tijds)afstand tussen de voertuigen is hierbij relatief klein, hetgeen een strakke koppeling van gedrag impliceert die veel minder ruimte laat voor de voorbereiding en uitvoering van rijstrookwisseling - waarmee deze manoeuvre dus ook riskanter wordt.

Het volggedrag is voorts onveiliger dan predictief gedrag omdat het de verkeersdeelnemer veel gevoeliger maakt voor *verstoringen in het verkeer*. Dit is het gevolg van de kortere verwerkingstijd van de individuele reactie, die ertoe leidt dat er heftiger gereageerd moet worden.

Opslingering van dergelijke vertraagde reacties in een stroom kan uiteindelijk tot instabiliteiten zoals 'schokgolven' leiden.

Het is op dit punt van belang aan te geven wat onder 'verstoring' moet worden verstaan. De meest bruikbare omschrijving hier is: een *onvoorziene* verandering. Deze omschrijving omvat ten minste twee categorieën gebeurtenissen die van belang zijn:

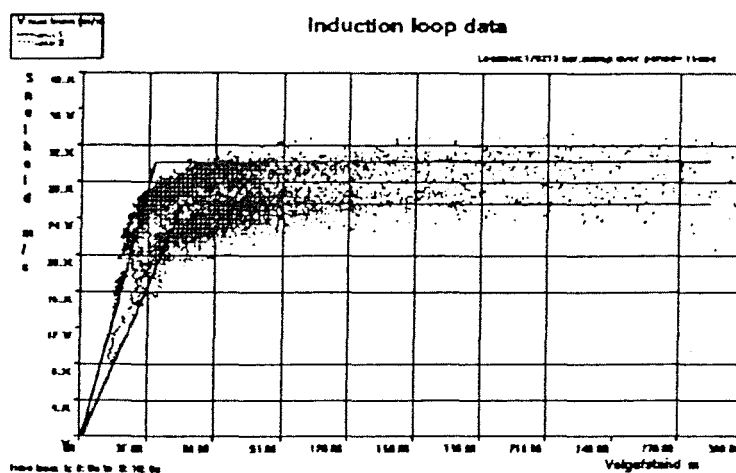
- zeldzame gebeurtenissen zoals ongevallen, die echt onvoorzienbaar zijn;
- gebeurtenissen die in het verkeer weliswaar verwacht kunnen worden, maar die binnen de mogelijkheden van het vigerende gedrag toch niet voorzien worden. In deze categorie vallen bijvoorbeeld rijstrookwisseling en remmanoeuvres of manoeuvres die plaatsvinden in de omgeving van een weggebruiker, maar buiten de focus van aandacht, waardoor gedragsaanpassing laat en vaak abrupt plaatsvindt.

Echter ook het complement, het *achterwege blijven* van een voorziene gebeurtenis, kan een storing vormen. Deze situatie kan bijvoorbeeld optreden in een overgangstoestand waarbij een deel van de weggebruikers

predictief gedrag vertoont, terwijl de overigen volggedrag vertonen. Degenen die zich predictief gedragen zullen in zo'n geval anticiperen op waarneming en gedrag van anderen (bijvoorbeeld opzij gaan); als dit niet plaatsvindt zal het eigen gedrag snel moeten worden veranderd.

Het tot dusverre beschreven model is goeddeels gebaseerd op een combinatie van gedragstheorie en van modelvormingsmethoden uit de meet- en regeltechniek. Het is uiteraard van groot belang om de belangrijkste onderdelen van het model ook in verband te kunnen brengen met meetbaar verkeersgedrag, anders vervalt de bruikbaarheid van het model als basis voor veiligheidscriteria. In het volgende hoofdstuk wordt daarom nader ingegaan op de belangrijkste meetbare aspecten van het verkeersgedrag: snelheids- en volggedrag.

2.2. De empirische relatie volgtijd-rijnsnelheid



Figuur 1. *Empirische relatie tussen snelheid en volgafstand.*

In *Figuur 1* is een voorbeeld gegeven van de samenhang tussen gemiddelde rijnsnelheid en gemiddelde netto volgafstand. De netto volgafstand is daarbij gedefinieerd als de afstand tussen de achterzijde van een voertuig en de voorzijde van het daarop volgende. De gegevens zijn apart berekend voor elke rijstrook.

In een eerder gerapporteerde analyse [SWOV R-94-34] van de gegevens is aangegeven dat een zeer eenvoudig model van individueel gedrag al tot een dergelijke gemiddelde karakteristiek kan leiden: een individu heeft in principe een *wenssnelheid* en verlaagt die snelheid pas wanneer een voorligger tot op een zekere afstand wordt genaderd. De afstand waarop deze snelheidsaanpassing plaatsvindt, varieert kennelijk min of meer lineair met de snelheid, hetgeen erop neerkomt dat de snelheid wordt aangepast wanneer een (min of meer) vaste *volgtijd* is bereikt.

Het verschil in gemiddelde wenssnelheid tussen de rijstroken wordt in dit verband verklaard uit het *percentage vrachtvoertuigen*. Deze vrachtvoertuigen rijden circa 10 km/uur langzamer dan personenauto's op dezelfde rijstrook (in deze termen: hun wenssnelheid is circa 10 km/uur lager) en dwingen die personenauto's ook vaak tot inhalen, zodat hoge percentages vrachtvoertuigen op de rechter rijstrook de lagere gemiddelde snelheid bepalen. De volgtijd waarbij de snelheid wordt aangepast varieert tussen 1 en 2,5 seconden.

In *Figuur 1* is het model voor beide rijstroken met een zwarte lijn aangegeven. Hoewel betwijfeld kan worden of de menselijke regelaar afstand, snelheid of volgtijd op zichzelf genomen nauwkeurig kan schatten, blijkt het effect van de combinatie ervan wel goed te voorspellen te zijn: vrijwel elke min of meer ervaren automobilist kan bijvoorbeeld redelijk goed schatten of hij, rijdend met een zekere snelheid, nog wel of niet voor een aangegeven punt tot stilstand kan komen. Het schatten van dergelijke gebeurtenissen in ruimte en tijd is blijkbaar in totaal redelijk mogelijk, terwijl dat voor afzonderlijke componenten niet geldt. Het empirische model is daardoor toch een aannemelijke weergave van het snelheidsgedrag bij interactie in normale (dus niet extreme) situaties.

2.3. Het samengesteld model

- Het empirische model kan op twee manieren als een gedragsmodel worden gebruikt:
 1. als weergave van een deel van het individuele gedrag (het inhaalgedrag valt erbuiten);
 2. als representatie van het intern model dat het individu toepast voor het voorspellen van het gedrag van andere verkeersdeelnemers.

Ad 1. Als weergave van het individuele gedrag kunnen we de betekenis van het empirisch model als volgt interpreteren: zolang de volgtijd nog dusdanig groot is dat er geen snelheidsaanpassing plaatsvindt, is er waarschijnlijk sprake van (of in ieder geval ruimte voor) predictief gedrag. In deze gedragsmode is er ook ruimte voor voorbereiden en uitvoeren van rijstrookwisselingen. Om die reden bestaat in *Figuur 2*, het schema van het gedragsmodel, het blok 'predictief gedrag' uit twee delen: de voorspeller van andermans' gedrag - de 'predictor' - die in feite het gehele empirische model omvat, en een regelaar die probeert onder de voorspelde condities de wenssnelheid te handhaven (horizontale tak van het empirische model). Bij het zo goed mogelijk handhaven van de wenssnelheid kan ook van rijstrook worden gewisseld.

Het blok 'volggedrag', waarbij rijstrookwisseling veel moeilijker verloopt, maakt geen gebruik van de 'predictor'-functie, maar werkt rechtstreeks met de actuele omgevingsinformatie ten behoeve van een regelaar die tracht de volgtijd constant te houden (de schuine tak van het empirisch model).

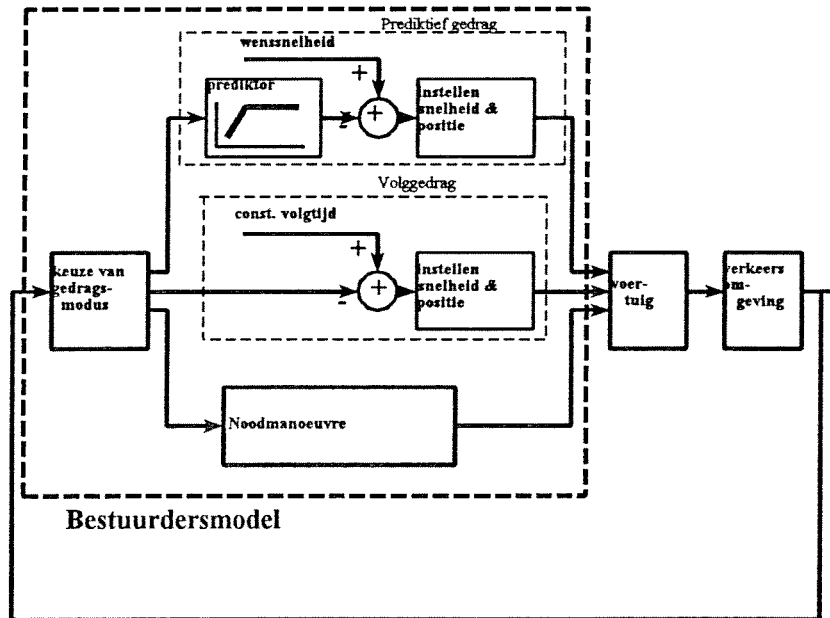
Het blok 'noodmanoeuvre' ten slotte, omvat de resterende gedragsaspecten: deze zijn voor de volledigheid aangegeven maar blijven verder in de beschouwing van veiligheidscriteria buiten beschouwing.

Ad 2. Het volledige empirische model (met beide takken) is ook opgenomen in het blok 'prediktor' in *Figuur 2*. Hierin heeft het, zoals gezegd, de functie van voorspellend model voor het gedrag van andere verkeersdeelnemers. Het empirisch model is eenvoudig en is daardoor toepasbaar en naar het schijnt in overeenstemming met de praktijk.

Wel moet er, gegeven de eerder besproken voorwaarden voor predictief gedrag, sprake kunnen zijn van enige observatietijd om met name rijstrookwisselingen te kunnen voorspellen: het maakt bijvoorbeeld verschil of de geobserveerde verkeersdeelnemer gedurende de gehele observatieperiode een min of meer vaste volgafstand en een klein snelheidsverschil vertoont (waarschijnlijk volggedrag en daarom geen rijstrookwisseling),

of dat de volgfstand veranderde en er geremd werd (overgang van predictief gedrag naar volgggedrag, rijstrookwisseling mogelijk).

Het in *Figuur 2* weergegeven model van het individueel gedrag zal dienen als basis voor de afleiding van veiligheidscriteria.



Figuur 2. Model van individueel bestuurdersgedrag.

2.4. Veiligheidscriteria

2.4.1. Gedragsmodi

Snelle gedragsveranderingen, of in het ongunstigste geval noodmanoeuvres die ontstaan ten gevolge van een verstoring in de directe omgeving van een verkeersdeelnemer, kunnen op hun beurt weer verstoringen vormen voor anderen in die omgeving. Het lijkt aannemelijk dat hiermee onder ongunstige condities een keten van verstoringen teweeg kan worden gebracht, hetgeen kan resulteren in ongevallen of het lokale 'instorten' van de verkeersprestatie.

Hoe die ongunstige omstandigheden precies te definiëren zijn is niet goed bekend. We kunnen echter veronderstellen dat ze, in elk geval gedeeltelijk, samenhangen met de 'mengverhouding' van predictief en volgggedrag: hoe hoger het aandeel volgggedrag, des te groter de kans dat iemand in de verstoorde omgeving (te) laat reageert. Als we dus in staat zijn om een bruikbare schatting te maken van de aandelen predictief gedrag en volgggedrag, dan kan dat de basis vormen voor een kwantitatief veiligheids criterium.

In ons model zijn de beide modi onder andere gekenmerkt door het verschil tussen de werkelijke snelheid en de wenssnelheid van een individu. Het is echter niet mogelijk om op basis van lusmetingen dat individuele verschil betrouwbaar te bepalen; er moet dus van andere kenmerken gebruik worden gemaakt.

Kenmerken die gemakkelijk uit lusmetingen zijn af te leiden zijn bijvoorbeeld de *volgtijd* en de *verschilsnelheid* tussen twee opeenvolgende voertuigen binnen een rijstrook. Zoals eerder is opgemerkt, varieert de volgtijd waarbij de snelheid wordt aangepast tussen 1 en 2,5 seconde. Om te bepalen welk deel van de gemeten populatie volggedrag vertoont, kunnen we dus beginnen met het deel dat een volgtijd kleiner dan 2,5 seconde heeft.

Nu komt het relatief vaak voor dat er korte volgtijden worden gemeten omdat er net een inhaalmanoeuvre wordt ingezet - hetgeen tot een onjuiste classificatie zou leiden. In zo'n geval is echter meestal een flinke verschil-snelheid te meten: als we naast de volgtijd ook een kleine verschil-snelheid meten, bijvoorbeeld (maar dat is een arbitraire keuze) maximaal 2 m/s, dan hebben we een grotere zekerheid over de aanwezigheid van volggedrag.

Een aparte categorie vormt het (min of meer) gedwongen volggedrag dat optreedt als een belangrijk deel van het gezichtsveld wordt geblokkeerd, bijvoorbeeld door een vrachtwagen of bus (maar ook door weersomstandigheden zoals mist). De vrachtwagens zijn door hun lengte herkenbaar en daarmee is een redelijke identificatie van deze omstandigheden ook mogelijk.

We kunnen dus van elke passant vaststellen welke globale gedragsmodus hij vertoont en daaraan een numerieke code, bijvoorbeeld 1=volggedrag, 0=predictief gedrag, toekennen: door die over een periode te middelen verkrijgen we een schatting van het aandeel volggedrag over die periode als een waarde tussen 0 en 1. Het aandeel predictief gedrag kan dan worden bepaald door het aandeel volggedrag van 1 af te trekken.

2.4.2. Verstoringen

Voor een interpretatie van de betekenis van het aandeel volggedrag moeten we tevens een beeld krijgen van de mate van verstoring van de omgeving. Zoals al is betoogd, zijn verstoringen hier opgevat als onvoorziene veranderingen in de omgeving. Ook kan het gaan om gebeurtenissen die dusdanig de aandacht trekken dat het normale gedrag in de omgeving tijdelijk wordt verstoord. Het gaat er nu om, die voorvallen te onderscheiden die meetbaar zijn met meetlussen.

We kunnen nu twee categorieën gebeurtenissen onderscheiden met elk twee ondercategorieën:

- gebeurtenissen binnen een rijstrook, waarbij het om snelheidsveranderingen gaat of om gevaarlijke situaties die gemakkelijk tot grote snelheidsverandering (noodstop, botsing) kunnen leiden;
- gebeurtenissen tussen rijstroken, waarbij het eveneens om twee soorten gaat: conflicten bij normale rijstrookwisselingen en rechts inhalen bij hoge snelheid (niet tijdens fileverkeer).

Van beide categorieën zijn er uit meetlusgegevens de volgende gebeurtenissen af te leiden:

Binnen een rijstrook

Tot dusver zijn er drie gebeurtenissen onderscheiden:

1. De Time To Collision (TTC) van twee opeenvolgende voertuigen is klein, bijvoorbeeld kleiner dan twee seconden. Dit houdt in dat het achteropkomende voertuig moet remmen of van rijstrook veranderen om een botsing te vermijden.

2. De volgafstand is zeer klein, bijvoorbeeld vijf meter (een criterium dat door de politie wordt gehanteerd) of kleiner, terwijl de snelheid 'normaal' is. Dit is een gevaarlijke situatie die het gedrag van beide bestuurders sterk beïnvloedt en aandacht voor de omgeving beperkt.
3. Het noodstop-probleem, waarbij de combinatie van snelheid en volgafstand dusdanig is, dat een tijdige reactie bij plotseling remmen van het voorste voertuig vrijwel onmogelijk is. Dit criterium is gebaseerd op een reactietijd van circa één seconde en identificeert ook situaties waarbij de volgafstand op zich niet klein is.

Het kan voorkomen dat een voertuigpaar aan meer dan één criterium voldoet. In dat geval wordt er toch maar een verstoring geregistreerd, omdat het steeds om dezelfde betrokkenen gaat.

Tussen rijstroken

Hier kunnen twee typen verstoringen worden onderscheiden:

1. Het inhaal-conflict: bij dit potentiële conflict zijn drie voertuigen betrokken; (a) en (b) rijden in één rijstrook en (c) rijdt in een rijstrook links daarvan. Het conflict treedt op wanneer (b) en (c) als achteropkomende voertuigen (a) gaan inhalen, en ze vrijwel tegelijk ter hoogte van (a) aankomen. In dat geval zal een van de achteropkomende voertuigen, (b) of (c) dus, moeten remmen. Het criterium kan worden berekend uit de afstanden en verschillensnelheden ten opzichte van het eerste voertuig en het conflict wordt in het programma aan het eerste voertuig toegerekend.
2. Rechts inhalen bij hoge snelheid: zoals al is aangegeven moet dit criterium zo worden gekozen dat alleen situaties waarin rechts inhalen uitzonderlijk is, worden gedetecteerd. In de (voorlopige) uitvoering van de diagnoseprogramma's is gekozen voor snelheden boven 80 km/uur en is bovendien de beperking opgelegd dat het snelheidsverschil bij inhalen minimaal ongeveer 15 km/uur bedraagt. De situatie wordt gedetecteerd als, onder bovengenoemde voorwaarden, een voertuig zich binnen een afstand van tien meter van het gepasseerde voertuig bevindt: dit laatste omdat het bij zo'n snelheidsverschil onwaarschijnlijk is dat de inhaler binnen deze afstand van rijstrook is veranderd en mogelijk toch een legitieme manoeuvre heeft uitgevoerd.

Als in dit geval aan beide criteria wordt voldaan worden er ook twee verstoringen geregistreerd, omdat er hier verschillende betrokkenen zijn.

Om tot een bruikbare maat voor verstoring te komen kunnen we nu de storingsfrequentie berekenen over een bruikbare periode en aldus de storingsfrequentie berekenen.

2.4.3. *Het samengestelde veiligheids criterium*

De uiteindelijke indicator van veiligheid wordt samengesteld door de storingsfrequentie te wegen met (hier: te delen door) het gemiddelde aandeel predictief gedrag. Dit betekent dus dat eenzelfde storingsfrequentie in een verkeersstroom met een hoog percentage predictief gedrag als minder ernstig wordt beschouwd, omdat de kans dat de storing tijdig wordt gedetecteerd en weggeregeld dan groter is dan in de situatie waarin er voornamelijk volgedrag heerst.

De middelingsperiode die moet worden gebruikt hangt af van de toepassing van het criterium. Om inzicht te krijgen in de fluctuatie van het verkeersgedrag is een korte middelingsperiode nodig. Daarentegen is er meestal een langere periode nodig wanneer het criterium voor regeldoel-einden wordt gebruikt; als er bijvoorbeeld maatregelen als snelheidsbeperking worden toegepast is een langzamer wisselende indicator meestal beter.

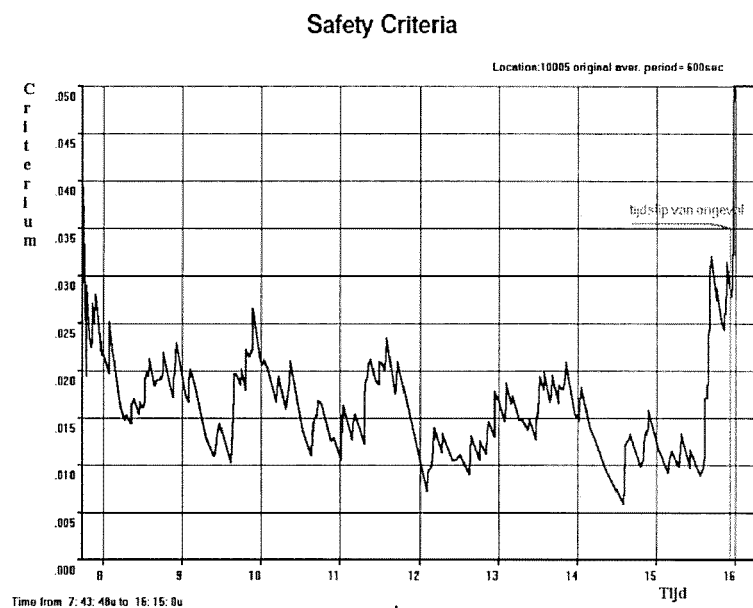
3. Praktische toepassing van het criterium

3.1. Toepassing op praktijkgegevens

In voorgaande fasen van dit onderzoek is een grote hoeveelheid meetlusgegevens verzameld. Het overgrote deel daarvan is verzameld op rijksweg A4, in en nabij de Beneluxtunnel. De rijksweg heeft op die meetplaats twee rijstroken per baan.

Er is ook een dag gemeten op de A13, een snelweg met drie rijstroken. Een bijzonderheid bij die meting is, dat er tijdens de meetperiode een ongeval plaatsvond, dicht bij een meetlusstation. Hierdoor hebben we een mogelijkheid verkregen tot een eerste test van het voorspellend vermogen van het veiligheids criterium. Daarom is als eerste voorbeeld het verloop van het criterium voor de A13 weergegeven; zie *Figuur 3*.

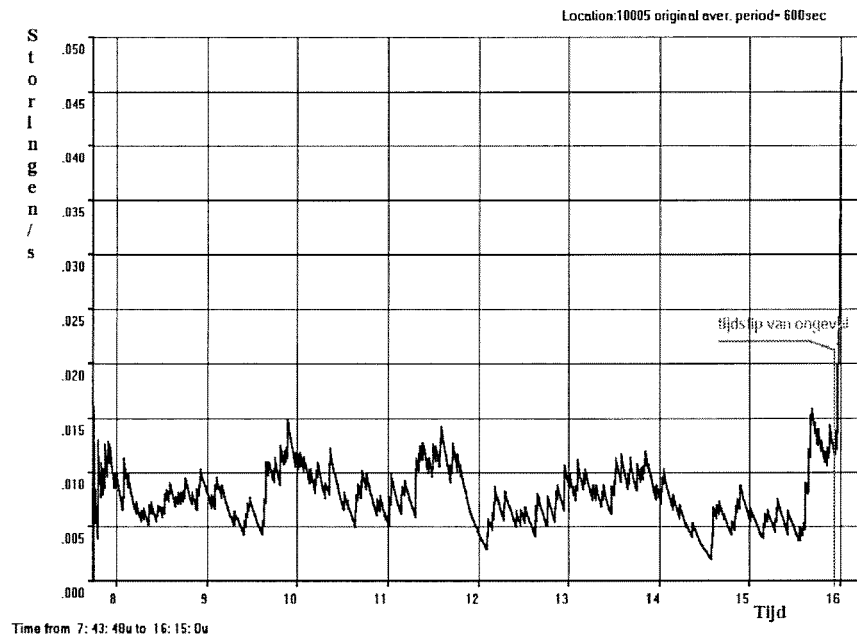
De tijd van deze figuur eindigt circa 17 minuten na het ongeval, dat om 15.58 uur plaatsvond. Direct na dat ongeval vinden er enkele noodstops plaats en ontwikkelt zich een lange file.



Figuur 3. Verloop van het veiligheids criterium op snelweg A13.

De componenten waaruit het criterium is samengesteld, de frequentie van verstoringen en het percentage volggedrag, zijn respectievelijk weergegeven in de *Figuren 4* en *5*. We kunnen verschillende perioden van de dag daarin vergelijken. Daarbij is te zien dat het verschil tussen de perioden gedeeltelijk wordt veroorzaakt door het al dan niet samenvallen van de maxima van de twee componenten van het criterium. Ook is het duidelijk dat ochtend- en avondspits (respectievelijk 07.45 uur - 09.30 uur en 15.30 uur - einde grafiek) vooral verschillen in de frequentie van verstoringen: deze frequentie is in de avondspits vanaf omstreeks 15.40 uur consistent hoger dan in de ochtendspits.

Safety Criteria

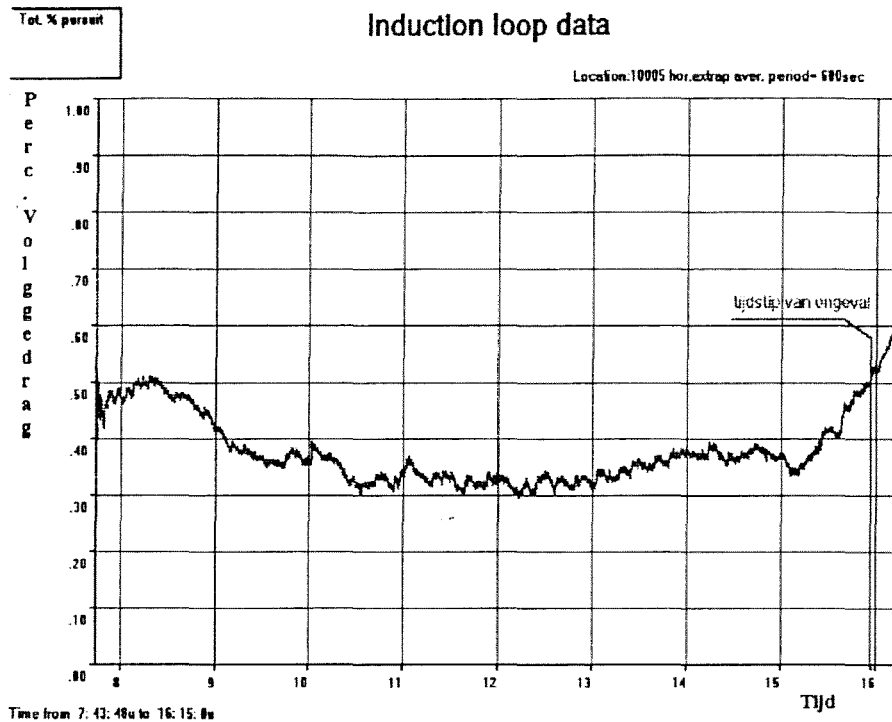


Figuur 4. Frequentie van storingen op snelweg A13.

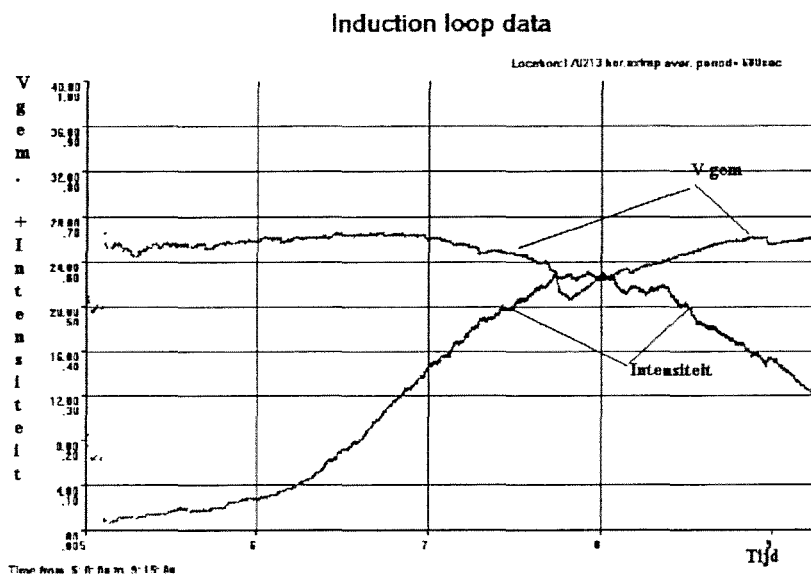
In de Figuren 3 t/m 5 is ook aangegeven op welk moment er een ongeval plaatsvond: dit moment valt in de periode van de avondspits met de relatief hoge storingsfrequentie. Uiteraard wil dit niet zeggen dat de hogere storingsfrequentie een ongeval voorspelt. Het betekent, zoals ook bij de opzet van het criterium is bedoeld, dat de gevoeligheid voor random verstoringen hoger is dan gedurende de rest van de dag.

De verstoring die tot het ongeval leidde was (zoals door een der betrokkenen aangegeven) de aanwezigheid van een televisiecamera. Deze camera had daar overigens gedurende de gehele dag gestaan, maar vormde kennelijk pas een probleem in de avondspits. Vrijwel alle gebruikelijk verkeersstroomkenmerken tonen geen duidelijk verschil tussen ochtend- en avondspits, maar het veiligheids criterium signaleert wel een verhoogde gevoeligheid voor verstoringen. Dit kan worden opgevat als een aanwijzing dat het criterium een bruikbare toevoeging aan het diagnostisch instrumentarium kan zijn. De uiteindelijke waarde moet natuurlijk nog aan de hand van meer uitgebreid onderzoek worden vastgesteld.

Een eerste stap in zo'n uitgebreidere toetsing is de toepassing van het criterium op gegevens van de Beneluxtunnel. De plaats van meting is de westelijke baan, juist voor de ingang van de tunnel. In *Figuur 6* zijn de metingen weergegeven van een meetdag waarin in de ochtendspits de verkeersbelasting tot de capaciteit opliep en de gemiddelde snelheid drastisch daalde. Dit gebeurde om ongeveer 07.45 uur. In de figuur zijn de gemiddelde snelheid en de gemiddelde intensiteit over de rijbaan aangegeven.



Figuur 5. Verloop van het percentage volggedrag op snelweg A13



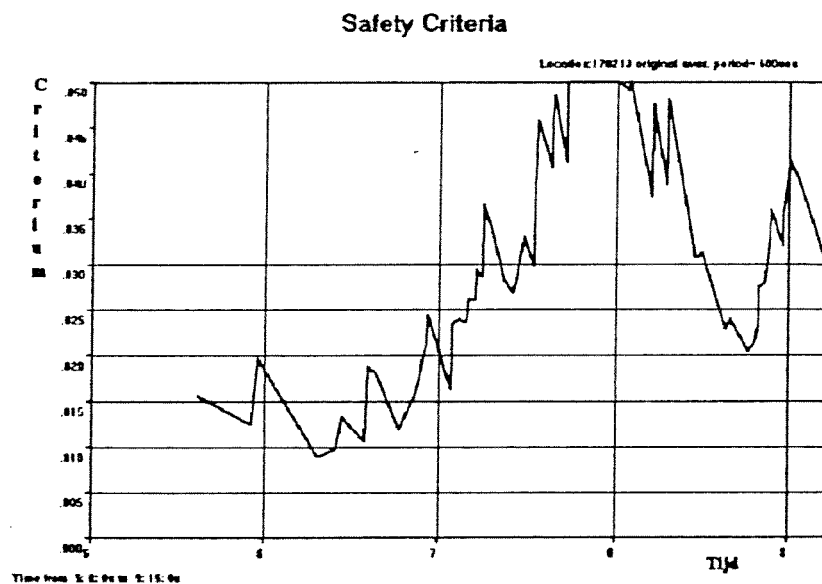
Figuur 6. Verloop van gemiddelde snelheid en intensiteit op snelweg A4.

Verder is in *Figuur 7* het verloop van het veiligheids criterium over deze periode weergegeven. Hierin valt op, dat de criteriumwaarde al rond 07.15 uur de waarde bereikt die op de A13 bestond ten tijde van het ongeval, en die waarde vervolgens ruim overschrijdt.

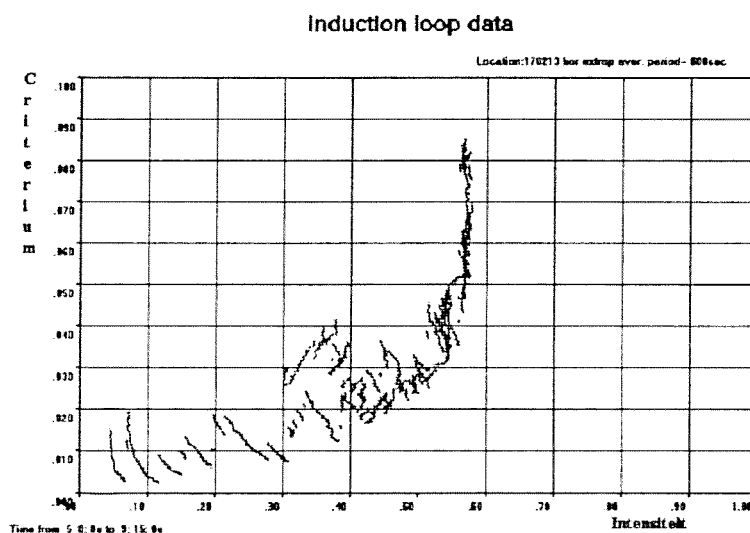
Waar het verloop van intensiteit en snelheid over de periode na de snelheidsdaling vrij geleidelijk is, vertoont het criterium een duidelijke daling en weer een piek; kennelijk vertoont het verkeersgedrag fluctuaties die in de gebruikelijke parameters niet duidelijk te zien zijn.

3.2. De relatie tussen criterium en stroomkenmerken

Een van de eerste vragen bij de ontwikkeling van een nieuw criterium is, wat het toevoegt aan bestaande kenmerken. In de voorgaande paragraaf is gebleken dat het criterium zich duidelijk anders gedraagt dan snelheid of intensiteit. Daarom is in de *Figuren 8 t/m 10* de relatie tussen het criterium en de intensiteit respectievelijk de snelheid, de dichtheid weergegeven.

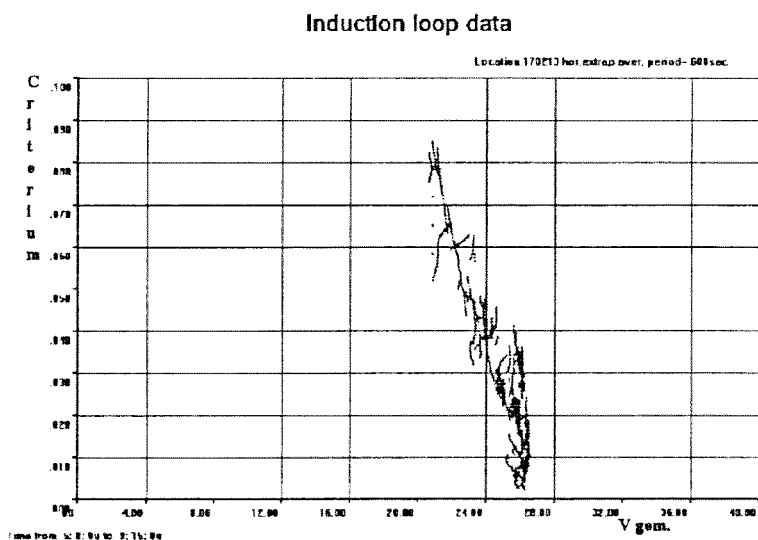


Figuur 7. Verloop van het veiligheids criterium voor snelweg A4.

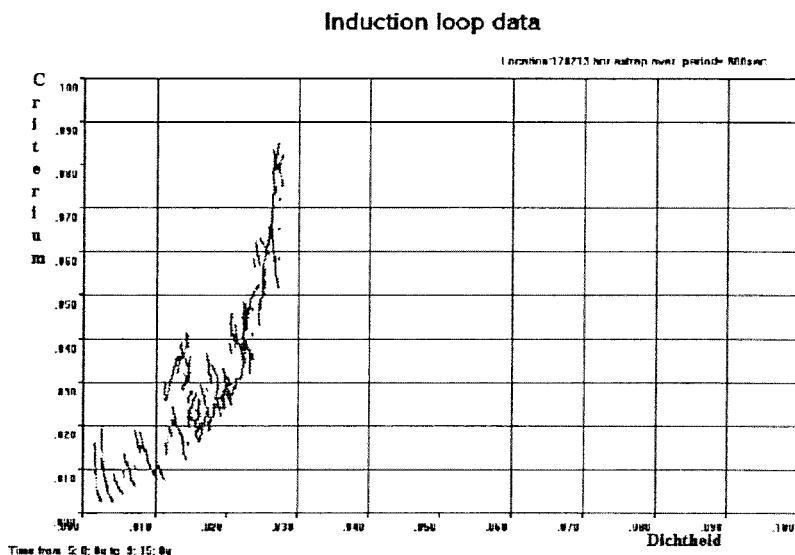


Figuur 8. Relatie tussen het veiligheids criterium en de gemiddelde intensiteit.

In de figuren is te zien dat het criterium ofwel niet lineair afhankelijk is van intensiteit, dichtheid en snelheid, dan wel dat de relatie meerwaardig is (bij een bepaalde snelheid komt een 'range' van criteriumwaarden voor).



Figuur 9. Relatie tussen het veiligheids criterium en de gemiddelde snelheid.



Figuur 10. Relatie tussen het veiligheids criterium en de gemiddelde dichtheid.

In die zin is het criterium dus niet triviaal. Hoe het precies zal kunnen worden toegepast en wat daarbij bijvoorbeeld als acceptabele grenswaarde(n) moet worden beschouwd moet nog nader worden onderzocht. Een eerste postulaat van een grenswaarde, gebaseerd op de huidige gegevens zou een criteriumwaarde van circa 0,03 kunnen zijn. Het criterium had ongeveer die waarde ten tijde van het ongeval op de A16. Als we veronderstellen dat er bij het bereiken van die waarde maatregelen zouden moeten worden genomen, bijvoorbeeld een snelheidsbeperking, dan zou dat voor het voorbeeld van *Figuur 7* (de Beneluxtunnel) betekenen dat er reeds vanaf circa 07.15 uur een beperking moet worden ingesteld tot bijvoorbeeld 80 km/uur.

3.3. De invloed van toe- en afritten

De voorbeelden van toepassing van het criterium betreffen verkeerssituaties op enige afstand van toe- of afritten. De verkeersstroom is daar meer gestabiliseerd dan in de weefgebieden die bij toe- en afritten behoren. Dit wil niet zeggen dat het criterium alleen toepasbaar is in gestabiliseerde stromen. De basis, het gedragsmodel, is ook van toepassing in weefgebieden. Wel is het zo, dat weefgebieden intrinsiek een hogere mate van verstoring kennen; ze zijn ook daadwerkelijk onveiliger. Die plaatselijk grotere onveiligheid is echter min of meer onvermijdelijk en voor meetlussen in dit gebied zal dus een andere (hogere) grenswaarde voor het criterium moeten worden gehanteerd. Ook voor de bepaling van deze grenswaarde is nader onderzoek noodzakelijk.

3.4. Voorlopige conclusies

Het criterium is gebaseerd op een rationeel model van verkeersgedrag en is vooral bedoeld om inzicht te geven in verschillen in dat gedrag onder overigens gelijke stroom condities. Het is gebleken dat het criterium ook daadwerkelijk aanzienlijke verschillen kan vertonen bij gelijke stroom condities: in het geval van het ongeval op de A13 duidde het op een toename van de 'onrust' in het verkeer tot een niveau dat zich die dag nog niet eerder had voorgedaan. Verder blijkt het criterium niet lineair afhankelijk van bekende parameters en voegt daardoor informatie toe. Het criterium lijkt daarom veelbelovend voor gebruik als diagnostisch instrument binnen een telematisch systeem van verkeersbeheersing. Omdat het inzicht geeft in verschillende soorten onveilig gedrag is het bovendien goed toepasbaar als evaluatie-instrument in voor- en nastudies bij de introductie van allerlei typen veiligheidsmaatregelen. De bruikbaarheid zal echter door nader onderzoek nog veel steviger moeten worden onderbouwd.

4. Criteria voor niet-autosnelwegen

4.1. Verschillen met autosnelweg

De verkeerscondities op autosnelwegen worden in de regel als de meest eenvoudige condities binnen een wegennet beschouwd. Op vrijwel alle andere wegtypen is het verkeersproces gecompliceerder en dat heeft uiteraard gevolgen voor de definitie van een bruikbaar veiligheids criterium. Het is echter de vraag of het zinvol is om voor alle mogelijke wegtypen veiligheids criteria te ontwikkelen die zijn afgeleid uit meetlusgegevens; het voornaamste doel van die criteria blijft het ondersteunen en evalueren van geautomatiseerde verkeersbeheersing en dit laatste zal waarschijnlijk beperkt worden tot wegen met stroomfunctie. In het hiernavolgende zullen we ons daarom bepalen tot die wegen.

4.1.1. Factoren die de veiligheid beïnvloeden

Het veiligheids criterium voor autosnelwegen is geheel gebaseerd op overwegingen van individueel verkeersgedrag en bevat verder geen factoren voor het representeren van bijvoorbeeld de invloed van de infrastructuur. De reden hiervoor is gelegen in de veronderstelling dat het wegtype 'autosnelweg' een zeer uniforme omgeving vormt die een beperkte variëteit van verkeersgedrag toelaat.

Deze aanname is echter niet van toepassing op niet-autosnelwegen; hier is (behalve misschien op autowegen) een veel grotere variatie in de vormgeving van de wegen, welke relevant is voor de bepaling van de veiligheid van het verkeersgedrag.

Zo is het voor de beoordeling van groot belang of een zeker gedrag plaatsvindt op een (lange) rechtstand, op een bredere of smallere rijstrook of in de nabijheid van kruispunten, wegversmallingen, bochten enzovoort. Ook is de aanwezigheid van tegemoetkomend verkeer op dezelfde rijbaan vaak reden om de veiligheid van inhaalgedrag totaal anders (en veel ingewikkelder) te wegen dan op autosnelwegen.

Op wegen met een stroomfunctie in de bebouwde kom is bovendien de aanwezigheid en het gedrag van langzaam verkeer van groot belang voor het bepalen van de veiligheid. Dit langzame verkeer is echter met standaard meetlussen niet goed te detecteren, waardoor met name informatie over de interactie van langzaam en snelverkeer onvolledig is of ontbreekt. Ditzelfde geldt feitelijk ook voor de meeste radarapparatuur.

Een en ander heeft tot gevolg dat veiligheids criteria op basis van automatische metingen voorlopig alleen redelijke resultaten geven op wegen met scheiding van langzaam en snelverkeer.

In principe zal bij de ontwikkeling van zo goed mogelijke criteria met al deze factoren terdege rekening moeten worden gehouden. Het is echter de vraag of werkelijk voor alle verschillende omstandigheden criteria geconstrueerd moeten worden. Als we bijvoorbeeld kunnen aantonen dat het generieke gedragsmodel in al die omstandigheden geldt, dan kan de wijze waarop een criterium wordt geformuleerd dezelfde blijven: een maat voor de verstoringfrequentie gewogen met een maat voor de beheersbaarheid.

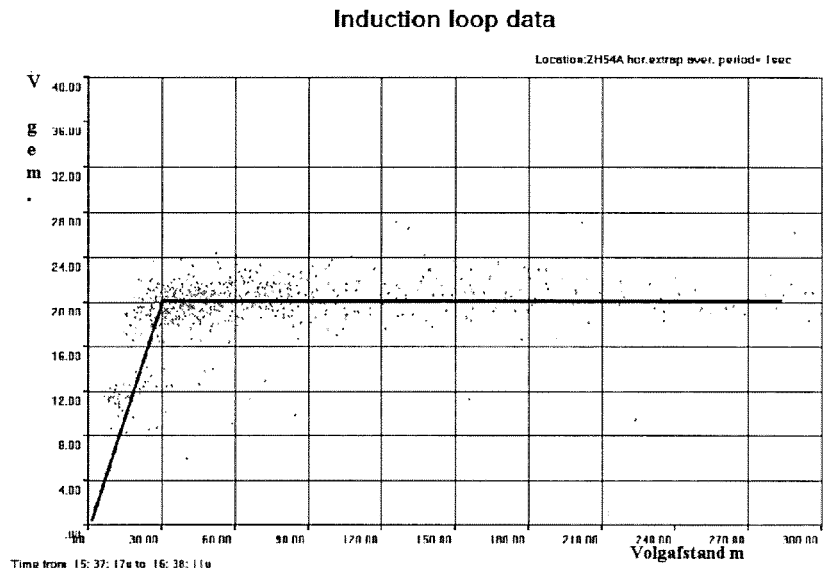
Wel kan het nodig zijn dat er verstoringstypen moeten worden toegevoegd of dat er andere criteriumwaarden voor verschillende situaties (bijvoorbeeld nabij bochten of wegversmallingen) moeten worden gehanteerd. Ook een aanpassing van de maat voor beheersbaarheid kan nodig zijn; op niet-autosnelwegen is er veel duidelijker dan op de autosnelweg, een invloed van de lagere rijsnelheden. Remwegen zijn bij die lagere snelheden veel korter en ook de bestuurbaarheid van voertuigen neemt toe naarmate de snelheid lager is.

Omdat de snelheden op niet-autosnelwegen veel sterker uiteen kunnen lopen dan op autosnelwegen, heeft het zin het criterium voor deze wegen ook op een of andere manier te wegen met de momentane rijsnelheid. In de huidige programmatuur is deze weging optioneel; er is voor gekozen deze zo uit te voeren dat de weegfactor bij een gemiddelde snelheid van 120 km/uur de waarde 1 heeft en bij andere snelheden proportioneel meer of minder.

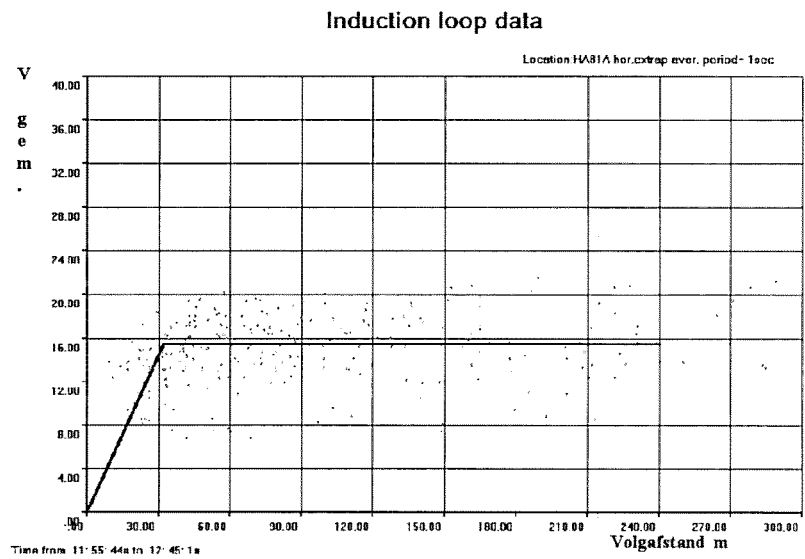
4.2. **Het empirisch model voor niet-autosnelwegen**

Het criterium voor snelwegen is onder andere gebaseerd op een empirisch model van het verkeersgedrag. De toepasbaarheid van het principe van dit criterium voor andere soorten wegen hangt dan ook af van de vergelijkbaarheid van het verkeersgedrag op die typen wegen. In de *Figuren 11* en *12* wordt de relatie tussen volgafstand en rijsnelheid voor respectievelijk een 80 km/uur-weg en weg binnen de bebouwde kom weergegeven.

Uit die figuren blijkt dat de op de autosnelwegen gevonden relatie ook voor andere wegen mag worden verondersteld zij het, dat de relatie binnen de bebouwde kom minder duidelijk is. De grondslag voor het criterium lijkt in ieder geval ook bruikbaar voor andere wegtypen.



Figuur 11. *Het empirisch model voor een niet-autosnelweg met één rijstrook per rijrichting.*



Figuur 12. *Het empirisch model voor een weg met stroomfunctie binnen de bebouwde kom.*

4.3. Het snelwegcriterium toegepast op niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom

4.3.1. Meetgegevens

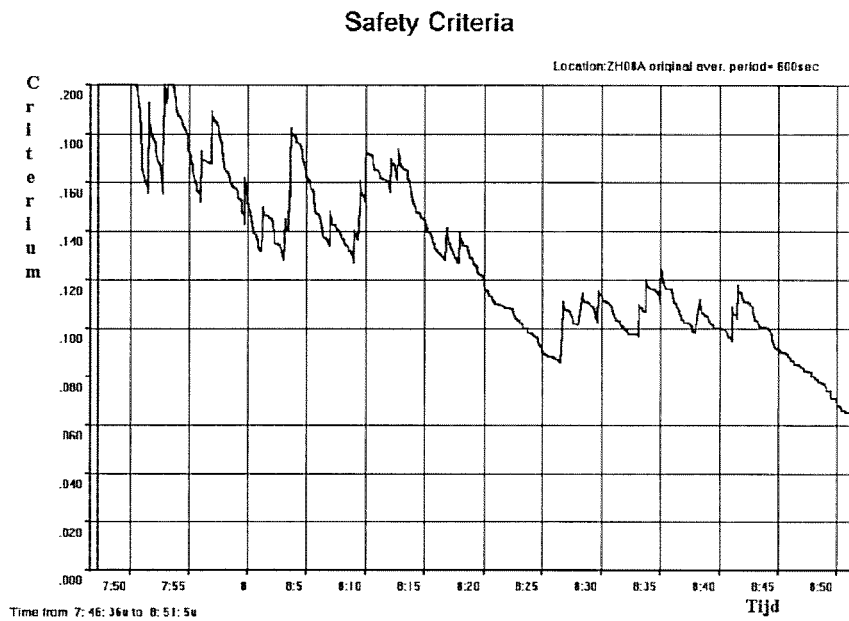
In het algemeen zijn meetlusgegevens van niet-autosnelwegen uiterst schaars. Om toch een indruk te kunnen krijgen van de werking van het veiligheidscriterium, is gebruik gemaakt van door de SWOV uitgevoerde radarmetingen. De metingen zijn uitgevoerd op rechtstanden, ver van veranderingen in de infrastructuur zoals bochten. De radarmetingen hebben ten opzichte van meetlusgegevens een aantal tekortkomingen: de volgtijd is slechts tot op seconden nauwkeurig waardoor volgtijden van 0 seconde veel voorkomen en de voertuiglengte wordt slechts onderscheiden in de zin van personen- en vrachtauto's. Om deze gegevens toch met bestaande programmatuur te kunnen verwerken zijn de ze geconverteerd onder twee aannamen: de volgtijden, die op seconden nauwkeurig zijn, worden aangepast door een uniform verdeelde fractie toe te voegen en de voertuiglengten worden gefixeerd op 4,20 meter voor personenauto's en 8 meter voor vrachtauto's.

Er is vervolgens alleen gebruik gemaakt van gegevens van wegen met één rijstrook per richting omdat de radar ook geen onderscheid naar rijstrook kan maken. Als gevolg hiervan zal het criterium alleen gebaseerd zijn op relaties tussen opeenvolgende voertuigen en niet op inhaalproblemen.

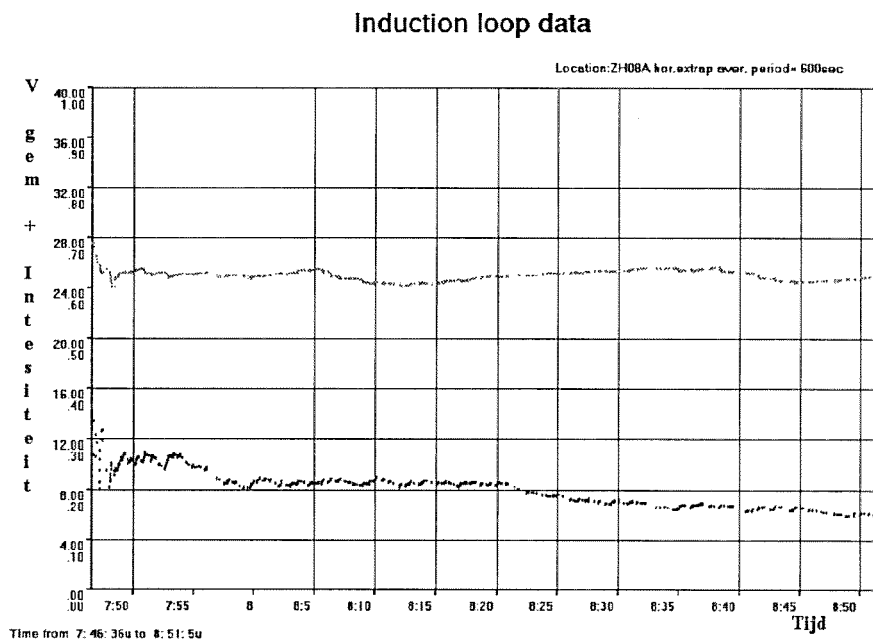
4.3.2. Toepassingen van het criterium

In *Figuur 13* is het verloop van de criteriumwaarden weergegeven voor een drukke enkelbaans weg met een rijstrook per richting. De maximumsnelheid bedraagt 100 km/uur. Opvallend is, dat de waarden veel hoger zijn dan op autosnelwegen in ons meetbestand. Daarbij is de intensiteit (zie *Figuur 14*, onderste lijn) vrijwel constant en heeft een waarde van circa de helft van de maximale rijstrookintensiteit op de A4 (circa 1100 vtg/uur tegen 2100 vtg/uur). Nadere analyse wijst uit, dat inderdaad de *frequentie van verstoringen* veel hoger is dan op een snelweg. Het blijkt daarbij echter ook, dat de weegfactor voor predictief of volggedrag in dit geval vrijwel overbodig is: de korte volgtijden, die meestal samenhangen met een verstoring, zijn in het algemeen sterk geassocieerd met kleine verschillen waardoor ze voornamelijk de mate van volggedrag bepalen. Dat betekent dat als er een storing wordt gedetecteerd er ook volggedrag wordt geconstateerd en omgekeerd, als er geen storing is er vrijwel altijd predictief gedrag wordt verondersteld. De weging met de mate van volggedrag voegt daardoor, in tegenstelling tot een situatie met meer dan één rijstrook waarop veel vaker volggedrag *zonder* verstoring voorkomt, vrijwel niets toe. Alleen de *frequentie van verstoringen*, zoals weergegeven in *Figuur 15*, is dus in dit geval al een bruikbare en goed te interpreteren maat.

De weging met de gemiddelde snelheid, zoals in het voorgaande beschreven, levert als resultaat *Figuur 16* op. Aangezien de gemiddelde snelheid op dit meettraject vrij constant was, is het voornaamste effect, dat alle criteriumwaarden circa 40% lager uitvallen.



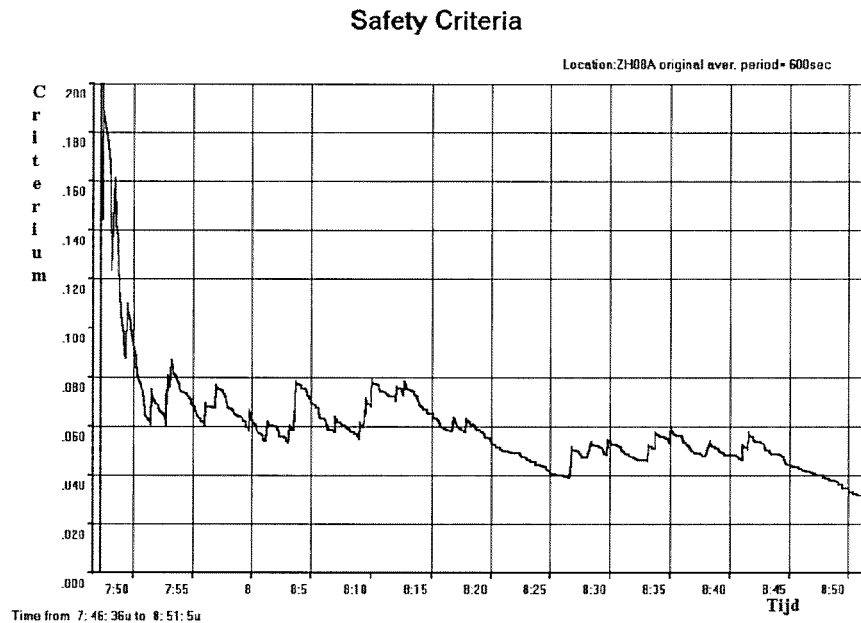
Figuur 13. Verloop van het veiligheids criterium voor een autoweg met één rijstrook per richting.



Figuur 14. Verloop van de gemiddelde snelheid en intensiteit op dezelfde autoweg als in Figuur 13.

N.B. De middelingsprocedure die bij de berekening van het criterium wordt toegepast heeft in het begin een 'inslingerperiode' van enkele minuten: als binnen die periode een aantal verstoringen plaatsvindt heeft dat tot gevolg dat de criteriumwaarde te hoog wordt: dit verklaart de hoge

beginwaarden in de *Figuren 15* en *16*. In de *Bijlagen* is nog een aantal voorbeelden opgenomen van toepassing op niet-autosnelwegen.



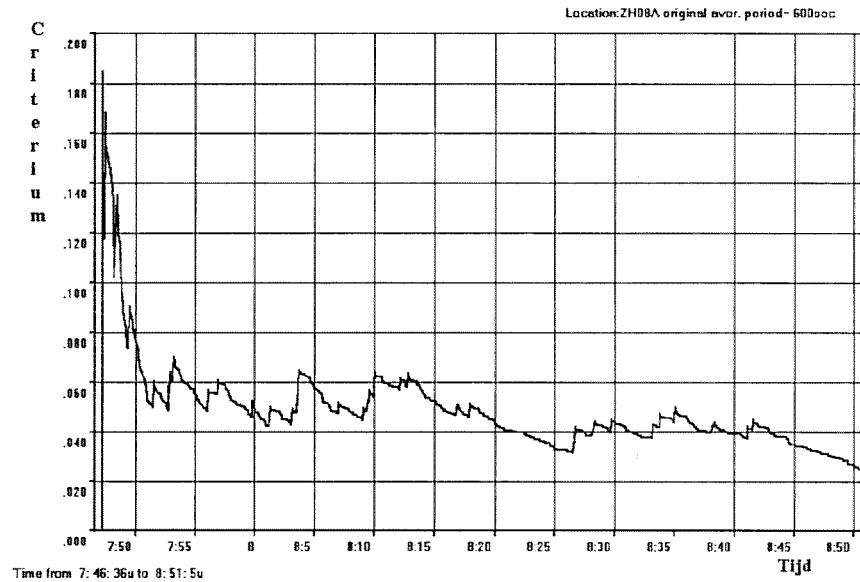
Figuur 15. *Frequentie van verstoringen op de autoweg van Figuur 13.*

4.3.3. *Voorlopige conclusies*

Het criterium zoals dat voor autosnelwegen is geformuleerd levert, na enige aanpassing, ook informatie over de veiligheid van de verkeersstroom op niet-autosnelwegen. Het is in deze vorm alleen bruikbaar op rechtstanden, ver van discontinuïteiten in de infrastructuur. De indicator is echter ook in deze situatie nog onvolledig, omdat er geen duidelijk inzicht wordt verkregen in inhaalgedrag, dat op dit type weg voor de veiligheid van groot belang is. Het is in veel gevallen weliswaar mogelijk om af te leiden of er, met grote waarschijnlijkheid, een inhaalmanoeuvre gaat worden uitgevoerd (korte volgtijd + groot snelheidsverschil), maar de informatie over de nabijheid van verkeer uit tegenovergestelde richting ontbreekt. Dit laatste zou met meetlussen op de rijstroken in beide richtingen overigens op te lossen zijn.

Het is aannemelijk dat het met snelheid gewogen criterium ook als veiligheidsindicator nabij bochten, wegversmallingen en dergelijke kan worden gebruikt; de rijnsnelheid is immers in die gevallen sterk bepalend voor de beheersbaarheid van het voertuig. De acceptabele grenswaarden voor het criterium zullen echter in die omstandigheden anders (meestal lager) zijn dan op rechtstanden.

Safety Criteria



Figuur 16. Met gemiddelde snelheid gewogen criterium voor autoweg van Figuur 13.

Voor veiligheidsindicatoren nabij kruispunten is waarschijnlijk een andere, in ieder geval meer uitgebreide, set parameters noodzakelijk. De basis hiervoor ligt in veel eerder uitgevoerd onderzoek naar conflicten op kruispunten (onder andere *The Malmö Study* (SWOV, 1984) en het proefschrift van Dr. ir. A.R.A. van der Horst (1990), *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*).

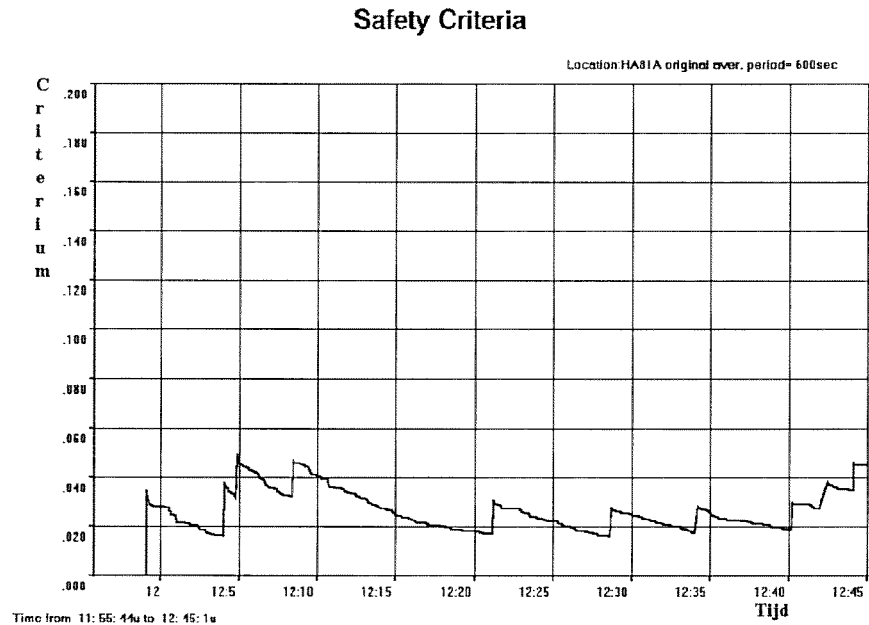
4.4. Het snelwegcriterium toegepast op wegen binnen de bebouwde kom

Het ligt voor de hand om voor wegen met een stroomfunctie binnen de bebouwde kom hetzelfde criterium te hanteren als voor de niet-auto-snelwegen buiten de bebouwde kom - dat wil zeggen: de met de snelheid gewogen frequentie van verstoringen.

In de Figuren 17 en 18 is een voorbeeld gegeven van typische weg met stroomfunctie; in Figuur 17 alleen de gemiddelde storingsfrequentie, in Figuur 18 de met snelheid gewogen gemiddelde frequentie. In feite is de zaagtandvorm van de grafieken een resultaat van de langzaam uitdempende middeling: elke sprong omhoog betekent de registratie van een verstoring die door middel van middeling tot een gemiddelde storingsfrequentie wordt omgerekend.

Ook op dit soort wegen blijkt de storingsfrequentie aanmerkelijk hoger te zijn dan op autosnelwegen (bij overigens veel lagere intensiteit: maximaal 700 vtg/uur). De mate van gevaar die hieraan verbonden is moet echter bij de veel lagere snelheden waarschijnlijk veel lager worden geschat.

De weging met de snelheid levert hier dan ook aanzienlijk lagere criteriumwaarden dan op de wegen buiten de bebouwde kom.



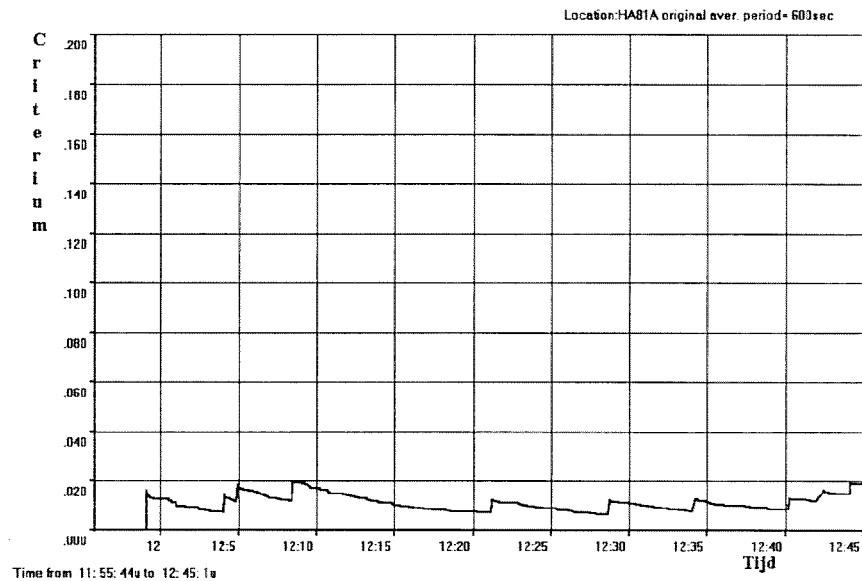
Figuur 17. *Storingsfrequentie op weg met stroomfunctie binnen de bebouwde kom.*

Het veiligheids criterium geeft binnen de bebouwde kom en op wegen met één rijstrook per richting waarschijnlijk weer een completer beeld van de veiligheid dat op wegen buiten de bebouwde kom; de inhaalmanoeuvres zijn doorgaans schaars en de infrastructuur levert bij de lage snelheid aanzienlijk minder specifieke problemen. Ook in dit geval blijven kruisingen een uitzonderingsgeval waarvoor een apart criterium nodig is. Verder zijn de voorbeelden die hier zijn gebruikt noodzakelijkerwijs beperkt tot wegen met een rijstrook en met een maximumsnelheid van 50 km/uur. Het is echter onwaarschijnlijk dat wegen met een hogere maximumsnelheid tot een dusdanig verschillend verkeersbeeld leiden dat het criterium onbruikbaar wordt.

4.5. **Wegen met meer dan een rijstrook per richting**

Wegen met meer rijstroken per richting worden vaak gekenmerkt door een scheiding van de rijbanen. Ze hebben daardoor een belangrijk aspect met snelwegen gemeen: nadruk op de interactie tussen verkeersdeelnemers die in dezelfde richting rijden. In dat geval is het te verwachten dat er een sterkere ontkoppeling tussen het optreden van storingen en volgedrag kan voorkomen en dus het oorspronkelijke criterium voor snelwegen weer geheel moet worden toegepast (dat wil zeggen: de weging met het aandeel volgedrag). Doordat de snelheden op deze wegen toch veel sterker

Safety Criteria



Figuur 18. Met gemiddelde snelheid gewogen criterium voor de weg uit Figuur 17.

kunnen variëren dan op snelwegen is het waarschijnlijk ook nodig om in het criterium de weging met de rijnsnelheid op te nemen om een zo goed mogelijk beeld van de variatie in veiligheid van gedrag te verkrijgen.

4.6. Samenvatting en discussie

Op grond van een beperkte hoeveelheid meetgegevens van niet-autosnelwegen kan alleen worden vastgesteld dat het voor snelwegomstandigheden ontworpen veiligheidscriterium ook in beperkte mate bruikbaar lijkt voor overige wegen. De beperkingen ontstaan doordat het criterium alleen informatie geeft over de interactie van opeenvolgende voertuigen en niets zegt over de veiligheid van het gedrag gegeven infrastructurele kenmerken. Met name voor wegen buiten de bebouwde kom moet het bestaande criterium als te beperkt worden beschouwd. Binnen de bebouwde kom geeft het waarschijnlijk vollediger informatie voor zover het het gedrag van het snelverkeer betreft; over het gedrag van langzaam verkeer en de interactie met snelverkeer daarvan kan vooralsnog niets gezegd worden omdat goede meetinstrumenten ontbreken.

Verder zal voor het beoordelen van verkeersgedrag op en nabij kruispunten, zowel binnen als buiten de bebouwde kom, een apart criterium moeten worden gebruikt.

Het is opvallend, dat de frequentie van verstoringen op niet-autosnelwegen aanmerkelijk groter is dan op snelwegen. Als we daarbij bedenken dat de intensiteiten doorgaans veel lager zijn en dat een snelweg ten minste twee rijstroken per richting telt, dan betekent dat ruwweg dat een bestuurder op niet-autosnelwegen vijf tot negen maal vaker per tijdseenheid aan

verstoringen wordt blootgesteld. Dit is op zichzelf niet vreemd: ook de ongevalsfrequentie op dit soort wegen is beduidend hoger dan op snelwegen. Wel geeft het aan dat het ontwikkelen van een zo volledig mogelijk diagnosticum voor dit type wegen zeker zin heeft.

Binnen de context van 'duurzaam-veilig' kan dit diagnosticum dan worden gehanteerd ter evaluatie van reeds genomen maatregelen, en tegelijkertijd als basis van 'on line' werkende regel- en informatiesystemen.

5. Veiligheidsindicatoren en verkeersstroomgeleiding

5.1. Aard van de toepassing van indicatoren

Verkeersstroomgeleiding houdt zich, zoals de naam impliceert, bezig met verkeersfenomenen op een geaggregeerd niveau. Dit houdt in dat veiligheid, zo het als een expliciete factor wordt meegewogen in de regelbeslissingen, ook op dat geaggregeerde niveau zal zijn gedefinieerd. Voorbeelden van veiligheidsoverwegingen op dat niveau zijn globale relaties tussen intensiteit en ongevalsfrequentie, globale relaties tussen gemiddelde snelheid en ongevallen, de gevolgen van al dan niet mengen van, in botsingstermen incompatibele, verkeerssoorten enzovoort. De hoofddoelstelling blijft echter verbonden aan het sturen en optimaliseren van verkeersstromen. Hoe maatregelen op dat niveau het individuele verkeersgedrag beïnvloeden is niet goed bekend en hier kunnen veiligheidscriteria als het hier ontwikkelde meer inzicht verschaffen.

De eerste soort toepassing van deze criteria is dan ook: evaluatie van meer globaal gerichte maatregelen in termen van veranderingen van individueel verkeersgedrag. Het is dus essentieel dat de criteria worden toegepast in een voor-nastudie rondom de invoering van stroombeheersingsystemen. Daarbij wordt de evaluatie als analyse-instrument gebruikt om relaties te kunnen leggen tussen veranderingen in stroomparameters als intensiteit, dichtheid en gemiddelde snelheid enerzijds en verandering in individuele gedragskenmerken als snelheid, snelheidsverschillen, volgafstand, inhaalgedrag en dergelijke anderzijds.

In eerste instantie levert deze werkwijze kennis op die gebruikt kan worden om de stroomregeling zelf te modificeren. Dit laatste kan op ten minste twee manieren:

1. door in de berekening van optimale toedeling over takken van het netwerk een weging (optimalisatie) van veiligheidseffecten te betrekken;
2. door de regeling uit te breiden met aanvullende maatregelen (bijvoorbeeld snelheidsvoorschriften of inhaalbeperkingen) die afhankelijk zijn van de toegelaten volumina.

Dit alles vindt dan uiteraard plaats op basis van min of meer gefixeerde relaties die overigens op regelmatige basis geverifieerd moeten worden. De waarde van de veiligheidsindicator wordt daarbij dus niet zelf gebruikt in het regelsysteem.

De tweede soort toepassing vindt plaats in de vorm van een *dynamische* aanvulling op een geleidingssysteem. Hierbij worden de criteria gebruikt voor een on-line evaluatie op continue basis. Deze evaluatie kan dan op twee manieren worden gebruikt:

1. voor de bijstelling van de sturing van stroomparameters (op basis van relaties als in de vorige paragraaf); of
2. voor het initiëren van speciale maatregelen zoals inhaalbeperkingen.

Het gaat hierbij nadrukkelijk om *lokale* maatregelen, waarbij dus ook lokale metingen moeten worden verricht. Door de verdeling van meet-

stations betekent dit in de praktijk dat dit type toevoeging aan een verkeersstroomgeleiding geen algemene systeembreiding zal vormen maar dat veeleer moet worden gedacht aan meer specifieke toepassing nabij knelpunten in het wegennet. Op de autosnelweg zijn zulke knelpunten vaak vooral aanwezig nabij knooppunten en grote weefvakken en bij wegversmallingen; altijd min of meer bepaald door de infrastructuur. Op niet-autosnelwegen is de situatie vergelijkbaar, met dien verstande dat de hoeveelheid en de aard van de infrastructurele knelpunten (vooralsnog) veel sterker gevarieerd zijn.

Uiteraard is ook een derde soort toepassing van de criteria mogelijk, waarbij een lokaal knelpunt wordt voorzien van een signalering die reageert op het ter plaatse vertoonde verkeersgedrag. Deze lokale regeling kan geheel los staan van een, al dan niet aanwezig, meer algemeen stroomgeleidings-systeem.

5.2. Mogelijke maatregelen

5.2.1. Algemeen

De toepasbaarheid van veiligheidscriteria in dynamische sturingssystemen wordt voor een deel bepaald door de mogelijkheid om specifieke maatregelen te nemen die de veiligheid beïnvloeden en min of meer los staan van maatregelen om de stroom te sturen. Zoals hiervoor is aangegeven zijn dat doorgaans maatregelen met een lokaal karakter, dus met een beperkt geldigheidsgebied. Het soort maatregelen hangt uiteraard samen met de soort van veiligheids-bedreigingen die door het toegepaste criterium kunnen worden onderscheiden, maar ook, en eigenlijk het sterkst, met maatregelen die praktisch nog haalbaar zijn.

In het algemeen stellen de criteria ons in staat om onderlinge interactie te beoordelen in termen van voertuigtypen, snelheid, volgafstand, snelheidsverschillen en, in beperkte mate, inhaalgedrag. Van deze reeks zijn alleen de snelheid, inhaalgedrag en het voertuigtype met bestaande maatregelen (enigszins) te beïnvloeden (bijvoorbeeld door middel van een gesloten-verklaring); volgafstand en verschillnelheid kunnen niet rechtstreeks met bestaande maatregelen worden beïnvloed.

Deze laatste twee parameters vormen echter een belangrijk aangrijpingspunt voor onveilige omstandigheden waardoor beïnvloeding zeker gewenst is. Zolang er echter nog geen algemene mogelijkheden zijn, bijvoorbeeld via de invoering van intelligent cruise control of iets dergelijks, om dit te bereiken kan toch worden getracht met boodschappen op 'variable message signs' enige greep op volgafstand en verschillnelheid te krijgen. Bovendien moeten we bedenken dat een redelijk groot deel van de waargenomen probleemsituaties met korte volgtijd en groot snelheidsverschil waarschijnlijk samenhangt met inhaalmanoeuvres die 'in uitvoering' zijn. Dat betekent, dat maatregelen die de lokale onrust in het verkeer trachten te verminderen door lokale beperking van het inhalen ook een positief effect zullen hebben op het volgafstanden en -snelheden.

Een maatregel als een tijdelijk inhaalverbod is echter alleen op niet-autosnelwegen met één rijstrook zonder meer goed uitvoerbaar. Op wegen met meer dan één rijstrook en zeker op snelwegen moet een nieuwe

variant worden gevonden die inhoudt dat *rijstrookwisseling* wordt verboden of ontraden, behalve uiteraard in weefgebieden.

5.2.2. *Maatregelen naar wegtype*

De autosnelweg

Het eerste type maatregel is een snelheidsbeperking: omdat het in dit geval om preventieve maatregelen gaat en niet alleen om maatregelen nabij filevorming, moet het snelheidsvoorschrift aanzienlijk gedifferentieerder kunnen zijn dan de bestaande twee of drie stappen.

Verder kan een differentiatie van maxima *en minima* per rijstrook worden toegepast. In het laatste geval moet dat dan vooral worden opgevat als instrument om een scheiding van langzamere en snellere voertuigen te bewerkstelligen en rijstrookwisselingen te beperken.

Ook andere maatregelen om rijstrookwisselingen te beperken komen in aanmerking, bijvoorbeeld met behulp van aanbevelingen met behulp van 'variable message signs'.

Wegen met een stroomfunctie buiten de bebouwde kom

Voor autowegen die in een netwerkbeheersingssysteem zijn opgenomen kunnen dezelfde maatregelen worden toegepast als voor snelwegen.

Voor andere wegen en met name enkelbaans wegen met één rijstrook per richting, is de veiligheidsinformatie van het huidige criterium erg beperkt en kan het feitelijk alleen worden gebruikt voor lange rechtstanden.

De maatregelen komen in dit geval neer op snelheidsbeperking, beperking van het inhalen en eventueel voorlichting omtrent volgafstand. Dit laatste zal, gezien de vaak veel lagere intensiteit op dit soort wegen, waarschijnlijk tot de uitzonderingen behoren.

Wegen met een stroomfunctie binnen de bebouwde kom

Voor deze situatie moeten we constateren dat het huidige veiligheids-criterium weliswaar informatie geeft over het onderlinge gedrag van het snelverkeer, maar dat dit gedrag zich doorgaans bij snelheden afspeelt waarbij - althans voor snelverkeer - meestal geen ernstige problemen ontstaan. De bron van de 'werkelijke' onveiligheid hier, de interactie van snel en langzaam verkeer, blijft vooralsnog buiten het bereik van de metingen. Het heeft daarom weinig zin specifieke maatregelen voor te stellen op basis van het huidige criterium.

5.3. **Invloed van veiligheidscriteria op verkeersstroomgeleiding**

Een niet onbelangrijke vraag is, hoe de toepassing van veiligheidscriteria in een stroomgeleidingssysteem de prestatie van dat systeem beïnvloedt. Met name als zou blijken dat de verkeersprestatie sterk negatief verandert onder invloed van veiligheidsoverwegingen, kan een groot praktisch probleem ontstaan. Het is goed mogelijk dat regelingen op basis van veiligheidscriteria veel eerder in de richting wijzen van het nemen van maatregelen dan bestaande systemen. Die maatregelen kunnen een beperking van de maximumsnelheid behelzen, maar dat hoeft niet altijd het geval te zijn.

Bovendien is bekend, en dit is in *Figuur 6* ook te zien, dat verlaging van de gemiddelde snelheid geen verlaging van de intensiteit tot gevolg hoeft te hebben, waardoor de wegcapaciteit dus niet zonder meer nadelig beïnvloed hoeft te worden. Verder zullen maatregelen ter

vergroting van de veiligheid vaak ook gericht zijn op vermindering van de onrust in het verkeer vergroting van de homogeniteit van gedrag.

Ook dergelijke maatregelen zullen de wegcapaciteit doorgaans niet verminderen. Voorlopig kan daarom worden aangenomen dat het toepassen van veiligheidscriteria binnen verkeersstroomgeleiding niet met capaciteitsverlies van betekenis gepaard hoeft te gaan, terwijl daar tegenover staat dat, als het aantal incidenten en ongevallen daadwerkelijk wordt beperkt, er behalve veiligheidswinst ook aanzienlijke winst in doorstroming wordt bereikt.

6. Samenvatting en conclusies

In dit rapport is de ontwikkeling beschreven van criteria die gebruikt kunnen worden voor het beoordelen van de lokale veiligheid van een verkeersstroom en die berekend kunnen worden op basis van gemakkelijk te verkrijgen gegevens. Deze criteria zijn afgeleid van een theorie van het verkeersgedrag en bevatten dan ook een vorm van analyse van dat gedrag. In tegenstelling tot criteria die op basis van statistische ongevalsanalyse worden bepaald, heeft een dergelijk criterium het voordeel dat niet alleen wordt gesignaleerd hoe veilig het verkeersgedrag ter plaatse is, maar bovendien is het mogelijk na te gaan welk soort gedragingen de veiligheid het sterkst bedreigt. Daarmee is er, in principe althans, ook een aan-grijpingspunt gemaakt voor specifieke maatregelen die dat gedrag tegen-gaan.

De criteria zijn ontwikkeld in het kader van het streven naar een duurzaam-veilig verkeer en kunnen op twee manieren worden toegepast:

1. als evaluatie-instrument van een scala van veiligheidsmaatregelen, bij voorkeur in de vorm van een evaluatie van gedragsverandering in een voor- en nastudie;
2. als 'on line'-criterium in een verkeersstroomgeleidingssysteem waarin het kan dienen om een bestaande regelstructuur beter te laten anticiperen op problemen in het verkeer of om specifieke lokale maatregelen te initiëren.

De aldus ontwikkelde eerste versie van een criterium is toegepast op zowel meetlusmetingen van autosnelwegen als op radarmetingen op niet-autosnelwegen. Daarbij kan het volgende worden geconstateerd:

- Bij toepassing van het criterium op een autosnelwegsituatie met een ongeval bleek het criterium beter dan andere verkeersparameters te duiden op een hogere mate van onveiligheid in de periode net voor het ongeval dan elders op de dag.
- Toepassing van het criterium op een snelwegsituatie met vastlopend verkeer wijst erop, dat het criterium in een veel vroeger stadium dan bijvoorbeeld de gemiddelde snelheid of intensiteit, aankomende problemen signaleert.
- Het verschil tussen de (relatief veilige) autosnelwegen en de (veel onveiligere) wegen buiten de bebouwde kom wordt ook in de criterium-waarden gereflecteerd.
- Bij toepassing op niet-autosnelwegen geeft het criterium slechts beperkte informatie over alle factoren die de veiligheid beïnvloeden: effecten van de infrastructuur als bochten, wegversmallingen en slecht wegdek alsmede het gedrag op kruisingen vallen geheel buiten het diagnostisch vermogen.

De voorlopige conclusie van dit onderzoek is dan ook dat de gehanteerde formulering van het veiligheids criterium zeker perspectief biedt voor gebruik in de genoemde toepassingen op autosnelwegen. Voor niet auto-snelwegen is het huidige criterium alleen bruikbaar voor de beoordeling van verkeersgedrag op (lange) rechtstanden. Uitbreiding van de criteria op deze, voor de veiligheid zeer belangrijke, wegcategorieën is zeker geboden.

7. Mogelijke voortzetting van het onderzoek

De ontwikkelingen tot dusver omvatten eigenlijk het beginstadium van de ontwikkeling van het veiligheids criterium. Om tot een in de praktijk bruikbaar criterium voor autosnelwegen te komen zijn een validatie en calibratie noodzakelijk. Deze activiteiten zijn daarom ingebracht in het DRIVE-project *HOPES*, waar, als het project wordt geaccepteerd, evaluatie kan plaatsvinden aan de hand van een groot bestand van observaties.

Na deze evaluatie en eventuele aanpassing van het criterium, kan het in een praktisch toepasbare vorm worden geprogrammeerd voor 'on line'-toepassingen.

De derde stap in de ontwikkeling is de uitbreiding van het criterium voor een zo volledig mogelijke diagnostiek van niet-autosnelwegen met een stroomfunctie: deze ontwikkeling kan met name een goed hulpmiddel opleveren in het ontwikkelingsproces naar een duurzaam-veilige weg- en verkeersstructuur buiten de bebouwde kom. Een belangrijk deel van deze ontwikkelingen behoeft overigens niet te wachten op de vorige stappen, maar kan direct aanvangen.

Na de ontwikkeling en evaluatie van criteria is er een scala aan toepassingsgericht onderzoek mogelijk waarover in dit stadium nog geen duidelijke uitspraak kan worden gedaan.

Literatuur

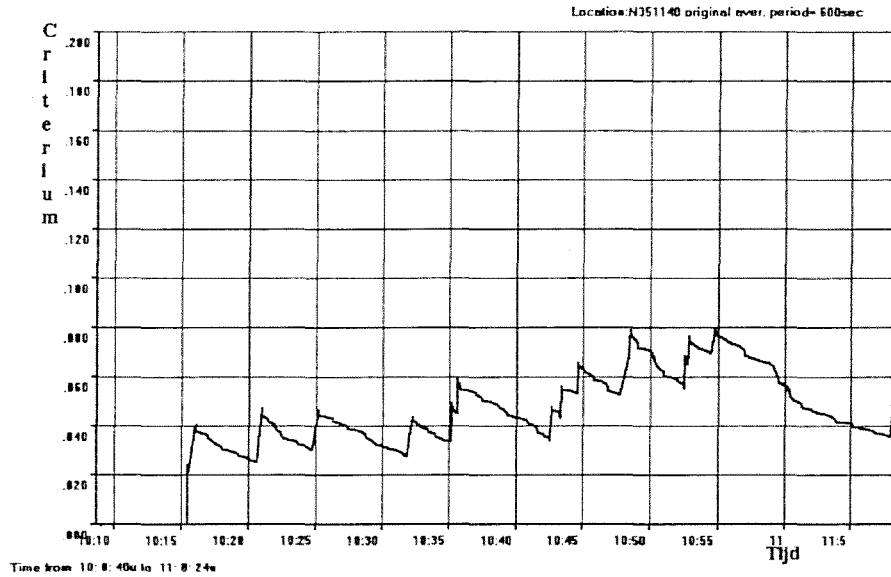
Horst, A.R.A. van der (1990). *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. Thesis Groningen. Soesterberg, Institute for Perception IZF TNO.

SWOV (1984). *The Malmo study; A calibration of traffic conflict techniques*. A study organised by ICTCT - the International Committee on Traffic Conflict Techniques. R-84-12. SWOV, Leidschendam.

SWOV (1994). *Control strategies for a highway network; A joint research project of SWOV, The Technical University Delft and the Insitute for perception TNO, sponsored by the Dutch Ministry of Transport and Watermanagement*. Part I, II and III. R-94-34 I/II/III. SWOV, Leidschendam.

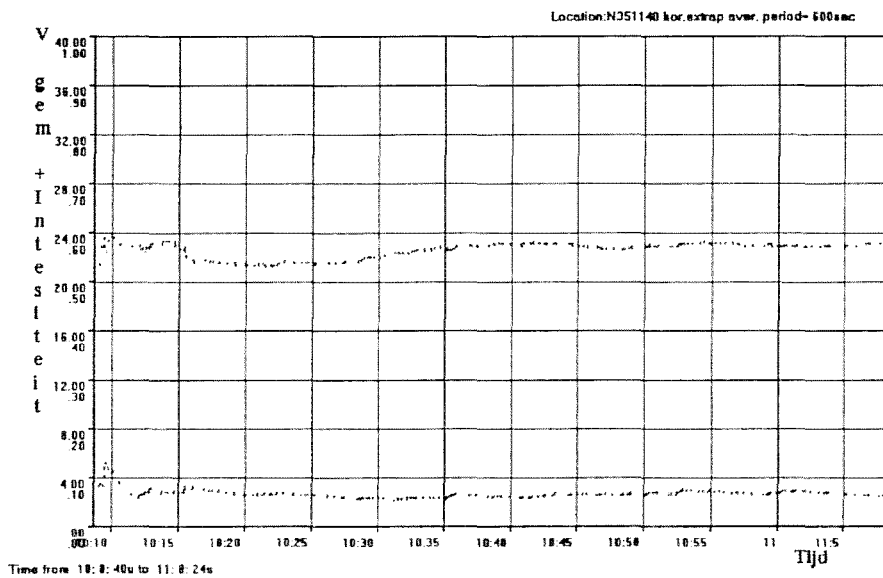
Appendix

Safety Criteria



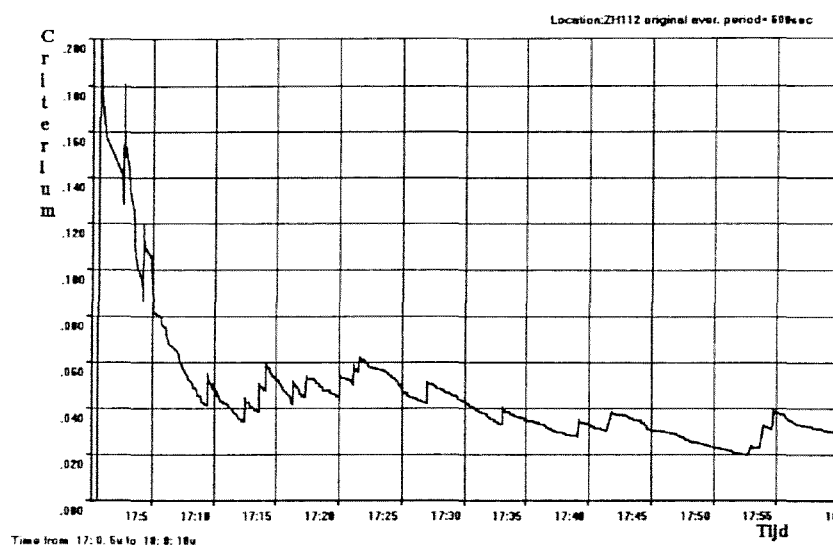
Figuur A1. Aanvullend voorbeeld: NAS 80 km/uur, verloop veiligheids-criterium.

Induction loop data



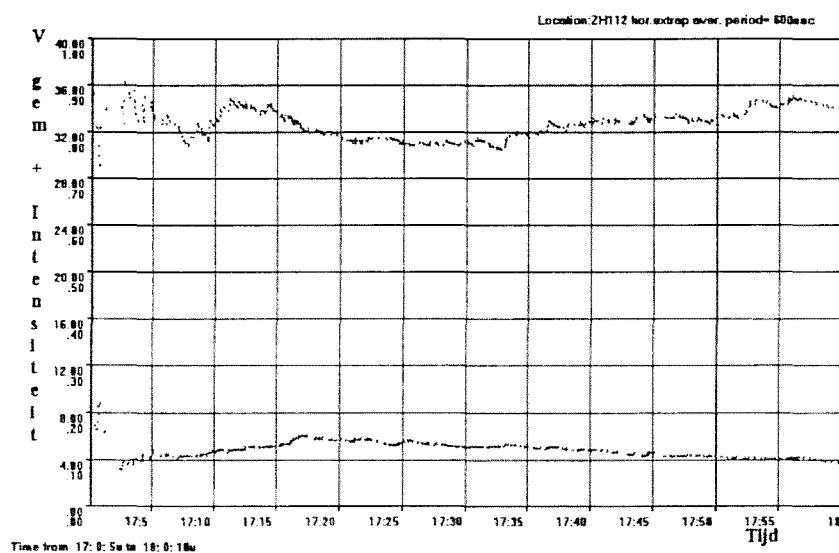
Figuur A2. Verloop van gemiddelde snelheid en intensiteit op de weg van Figuur A1.

Safety Criteria



Figuur A3. NAS met maximumsnelheid 100 km/uur; verloop veiligheids-criterium.

Induction loop data



Figuur A4. Verloop van gemiddelde snelheid en intensiteit op de weg van Figuur A3.