

Contrastwaarnemingen in tunnels

Een meetmethode

R-93-36
Dr.ir. D.A. Schreuder
Leidschendam, 1993
Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

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

Samenvatting

De ingang van een lange verkeerstunnel kan zich overdag aan een naderende autobestuurder voordoen als een 'zwart gat' waarin geen details kunnen worden waargenomen. Dit 'zwarte gat-effect' is nadelig voor het rijcomfort, en kan de verkeersveiligheid beïnvloeden. Er zijn drie methoden in gebruik om dit zwarte gat-effect te voorkomen, of tenminste te verminderen:

- het aanbrengen van (zonwerende) roosters;
- het installeren van symmetrische verlichting;
- het installeren van tegenstraalverlichting.

Bij tegenstraalverlichting wordt, in tegenstelling tot de (traditionele) symmetrische verlichting, het licht, afkomstig van de armaturen in de tunnel, gericht *tegen* de rijrichting van het verkeer. Dit type van verlichting is vooral in Zwitserland in zwang. In Nederland is een proefneming in de tunnel te Velsen uitgevoerd.

Het oogmerk van de proefneming is het onderzoeken van de mogelijkheid om, met behulp van tegenstraalverlichting een verlichtingsinstallatie voor tunnelingangen te creëren die, bij gelijk blijvende kwaliteit, goedkoper is dan de traditionele verlichting, zowel wat betreft de installatie als de exploitatie.

Een essentieel onderdeel van de proefneming is het opstellen van een methode om de kwaliteit van de verlichting vast te stellen. De kwaliteit wordt omschreven als de mate waarin de voor de verkeersveiligheid belangrijke voorwerpen (de risicodragende objecten) kunnen worden waargenomen. Deze objecten kunnen worden afgeleid uit de ongevallen die daarmee plaatsvonden. Uit de beschikbare statistieken omtrent ongevallen op de openbare weg blijken voor de verkeersveiligheid in tunnels in drie groepen van obstakels van belang zijn, en wel (in afnemende volgorde van belangrijkheid):

- (andere) auto's;
- tunnelwanden en geleiderailconstructies;
- losse voorwerpen.

De methode ter bepaling van de kwaliteit van de ingangsverlichting van verkeerstunnels omvat de volgende aspecten:

- bepaling van de adaptatietoestand;
- bepaling van de sluiertiluminantie;
- bepaling van het 'interne' contrast bij (visueel middelmatig grote) objecten (auto's);
- bepaling van de herkenbaarheid van (visueel middelmatig grote) objecten (auto's);
- bepaling van het drempelcontrast van in de lengterichting geplaatste objecten in het vlak van de weg (wegmarkeringen);
- bepaling van het drempelcontrast van op het wegdek geplaatste kleine objecten (obstakels).

Voor de metingen is een opstelling met een 'dynamische laser' gekozen. Vanuit een rijdende auto wordt, met behulp van laserstralen, 60-100 meter voor de auto een contrastvoorwerp op het wegdek geprojecteerd. De waar-

nemingen worden door de bestuurder uitgevoerd. In het voertuig wordt de benodigde apparatuur geplaatst ter registratie van de meetresultaten alsmede voor het doen van alle 'andere' metingen. Een voorwaarde is dat de luminantie van het te projecteren contrastvoorwerp moet worden aangepast aan de luminantie in de tunnel. Hiertoe dient de luminantie van het wegdek te worden gemeten, en 'on line' te worden teruggekoppeld naar het vermogen van de laser. Voor de bepaling van de sluiertluminantie en van het 'interne' contrast bij objecten worden separate metingen uitgevoerd volgens eerder vastgestelde methoden. Voor de bepaling van de herkenbaarheid van objecten worden enquêtes overwogen.

Op 31 augustus 1993 is in de Drecht-tunnel te Dordrecht een demonstratie gegeven van de meetmethode. Deze demonstratie is uitgevoerd door de firma RESAL-LASER te Nieuw-Lekkerland, en werd bijgewoond door vertegenwoordigers van de Bouwdienst van de Rijkswaterstaat, de SWOV en C. Stam Advies. Behalve enige tekortkomingen in de software ten behoeve van de meting en de kalibrering van de luminantie bleken alle subsystemen te naar bevrediging te functioneren. De demonstratie is unaniem als bevredigend beschouwd.

Summary

Contrast observations in tunnels

A measuring method

The entrance to a long road tunnel can present itself to an approaching driver as a 'black hole' during the daytime, with no possibility of observing any details. This 'black hole effect' represents a hindrance to driving comfort, and may affect road safety. Three methods are currently in use to prevent this black hole effect, or at least reduce it:

- the application of (sun-screening) louvres;
- the installation of symmetrical lighting;
- the installation of counter beam lighting.

In contrast to (traditional) symmetrical lighting, counter beam lighting aims the light *in the opposite direction* to incoming traffic. This type of lighting is particularly popular in Switzerland. In the Netherlands, a trial is being conducted in the tunnel at Velsen.

The objective of the trial is to study the possibility of creating a lighting system for tunnel entrances using counter beam lighting which, at an equivalent quality, is cheaper than traditional lighting, both with respect to installation and operation.

An essential element of the trial is to design a method to determine the quality of lighting installations. The quality is described as the degree to which objects important to road safety (i.e. risk-associated) can be observed. These objects can be derived from accidents which have occurred as a result of their presence. The available statistics with regard to accidents on public roads have shown that with respect to road safety in tunnels, three groups of obstacles are relevant, these being (in descending order of importance):

- (other) vehicles;
- tunnel walls and crash barriers;
- loose objects.

The method used to determine the quality of entrance lighting at road tunnels includes the following aspects:

- determination of the adaptation level;
- determination of the veiling luminance;
- determination of the 'internal' contrast for (moderately large) objects (cars);
- determination of the recognisability of (moderately large) objects (cars);
- determination of the threshold contrast for objects placed in a longitudinal direction on the road surface (road markings);
- determination of the threshold contrast for small objects placed on the road surface (obstacles).

To measure these parameters, a setup with a 'dynamic laser' was chosen. From a moving car, a contrasting object is projected onto the road surface 60-100 meters in front of the car with the aid of laser beams. The obser-

uations are carried out by the driver. The vehicle houses the necessary equipment to register the measurement results, and to perform all 'other' measurements, one condition being that the luminance of the contrast object to be projected must be adapted to the luminance level in the tunnel. This requires the luminance of the road surface to be measured and fed back 'on line' to determine the power of the laser. To determine the veiling luminance and the 'internal' contrast of objects, separate measurements are carried out according to previously established methods. Questionnaires are being considered to determine the recognisability of objects.

On August 31, 1993, a demonstration was given at the Drecht tunnel at Dordrecht to illustrate this measurement method. The demonstration was carried out by RESAL-LASER, a company based in Nieuw-Lekkerland, and was attended by representatives from the Construction Division of the Public Works Department, the SWOV and C. Stam Advies. Apart from some shortcomings in the software for the purposes of measurement and calibration of the luminance level, all subsystems proved to function satisfactorily. The demonstration was unanimously judged to be satisfactory.

Inhoud

Voorwoord

1. *Inleiding*
 - 1.1. Tegenstraalverlichting in Zwitserland en in Nederland
 - 1.2. Het oogmerk van de proefneming

2. *Verkeerskundige en verlichtingskundige aspecten van tegenstraalverlichting*
 - 2.1. Symmetrische, tegenstralende en meestralende verlichting
 - 2.2. Verkeersrelevante objecten
 - 2.2.1. Tafereelreconstructie
 - 2.2.2. Visueel kritische elementen
 - 2.2.3. Visuele waarneming van obstakels in tunnels
 - 2.2.4. Wegmarkeringen
 - 2.3. De waarneming van obstakels in tunnels
 - 2.4. Het herkennen van risico-objecten
 - 2.5. De equivalente sluiertiluminantie en verblinding
 - 2.6. Waarnemingsafstanden
 - 2.7. Operationalisering
 - 2.7.1. De adaptatieluminantie
 - 2.7.2. Auto's als risico-object
 - 2.7.3. Wanden en geleiderailconstructies als risico-object
 - 2.7.4. Losse voorwerpen op de weg als risico-object
 - 2.7.5. Waarnemingscriteria voor obstakels in tunnels

3. *Uitwerking*
 - 3.1. Bepaling van de adaptatietoestand
 - 3.1.1. Alternatieven
 - 3.1.2. Keuze uit de alternatieven
 - 3.1.3. Uitvoering
 - 3.2. Bepaling van de sluiertiluminantie
 - 3.3. Bepaling van het 'interne' contrast bij objecten
 - 3.4. Bepaling van de herkenbaarheid van objecten
 - 3.5. Bepaling van het drempelcontrast van objecten in het vlak van de weg

4. *Uitvoering van de metingen*

5. *Ten besluit: De demonstratie van 31 augustus 1993*

Literatuur

Afbeeldingen 1 t/m 10

Voorwoord

Op 9 juni 1992 heeft de Bouwdienst van de Rijkswaterstaat de SWOV een opdracht verleend die als volgt is geformuleerd: "Het ontwikkelen van een meetmethode waarmee de kwaliteit van tegenstraalverlichting kan worden bepaald. De methode moet in de toekomst ook geschikt gemaakt kunnen worden voor de klassieke verlichtingssystemen. De te ontwikkelen methode moet hierop aansluiten" (Opdrachtbon Nummer: Du 2A-62, dd. 9 juni 1992).

Op 12 februari 1993 is een vervolgoopdracht gegeven die als volgt is geformuleerd: "De tweede fase voor het ontwikkelen van een meetmethode waarmee de kwaliteit van tegenstraalverlichting kan worden bepaald. De methode moet in de toekomst ook geschikt gemaakt kunnen worden voor de klassieke verlichtingssystemen. De thans te ontwikkelen methode moet hierop aansluiten. De methode zal worden gedemonstreerd d.m.v. een werkend meetsysteem" (Opdrachtbon Nummer: Du 2A-142, d.d. 12 februari 1993).

Een groot deel van de werkzaamheden zijn uitgevoerd door C.Stam Advies te Nieuw Lekkerland en door de door dit adviesbureau ingeschakelde 'onderaannemers', zoals studenten van de Technische Universiteit te Delft, de Hogere Technische School te Rotterdam, en de firma RESAL-LASER te Nieuw-Lekkerland. Op een aantal momenten zijn interimrapporten uitgebracht. In het onderhavige rapport wordt een eindverslag van het project gegeven.

1. Inleiding

1.1. Tegenstraalverlichting in Zwitserland en in Nederland

Het - inmiddels gerealiseerde - voornemen om in Nederland een proefneming uit te voeren, waarbij het zgn. 'tegenstraalprincipe' voor de ingangsverlichting van tunnels zou worden toegepast, was aanleiding tot het zoeken naar een meetmethode waarmee de waarneembaarheid in tunnels onder normale omstandigheden van weer en verkeer kan worden bepaald.

In de meeste landen, zo ook in Nederland, worden tunnels uitgerust met een symmetrische verlichting, maar in sommige landen (met name in Zwitserland en Oostenrijk, maar ook in Oost-Frankrijk en Zuid-Duitsland) geeft men de voorkeur aan tegenstralende verlichting (zie Blaser, 1990; Schreuder, 1991). En in Canada wordt meestralende verlichting voor tunnels gepropageerd (Ketvirtis, 1989). Dit laatste is waarschijnlijk ingegeven door de nieuwe 'trend' in de openbare verlichting, vooral in de USA, waarbij meestralende verlichting ook voor 'gewone' wegverlichting wordt gepropageerd (IES, 1988; Janoff, 1988).

Tegenstralende verlichting heeft, zoals verderop zal blijken, bepaalde voor- en nadelen. De beslissing om voor een bepaald project de tegenstraalverlichting toe te passen hangt af van het gewicht dat aan de verschillende voor- en nadelen in de bij die tunnel behorende situatie moet worden toegekend. Het is dus heel goed mogelijk dat voor een bepaalde tunnel de tegenstraalverlichting het beste oplossing is, terwijl voor een andere tunnel de symmetrische (traditionele) verlichting te verkiezen is. Uiteraard spelen, naast deze verkeerskundige en lichttechnische argumenten, bij de uiteindelijke beslissing nog vele andere factoren een rol.

Vrijwel alle onderzoek en het grootste deel van de praktijkervaring met tegenstraalverlichting is in Zwitserland opgedaan. De specifiek Zwitserse situatie heeft daarbij zwaar gewogen. Het is dus allerminst vanzelfsprekend dat de tegenstraalverlichting ook voor Nederland een goede oplossing zou kunnen bieden, ook al is de ervaring in Zwitserland positief. Alleen het opdoen van ervaring in Nederland kan een antwoord op deze vraag geven. Ook de ervaringen met de in Brussel gebouwde tunnel met tegenstraalverlichting kunnen niet meer dan een aanwijzing opleveren. Op grond van deze overwegingen is in Nederland een proefneming met tegenstraalverlichting in uitvoering genomen, en wel in de Westbuis van de tunnel te Velsen (Noord-zuid rijrichting). De installatie is op 1 augustus 1993 in gebruik genomen.

1.2. Het oogmerk van de proefneming

Het oogmerk van de proef kan daarbij als volgt worden beschreven:

1. Is het mogelijk om, met behulp van tegenstraalverlichting een verlichtingsinstallatie voor tunnelingangen te creëren die, bij gelijk blijvende kwaliteit, goedkoper is dan de traditionele verlichting?
2. Is het mogelijk om, gebruik makend van het beginsel van de tegenstraalverlichting, een verlichting te ontwerpen die in installatie en exploitatie goedkoper is dan de gebruikelijke installaties?

3. Wat is de optimale regeling van de verlichting in afhankelijkheid van de omstandigheden van weer en tijd van het etmaal?

Een essentieel onderdeel van de proefneming is derhalve een methode om de kwaliteit van de verlichting vast te stellen. Zoals in het Voorwoord reeds is vermeld, wordt deze methode in het onderhavige rapport beschreven. Opgemerkt dient te worden dat de methode in de toekomst voor meer algemene beoordelingen van de kwaliteit van de verlichting van tunnels moet kunnen worden gebruikt.

Er zij op gewezen dat de bedoelde proefnemingen met tegenstraalverlichting en de daarbij behorende methoden voor het bepalen van de kwaliteit van de verlichting, zijn toegespitst op tunnels in rurale autosnelwegen en op tunnels in andere rurale hoofdverkeerswegen die uitsluitend voor het gemotoriseerde verkeer toegankelijk zijn. Het is een vraag apart, wat de eventuele merites zouden kunnen zijn van tegenstraalverlichting voor andere tunnels, bijvoorbeeld voor tunnels met gemengd verkeer. Zou men deze vraag willen beantwoorden, dan is een nieuw en mogelijk andersoortig onderzoek nodig.

2. Verkeerskundige en verlichtingskundige aspecten van tegenstraalverlichting

2.1. Symmetrische, tegenstralende en meestralende verlichting

Het tegenstraalprincipe kan als volgt worden toegelicht. Men kan het licht dat uit de boven de weg gemonteerde armaturen treedt en dat het wegdek treft, in beginsel op drie wijzen richten:

- a. tegen de rijrichting van het verkeer in gericht;
- b. met het verkeer meestralend;
- c. symmetrisch ten opzichte van de verkeersrichting stralend.

Men noemt deze drie verlichtingswijzen wel de 'tegenstralende verlichting', de 'meestralende verlichting' en de 'symmetrische verlichting'. Een gedetailleerde studie over de voor- en nadelen van deze drie verlichtingswijzen is gegeven door Schreuder (1991).

Het belang van de verlichtingswijze is het gevolg van het feit dat de detecteerbaarheid van objecten op de weg door twee factoren wordt bepaald:

- de adaptatieluminantie;
- het contrast tussen het object en de achtergrond.

Het contrast C wordt op de bekende wijze weergegeven door:

$$C = (L_o - L_b)/L_b$$

waarin L_o en L_b de luminanties zijn van het object, respectievelijk de directe achtergrond waartegen het object afsteekt.

Wanneer het gaat om de herkenbaarheid van voorwerpen, dan moeten daaraan nog worden toegevoegd:

- het (interne) contrast tussen delen van het object (zowel kleur als luminantie);
- de bekendheid van (met) het voorwerp;
- het verwachtingspatroon.

Op grond van de eerste factor (de adaptatie) is het gebruikelijk om in de openbare verlichting, alsook in de tunnelverlichting, de wegdekluminantie als het belangrijkste criterium voor de verlichtingskwaliteit te beschouwen. Hierop is de zgn. *luminantietechniek* gebaseerd (zie De Boer, 1951). De luminantietechniek is in detail beschreven door Schreuder (1964; 1967). 'Tegenstralend' is de luminantie (luminance yield) hoger, en vaak veel hoger, dan 'meestralend'. Dit komt omdat vrijwel alle wegdekken, ook in droge toestand, onder de bij wegverkeer gebruikelijke strijkende waarnemingsrichting een sterk spiegelende reflectie vertonen (zie De Boer (ed.), 1967; Schreuder, 1967, 1993). Op basis hiervan kan tegenstraalverlichting een mogelijk voordeel opleveren voor de verlichting van tunnels.

Er is nog een tweede overweging. Zowel de wegdekluminantie als het contrast tussen een object op de weg en de achtergrond (het wegdek zelf) hangt af van de wijze waarop het licht ingestraald wordt, alsmede van de wijze waarop het licht door het wegdek en door het object wordt weerkaatst. Bij tegenstralende verlichting is het contrast hoger omdat bij gelijk-

ke luminantie van het wegdek de naar de weggebruiker gekeerde (voor-)kant van objecten in de schaduw liggen, en dus een geringere luminantie hebben dan bij een symmetrische of een meestralende verlichting. Bovendien is bij tegenstralend verlichting de bijdrage van het licht dat door het wegdek wordt weerkaatst en (indirect) het voorwerp treft, geringer.

Bij een onderlinge vergelijking van de drie genoemde verlichtingswijzen komen een aantal aspecten naar voren. In de meeste gevallen vertegenwoordigen de tegenstralende en de meestralende verlichting uiteraard de extremen, terwijl de symmetrische verlichting daartussen in ligt.

- Wanneer men gebruik maakt van het feit dat de reflectie van de meeste wegdekken een sterk spiegelend karakter vertoont, wordt bij gelijke horizontale verlichtingssterkte op het wegdek een hogere wegdekluminantie bereikt dan bij symmetrische verlichting; bij meestralende verlichting is de luminantie nog lager.

- Bij tegenstralende verlichting wordt de achterkant van eventuele objecten sterker, en de voorkant ervan zwakker verlicht, zodat de luminantie van de objecten lager wordt dan bij symmetrische of bij meestralende verlichting. De bijdrage van het, aan het wegdek gereflecteerde licht (de indirecte bijdrage), vergroot het verschil tussen de drie wijzen van verlichting.

- Deze twee effecten te zamen leiden voor tegenstraalverlichting tot een hoger contrast tussen object en wegdek, en dus (meestal) tot een betere zichtbaarheid, dan voor de andere verlichtingswijzen. Mogelijk kan voor gelijke zichtbaarheid een lager lichtniveau worden geïnstalleerd. Hier zij opgemerkt dat zich in alle gevallen situaties kunnen voordoen waarbij de luminantie van het voorwerp en die van het wegdek (vrijwel) gelijk zijn - waarbij het contrast dus (ongeveer) nul is, en waarbij het voorwerp dus (vrijwel) onzichtbaar is. Het is niet vooraf te voorspellen of dit effect (de zgn. 'Tamzone') zich bij 'onbelangrijke' of juist bij 'belangrijke' objecten zal voordoen.

- De visuele geleiding is bij tegenstralende en bij symmetrische verlichting beter dan bij meestralende verlichting, vooral door het feit dat de lichtbronnen zelf (beter) zichtbaar zijn.

- Bij tegenstralende en meestralende verlichting is de lichtverdeling kritischer dan bij symmetrische verlichting. Dit leidt meestal tot een lager armatuurrendement.

- Om bij tegenstralende verlichting een even goede gelijkmatigheid van het luminantiepatroon op het wegdek te bereiken als bij de andere verlichtingswijzen, worden hogere eisen gesteld aan de vorm van de lichtsterkteverdeling van de armaturen. Ook dit leidt meestal tot een lager armatuurrendement.

- Bij tegenstraalverlichting is de verblinding gewoonlijk veel sterker dan bij symmetrische verlichting. Meestralende verlichting kan vrijwel 'verblindingsvrij' worden uitgevoerd. Er bestaat echter een duidelijke relatie tussen de verblinding en de optische geleiding.

Met twee aspecten is bij dit alles nog geen rekening gehouden. De eerste is de vraag of de mate waarin verlichting bijdraagt tot de verkeersveiligheid kan worden uitgedrukt in de waarneembaarheid van objecten op de weg, en de tweede is de vraag of een verhoging van de doeltreffendheid ook gepaard gaat met een hogere doelmatigheid (efficiency).

Tenslotte noemen we een aantal publikaties waarin de tegenstraalverlichting op overzichtelijke wijze is beschreven. De belangrijkste zijn: Anon (1974); Blaser (1990); CIE (1984, 1990); Novellas (1982); Schreuder (1979, 1981, 1991, 1991a); Stolzenberg (1984); Walthert (1976, 1978). De meeste publikaties betreffen tegenstraalverlichting in tunnels.

2.2. Verkeersrelevante objecten

2.2.1. Tafereelreconstructie

Men kan het visuele gebeuren, dat zich aan de waarnemer/weggebruiker ontrolt, beschrijven in termen van *taferelen*. Het kenmerkende van een tafereel is, dat een globaal overzicht van de informatie voldoende is om het belang van bepaalde details te kunnen inschatten. Het is niet nodig om *alle* informatie die in het tafereel opgeborgen zit, ook inderdaad ter beschikking te hebben. Het is de 'kunst' van adequaat waarnemen om uit een veelal klein gedeelte van de informatie de hoofdzaken (de visueel kritische elementen) uit het tafereel af te leiden. Anders gezegd: het gaat erom, om uit een veelal klein deel van de informatie het tafereel op een zodanige wijze te *reconstrueren* dat de juiste beslissingen kunnen worden genomen. Waarnemen kan dus worden beschreven als het reconstrueren van deze taferelen in termen van de beslissingen die dienen te worden genomen.

Uit de veelheid van visuele elementen kan men een aantal elementen aanwijzen die essentieel zijn voor het reconstrueren van de taferelen die voor het verkeer van belang zijn. In Schreuder (1993) is een overzicht gegeven van de aspecten die daarbij een rol spelen. In de aan deze studie ontleende Tabel 1 zijn een aantal 'voorwerpen' opgesomd, waarvan mag worden aangenomen dat het belangrijk is dat de weggebruiker-automobilist-waarnemer ze (tijdig en juist) kan waarnemen. Deze voorwerpen worden de *visueel kritische elementen* genoemd. Tot de visueel kritische elementen behoren ook de voorwerpen die *gevaar* (kunnen) opleveren. Deze gevaarlijke voorwerpen worden de *risicodragende elementen* genoemd. In par. 2.2.3 komen we terug op deze verschillende elementen (Zie ook par. 2.6).

Dwarspositie kiezen/handhaven binnen de rijstrook	75 meter
Snelheid kiezen	75 meter
Stoppen voor discontinuïteit	175 meter
Nemen van een bocht	375 meter
Noodmanoeuvre; uitwijken	125 meter
Idem; noodstop	140 meter

Tabel 1. *De minimale waarden van de zichtruimte voor een aantal typen manoeuvres; snelheid 90 km/uur (naar Schreuder, 1993).*

Bij de reconstructie van de taferelen moet onderscheid worden gemaakt tussen twee *taakaspecten*. Ze worden vaak aangeduid als Taak I en Taak II. Hier volgt een korte beschrijving van deze taakaspecten. Ook dit is in Schreuder (1993) in detail besproken.

Het begrip 'rijtaak' is gebaseerd op de gedachte dat alle manoeuvres die door een automobilist/verkeersdeelnemer in het verkeer worden uitgevoerd, *per definitie* het resultaat zijn van *beslissingsprocessen* die (ook *per definitie*) volgen op het verwerken van *informatie*. De informatie die verwerkt wordt, bestaat voor een deel uit informatie die 'on line, uit de omgeving worden afgeleid, en voor een deel uit informatie die uit de *voorraad* (het *geheugen*) wordt geput. De uit de omgeving opgenomen informatie is vrijwel uitsluitend visuele informatie.

Voorts is het *verwachtingspatroon* van belang. De reacties en de daarop gebaseerde beslissingen hangen in sterke mate ermee samen of er sprake is van objecten die in het verwachtingspatroon passen, of niet. Wanneer dit het geval is, spreekt met wel van Taak I. Wanneer een verkeersdeelnemer geconfronteerd wordt met onverwachte objecten, zijn veelal *noodmanoeuvres* nodig, die een aantal andere kenmerken kunnen vertonen dan de 'gewone' manoeuvres. Dit wordt samengevat in het begrip Taak II. Een uitvloeisel van het feit dat bepaalde voorwerpen in het verwachtingspatroon vallen is, dat er actief naar *gezocht* kan worden.

Voorwerpen die in verband met het correct uitvoeren van Taak I tot de visueel kritische elementen behoren, vormen drie groepen:

- voorwerpen behorende tot het wegmeubilair (lichtmasten, bermreflectoren, voorwaarschuwingstekens, verkeerstekens, waarschuwingslichten, verkeerslichten);
- voorwerpen behorende tot de weg zelf (wegmarkeringen);
- andere verkeersdeelnemers (in het bijzonder voorliggers).

Voor Taak II gaat het om twee groepen van voorwerpen die als risicodragende elementen kunnen optreden:

- stationaire voorwerpen (obstakels; stilstaande auto's; stenen en dozen op de weg; verloren lading en verloren auto-onderdelen, maar ook lichtmasten, brugpijlers, bomen, gaten in de weg enz.);
- bewegende voorwerpen (verkeersdeelnemers, meer in het bijzonder kruisend verkeer, maar ook - vooral langzaam rijdende - voorliggers).

Op de weg komen deze risicodragende elementen uiteraard niet allemaal even vaak voor. Hier zij gewezen op het belangrijke IZF-onderzoek van Walraven en Padmos betreffende de visuele elementen die in de praktijk voor het wegverkeer van belang zijn (Zie Padmos, 1981; 1982; 1984; 1988; 1991; Padmos & Walraven, 1982; Walraven, 1980). Zie ook Schreuder (1993).

2.2.2. Visueel kritische elementen

Aan de hand van de overwegingen die we hierboven hebben weergegeven is het mogelijk om in twee opzichten een onderscheid te maken tussen de visueel kritische elementen die voor waarneming in aanmerking komen:

- de waarnemer weet al dan niet om welk element het gaat;
- er wordt al dan niet naar gezocht.

Combinatie leidt tot vier mogelijkheden, volgens het schema op blz 13. De vier mogelijkheden sluiten als volgt aan op de eerdere indeling in manoeuvres: het geval A correspondeert met *stuurmanoeuvres*, terwijl C en D corresponderen met de *ontwijkmanoeuvres*. Het geval B lijkt op het

		weten	
		ja	nee
zoeken	ja	A	B
	nee	C	D

eerste gezicht een weinig voorkomend geval te zijn: het lijkt niet veel zin te hebben om te zoeken naar iets dat niet bekend is. Toch kan het tot de stuurmanoeuvres worden gerekend omdat de gedachte "er kan zo dadelijk iets onbekends opdoemen" in het verwachtingspatroon kan worden ingebouwd. Men noemt de rijstijl waarbij dit in de praktijk wordt gebracht, wel 'defensief rijden'. Bij de ontwijkmanoeuvres in geval C kan van ervaring gebruik worden gemaakt, terwijl die in geval D niet aanwezig is.

2.2.3. Visuele waarneming van obstakels in tunnels

Het oogmerk van de meetmethode die in dit rapport wordt beschreven, is het bepalen van de *kwaliteit van de verlichting in tunnelingangen*. De eerste vraag luidt dan ook, op welke wijze de kwaliteit kan worden omschreven. Een voor de praktijk bruikbare omschrijving is, dat de *kwaliteit van de verlichting* wordt bepaald door de mate waarin de voor de verkeersveiligheid belangrijke voorwerpen (de *risicodragende objecten*) kunnen worden waargenomen. Onder deze objecten wordt verstaan de verzameling van objecten die *ontwijkmanoeuvres* nodig maken. Immers, ongevallen kunnen steeds (in principe tenminste) worden omschreven als het gevolg van (of het vervolg op) mislukte ontwijkmanoeuvres. Deze wijze van beschouwing sluit aan bij het inzicht dat verkeersgedrag kan worden beschreven in termen van *manoeuvres* die middels een *beslissingsproces* worden gekozen uit alternatieven, waarbij de beslissing gebaseerd is op de ter plekke (*in situ*) over het object verkregen (visuele) *informatie*, die bij het beslissingsproces wordt vergeleken met de in het *geheugen* aanwezige informatie. Deze wijze van beschouwing is op andere plaatsen in detail beschreven (Schreuder, 1993) (zie ook par. 2.2.2).

De volgende vraag is welke *visuele informatie* omtrent deze objecten nodig is om de juiste beslissing te kunnen nemen. Met moet daarbij het begrip waarnemen (*waarneembaarheid*) nader beschouwen. Naast de ('kale') zichtbaarheid (de *detecteerbaarheid*) is de *opvallendheid*, en vooral de *herkenbaarheid* van belang. Ook hierover zijn details gegeven in Schreuder (1993).

Een verdere vraag is wat de (belangrijkste) *risico-dragende* objecten in tunnels zijn. Deze objecten kunnen worden afgeleid uit de ermee plaats hebbende ongevallen. Nu bestaan er wel statistieken van ongevallen met de meest uiteenlopende voorwerpen voor de 'open weg', maar niet voor tunnels. We zullen daarom de gegevens voor de open weg gebruiken als uitgangspunt. Deze gegevens zijn gegeven in Tabel 2. Deze tabel geldt voor 1988, het laatste jaar waarin ook gewonden die niet in het ziekenhuis zijn opgenomen, in de statistiek zijn vermeld, zodat het beschikbare materiaal een zo groot mogelijke omvang heeft.

Manoeuvre	Totaal ongeval	Dodelijke afloop
1. Voertuigen zelfde weg zelfde richting	5201	82
2. Voertuigen zelfde weg tegen. richting	3104	147
3. Zelfde weg, afslaan	4066	74
4. Zelfde weg, afslaan	4177	79
5. Kruising	7287	231
6. Kruising	4749	68
7. Met geparkeerd voertuig	1307	25
8. Met voetganger	4054	192
9. Voorwerp (zonder 931 en 951)	4308	254
931. Geleiderailconstructie	549	28
951. Los voorwerp op of langs de weg	240	5
0. Eenzijdige ong (zonder 011, 021, 022)	847	48
011. Slippen op de weg	1749	21
021. Van de weg, recht	120	3
022. Van de weg, bocht	101	1
Totaal	41.859	1258

Tabel 2. *Verkeersongevallen volgens manoeuvres van het ongeval, 1988 (getallen en nummering van rubrieken ontleend aan CBS, 1989).*

	Totaal ongeval	%	Dodelijke afloop	%
Voertuigen zelfde weg	8305	75	229	79,8
Geleiderail, slippen, van de weg	2519	22,8	53	18,5
Los voorwerp	240	2,2	5	1,7
Totaal relevant voor tunnels	11.064	100	287	100

Tabel 3. *Voor tunnels relevante verkeersongevallen volgens manoeuvres van het ongeval, 1988 (getallen en nummering van rubrieken ontleend aan CBS, 1989; zie ook Tabel 2). Relevant voor tunnels de rubrieken 1; 2; 931; 011; 021; 022; 951.*

Uit de gegevens van Tabel 2 zijn de gevallen afgezonderd die relevant (kunnen) zijn voor tunnels (Tabel 3). Daarbij is - in overeenstemming met de in par. 1.2 gegeven overwegingen - uitgegaan van tunnels in rurale autosnelwegen of in andere rurale hoofdwegen; tunnels dus die uitsluitend door het gemotoriseerde verkeer gebruikt (mogen) worden. Daarom wordt aangenomen dat er in tunnels geen langzaam verkeer is, en geen kruisend verkeer, maar wel tegenliggers en rijbaanwisselingen. Ook is aangenomen dat men in een tunnel met de geleiderailconstructie (of met de tunnelwand) kan botsen, of van de weg kan raken. Tenslotte is aangenomen dat er losse voorwerpen op de weg kunnen liggen. Deze drie rubrieken van mogelijke risico-dragende objecten blijken van alle relevante ongevallen 75%, bijna 23% en ruim 2% te vormen (Tabel 3). Met andere woorden: auto's vormen verreweg de gevaarlijkste objecten in tunnels; ook wanden e.d. vormen een aanzienlijke gevarenbron, terwijl losse voorwerpen nauwelijks van belang zijn.

Deze gegevens zijn ontleend aan de nationale gegevens, en omvatten dus het gehele Nederlandse wegennet. In tunnels kunnen de verhoudingen tussen deze botsobjecten wellicht anders liggen. In Nederland zijn tunnels gevaarlijker zijn dan open wegen. Dit blijkt uit Afbeelding 1, ontleend aan Janssen, (1991a). Aangegeven is de relatie tussen het aantal letselongevallen per km weglengte en het verkeersaanbod (voertuigen per etmaal) voor autosnelwegen (resp. met 2x2 en met 2x3 rijstroken). Ook is aangegeven dezelfde relatie voor de acht belangrijkste tunnels in Nederland. De gegevens betreffen de (gesloten) tunnelbuis zelf en de (open) toe- en afritten. Vrijwel alle tunnels liggen 'boven' de (open) snelwegen. Tenslotte is in de afbeelding een 'gemiddelde' aangegeven. Dit is de lijn die het zwaartepunt van de punten die de tunnels representeren, verbindt met de oorsprong van de grafiek. Uit Afbeelding 2 (eveneens ontleend aan Janssen, 1991a) blijkt dat de gesloten tunnelbuizen een nog groter risico vertegenwoordigen. Overigens zijn niet in alle landen dergelijke ervaringen opgedaan; soms is gevonden dat tunnels veiliger zijn dan de open weg (Janssen, 1991; Stembord & Swart, 1991).

De ongevallen in tunnels vertegenwoordigen een zeer kleine fractie is van alle ongevallen die op de openbare weg plaats vinden. Dit heeft natuurlijk te maken met het feit dat er - in weglengte gezien - in Nederland maar zo weinig tunnels zijn. Uit de door de VOR verschafte aantallen betreffende (letsel)slachtoffers voor 1992 blijkt dat tunnels en viaducten ongeveer 0,2% representeren, en bruggen ca. 0,3%. Gezien dit geringe aantal geregistreerde ongevallen in tunnels is een opsplitsing naar type ongeval en/of type botsobject moeilijk te maken. We moeten ons beperken tot het uitspreken van een vermoeden. Dit vermoeden is dat, in verhouding tot de open weg, de wanden een groter gevaar vormen, en de losse voorwerpen een (nog) kleiner. Men kan dus stellen dat botsingen in tunnels met losse voorwerpen zeer gering in aantal zijn, dit in tegenstelling tot botsingen met andere verkeersdeelnemers en met wanden, geleiderailconstructies enz.

Samengevat: De kwaliteit van de verlichting van tunnels kan worden uitgedrukt in de mate waarin in de eerste plaats auto's en in de tweede plaats de tunnelwanden kunnen worden waargenomen. Ook kan het van belang zijn om enige aandacht aan losse voorwerpen te schenken. Deze constatering is niet alleen van belang voor de opzet en uitvoering van de meetmethode, maar ook - meer algemeen - voor het mogelijke belang van tegenstraalverlichting in tunnels.

2.2.4. Wegmarkeringen

In deze paragraaf zullen we enige woorden wijden aan de waarneembaarheid van wegmarkeringen. Details zijn te vinden in SCW (1980) en Schreuder (1978, 1980, 1985). Bij de visuele waarneming is het waarnemen van contrasten van belang. Een object kan alleen worden waargenomen wanneer het contrast tussen het object en zijn directe achtergrond groter is dan de drempelwaarde. Het contrast is te beschouwen als de verhouding tussen de helderheid (de luminantie) van het object en zijn directe achtergrond (zie ook par. 2.1).

De luminantie van een voorwerp is evenredig met de verlichtingssterkte op het voorwerp, en met de reflectiefactor. Het voorwerp kan drie soorten reflectie vertonen:

- diffuse reflectie; het licht wordt ongeacht de wijze van instraling, naar alle richtingen even sterk weerkaatst (verstrooid);
- spiegelende (of reguliere) reflectie; het licht volgt de zgn. spiegelwetten: de hoek van inval is gelijk aan de hoek van terugkaatsing;
- retroreflectie; het licht wordt teruggekaatst in de richting waar het vandaan kwam; daartoe zijn die materialen of die voorwerpen voorzien van zgn. retroreflectoren; stelsels van spiegels of lenzen die de omkeer van de stralengang door reflectie bewerken.

Alleen in geval van diffuse reflectie is er sprake van een enkele reflectiefactor, die dan ook een scalaire grootheid is. In alle andere gevallen hangt de intensiteit van het weerkaatst licht (en dus de 'reflectiefactor') af zowel van de richting van het invallende licht als van de richting van het weerkaatste licht. In beide gevallen zijn twee onafhankelijke variabelen nodig om de richting vast te leggen; in totaal dus vier. De reflectie kan alleen door een tensor worden beschreven. Uiteraard is de intensiteit van het teruggekaatste licht bovendien recht evenredig met de intensiteit van het invallende licht. Wanneer de retroreflector isotroop is (een rotatiesymmetrie vertoont) zijn drie variabelen genoeg en kan de reflectie als een ruimtelijke figuur worden weergegeven.

Ter toelichting: Onder *geleidingsmiddelen* verstaan we de verzameling van middelen die worden aangewend om de bestuurders/weggebruikers visuele informatie te verschaffen aangaande het handhaven van de dwarspositie. Soms worden de hierna te noemen bermbeveiligingsconstructies ook wel geleidingsmiddelen genoemd, maar hier gaat het alleen om *visuele* geleiding. *Wegmarkeringen* zijn de zgn. *horizontale markeringen*, bestaande uit strepen of smalle banden van wit materiaal (verf of plastic), die direct op het wegdek zijn aangebracht. Onder wegmarkeringen wordt tevens verstaan de zgn. markeerknoppen of *wegdekreflectoren*, ook wel kattenogen ('cat's eyes') genoemd, kleine elementen die los van elkaar direct op het wegdek worden aangebracht. Onder *bermreflectoren* worden verstaan de verticale markeringen die in de wegberm worden aangebracht; vroeger werden ze wit geverfd, en als 'bermplanken' betiteld. Bermreflectoren worden ook vaak als reflectorpalen betiteld. *Bermbeveiligingsconstructies* ('geleiderails') worden in tunnels sporadisch toegepast. De reden is dat de ruimte in de breedte die voor een goede werking nodig is, gewoonlijk ontbreekt.

Wegmarkeringen worden soms gebruikt als bron van *akoestisch-kinestatische* informatie, meer in het bijzonder de *geprofileerde* wegmarkeringen of 'rumble strips' (Griep, 1971). Geprofileerde wegmarkeringen hebben vooral voordelen bij de nat-nacht-zichtbaarheid, een onderwerp dat alleen voor onverlichte tunnels van belang is. Zie verder Meseberg, 1990, 1990a en b; Meseberg (ed.), 1990; Paulmann & Neis, 1985; Schreuder, 1978, 1980, 1985.

2.3. De waarneming van obstakels in tunnels

Uit de beschouwingen die in par. 2.2 zijn gegeven, komen drie (groepen van) obstakels naar voren, die voor het wegverkeer gevaar kunnen opleveren. Het zijn deze obstakels die door de verlichtingsinstallatie zichtbaar gemaakt moeten kunnen worden, en wel op een zodanige wijze en zodanig vroegtijdig dat de (ontwijk)manoeuvres, nodig om een botsing te

voorkomen, nog kunnen worden uitgevoerd. Op basis van het voorafgaande zijn hierbij dus twee criteria aan te wijzen:

- het voorwerp moet als een *risico-object* herkend worden;
- het voorwerp moet *tijdig* waargenomen worden.

In par. 2.4 zullen we ingaan op de criteria die aan de verlichting worden gesteld om de herkenbaarheid van de bedoelde (groepen van) objecten te waarborgen, in par. 2.6 zullen we de eisen bespreken waaraan de verlichting moet voldoen om dit ook *tijdig* te kunnen doen. Deze twee criteria vormen de basis voor de methode om de kwaliteit van de tunnelverlichting te kunnen meten. De daartoe noodzakelijke operationalisering wordt besproken in par. 2.7.

In het verleden is, ten einde verlichtingsinstallaties met elkaar te kunnen vergelijken, een 'standaardobject' ingevoerd. De afmetingen ervan bedragen 20 bij 20 cm; het wordt op 100 meter afstand waargenomen, en het heeft een (diffuse) reflectie van 20%. Het oogmerk was niet zozeer om een 'gevaarlijk obstakel' aan te wijzen, maar veeleer om een object te creëren dat kon gelden als een maat voor de waarneembaarheid. Dit 'standaardobject' is in het verleden ingevoerd door Dunbar (1938) en De Boer (1951), en voor tunnels aangepast door Adrian (1978; 1989). Het wijkt echter in alle opzichten sterk af van de risicodragende objecten die in het verkeer te verwachten zijn (zie par. 2.3). Feitelijk levert het traditionele standaardobject alleen een aanduiding op voor de te bereiken gezichtsscherpte; de verdere fysiologische en psychologische aspecten van de waarneming komen niet aan de orde. Dit is reeds door Griep (1968) opgemerkt.

Ondanks deze kritiek, die later is herhaald door Padmos (1982) en Schreuder (1991), vindt het traditionele standaardobject nog steeds opgang in de tunnelverlichting. Zo gebruikt Blaser (1990) het bij de beschouwingen over tegenstraalverlichting in tunnels. De gedetailleerde discussie in par. 2.3 heeft tot doel om aan te tonen dat de keuze van het 'internationale standaardobject' een slechte keuze is voor een beschrijving van de obstakels die in het verkeer van belang zijn. Bij de hier beschreven methode wordt het dan ook *niet* gebruikt. Zie verder Schreuder (1991). Dit neemt niet weg dat het detecteren van kleine objecten van belang kan zijn voor de verkeersveiligheid (zie verder par. 2.7.4).

2.4. Het herkennen van risico-objecten

In par. 2.2 hebben we gesteld dat er voor de verkeersveiligheid in tunnels in hoofdzaak drie (groepen van) obstakels van belang zijn, en wel (in afnemende volgorde van belangrijkheid):

- (andere) auto's;
- tunnelwanden en geleiderailconstructies;
- losse voorwerpen.

Ook hebben we aangegeven dat zowel de *detecteerbaarheid* als de *herkenbaarheid* van voorwerpen aan de orde komen, en dat de detecteerbaarheid van objecten door twee factoren wordt bepaald:

- de *adaptatieluminantie*;
- het *contrast* tussen het object en de achtergrond.

De samenhang tussen de waarneembaarheid van objecten (de detecteerbaarheid) en de adaptatieluminantie kan worden geïllustreerd aan de hand van de klassieke onderzoeken van Blackwell, zoals die zijn neergelegd in de 'referentiefunctie voor de relatieve contrastgevoeligheid (de RCS-functie)'. Deze functie is de basis voor het door de CIE voorgesteld model voor visuele waarneming (CIE, 1981). De RCS-functie is weergegeven in Afbeelding 3. Uit deze afbeelding blijkt dat bij toenemende adaptatieluminantie de relatieve contrastgevoeligheid toeneemt; dat wil zeggen dat men bij een hoger adaptatieniveau voorwerpen kan waarnemen die minder tegen hun achtergrond afsteken; die in de spreektaal dus minder goed zichtbaar zijn. Dit verschijnsel is algemeen bekend: wanneer men iets 'beter wil kunnen zien', gaat men bij het raam staan. We wijzen op de gedaante van deze RCS-functie. Bij lage luminanties - zoals die bij straatverlichting en tunnelingangen voorkomen - is de helling vrij groot: verhoging van de adaptatieluminantie 'helpt' veel om beter te kunnen detecteren. Bij zeer hoge luminanties is de winst geringer; er zijn zelfs duidelijke aanwijzingen dat bij nog hogere niveaus de mogelijkheid tot detecteren weer afneemt.

Dit onderstreept het belang van de adaptatieluminantie voor de waarneembaarheid van objecten. Het is dus noodzakelijk om deze adaptatieluminantie te bepalen. De enige directe wijze om de adaptatieluminantie te bepalen is om opnieuw gebruik te maken van de RCS-functie: men meet de contrastgevoeligheid, en kan daaruit de adaptatieluminantie afleiden. Deze weg wordt in de methode die in dit rapport wordt beschreven, ook gevolgd. Omdat het daarbij gaat om het *verschil* in de adaptatieluminantie voor verschillende verlichtingswijzen, is een relatieve bepaling van de adaptatieluminantie voldoende, en is het niet nodig om de contrastgevoeligheid in absolute maat te bepalen.

Als tweede criterium hebben we ingevoerd: het *contrast* tussen het object en de achtergrond. Het is bekend dat een object gemakkelijker kan worden ontwaard naarmate het contrast tussen het object en zijn (directe) achtergrond groter is. Het 'gemakkelijker ontwaren' kan blijken uit het feit dat de drempelwaarde voor de waarnemingsnelheid groter is (of de *expositietijd* korter kan zijn). Ook kunnen *kleinere* objecten worden gezien wanneer het contrast groter is. Deze twee effecten kunnen worden toegelicht aan de hand van de Afbeeldingen 4 en 5, die aan de oorspronkelijke metingen van Schreuder (1964a) zijn ontleend. Adrian (1964) heeft de metingen van verscheidene auteurs samengevat in een enkele set krommen, waarin de relatie tussen het drempelcontrast, de adaptatietoestand en de grootte van het object (in hoekmaat) is weergegeven (zie Afbeelding 6). Uit deze schaar van kromme blijkt dat voor de luminanties die voor tunnelverlichting relevant zijn (boven ca. 10 cd/m^2) en objecten groter dan ca. 10 boogminuten (corresponderend met 20 cm op 70 m afstand) de afmetingen nauwelijks invloed hebben op de waarneembaarheid. De waarneembaarheid wordt voor objecten groter dan ca. $10'$ bepaald door het contrast en niet door de maat. Zie ook Schreuder (1971).

In par. 2.2 is aangegeven dat, wanneer het gaat om de herkenbaarheid van voorwerpen, nog drie criteria moeten worden toegevoegd. De eerste daarvan is het *interne contrast* tussen delen van het object. Dit interne contrast kan op dezelfde wijze worden beschreven als het hierboven beschreven contrast tussen voorwerp en achtergrond.

In par 2.2 zijn nog twee andere criteria genoemd: de *bekendheid* van (met) het voorwerp en het *verwachtingspatroon*. Voor het wegverkeer in het algemeen zijn dit twee belangrijke (tot zekere hoogte met elkaar verbonden) criteria, die van aanzienlijk belang kunnen zijn voor het optreden resp. het voorkomen van ongevallen. Onbekendheid heeft te maken met de mate waarin het voorwerp in het algemeen voorkomt, terwijl het verwachtingspatroon meer aan de situatie is gebonden. Het vermoeden is wel uitgesproken - ofschoon er nauwelijks onderzoekresultaten bestaan - dat ligfietsen, invalidewagens en motorfietsen meer risico opleveren dan auto's of fietsen omdat ze slechts zelden op de weg voorkomen, terwijl voetgangers en fietsers, die zeer algemeen zijn in het verkeersbeeld, op een autosnelweg - waar men ze niet 'verwacht' - een groot extra risico lopen in vergelijking tot een woongebied. In tunnels, met name in tunnels voor het gemotoriseerde snelverkeer, is de kans dat onverwachte verkeersdeelnemers voorkomen, te verwaarlozen. We zullen er dan ook verder geen aandacht aan besteden.

2.5. De equivalente sluiertluminantie en verblinding

Een begrip dat om een aantal redenen voor de in dit rapport beschreven meetmethode van belang is, is de *equivalente sluiertluminantie*. De equivalente sluiertluminantie geeft aan wat de invloed is van de luminantie van delen van het gezichtsveld, waarop de blik *niet* is gericht, op de adaptatie van het deel waarop de blik *wel* is gericht.

Er zijn twee redenen waarom we dit verschijnsel in dit rapport bespreken. Beiden hangen ermee samen dat de bedoelde invloed kan worden beschreven in termen van een *lichtsluier* die zich over het gezichtsveld uitstrekt. Voor zover het gaat om licht dat in de oogmedia wordt verstrooid, heeft deze lichtsluier een fysische betekenis; voor zover het andere aspecten van de verblinding betreft (o.a. neuronale), is een fysische basis onduidelijk. Men spreekt daarom meestal over de 'equivalente sluiertluminantie' L_{seq} . Wel kan deze sluiertluminantie, equivalent of reëel, in luminantiewaarden worden gekwantificeerd.

De werking van de equivalente sluiertluminantie is tweeledig. Ten eerste wordt door de sluiertluminantie de adaptatieluminantie verhoogd. Dit is het eerste aspect waarom we dit verschijnsel hier bespreken. Ten tweede worden door de sluiertluminantie de contrasten geringer, waardoor de waarneembaarheid moeilijker wordt. Dit is de tweede reden waarom we deze verschijnselen bespreken. De situatie doet zich immers vaak voor dat door de luminanties in de buurt van de tunnel, de ingang moeilijk te zien is; vaak noemt men dit het 'zwarte gat-effect' (Schreuder, 1964a). In sommige gevallen kan de (opkomende of ondergaande) zon vlak boven de tunnelingang te zien zijn. Deze situatie kan tot extreme verblinding leiden (Schreuder, 1981; Schreuder & Oud, 1988).

Het meeste onderzoek aangaande de equivalente sluiertluminantie is uitgevoerd in het kader van studies naar de *verblinding*. Daarom zullen we in het kort dit verschijnsel bespreken.

Verblinding treedt op wanneer door de aanwezigheid van heldere gedeelten in het gezichtsveld de waarneming wordt bemoeilijkt. Meer in het bijzonder spreekt men van verblinding wanneer er sprake is van een

(meestal kleine, heldere) *verblindingslichtbron* die naast het waar te nemen object ligt, en zelf geen rol speelt bij de informatieverschaffing. Op deze wijze omschreven is verblinding steeds een *storend* effect.

De terminologie is verwarrend. Feitelijk zou men in het Nederlands alleen van verblinding moeten spreken wanneer door de inwerking van de verblindingsbron de waarneming geheel onmogelijk wordt gemaakt; dan is men *blind*. In het Engels spreekt men dan van 'blinding'. Wij gebruiken de term verblinding echter ook wanneer de waarneming niet onmogelijk is, maar slechts gehinderd (Engels *glare*). En soms spreekt men van verblinding wanneer er van een negatieve invloed op de waarneming helemaal geen sprake is, maar alleen van een vermindering van het gemak van waarneming (Engels: *dazzle*). In de Nederlandse verlichtingskunde worden deze drie begrippen in navolging van het Duits gewoonlijk als volgt omschreven:

- absolute verblinding
- fysiologische verblinding (*disability glare* in het Engels)
- psychologische verblinding (*discomfort glare* in het Engels).

De erbij gegeven Engelse termen zijn het Nederlandse taalgebied gemeengoed geworden.

Aangezien bij de 'gewone' verlichting van straten en tunnels de absolute verblinding vrijwel nooit aan de orde komt, zijn daar geen regels voor gegeven.

In de straatverlichting is in het verleden, in navolging van de binnenverlichting, de meeste aandacht besteed aan de *discomfort glare* (Adrian & Schreuder, 1970; 1972; De Boer, ed., 1967; Schreuder, 1967, 1972). Soms werden aanbevelingen alleen in termen van *discomfort glare* uitgedrukt (NSVV, 1974/75). Meer recent is echter de gedachte dat *disability glare* meer van belang is voor de verkeersveiligheid, en dat de twee verblindingssoorten toch veel gemeen hebben, zodat de restrictie van de een meestal samen gaat met restrictie van de ander. Omdat bovendien de *disability glare* gemakkelijker te bepalen is, wordt daaraan momenteel de voorkeur gegeven (Schreuder, 1983; NSVV, 1990).

De effecten van *disability glare* kunnen worden beschreven in termen van een lichtsluier die zich over het gezichtsveld uitstrekt. Voor zover het gaat om licht dat in de oogmedia wordt verstrooid, heeft deze lichtsluier een fysische betekenis; voor zover het andere aspecten van de verblinding betreft (o.a. neuronale), is een fysische basis onduidelijk. Men spreekt daarom meestal over de 'equivalente sluiertluminantie' L_{seq} . Wel kan deze sluiertluminantie, equivalent of reëel, in luminantiewaarden worden gekwantificeerd.

Voor een enkele (puntvormige) verblindingslichtbron is de sluiertluminantie (gewoonlijk aangeduid met L_{seq}) gemakkelijk te bepalen. Stiles en Holaday hebben reeds in de twintiger jaren een formule gegeven waarin de waarde van de sluiertluminantie (behoudens een evenredigheidsconstante) alleen afhangt van de verlichtingssterkte E op het oog, teweeg gebracht door de verlichtingsbron, en de hoek Θ tussen de kijkrichting en de richting waarin de verblindingsbron te zien is. De bedoelde relatie is:

$$L_{\text{seq}} = K \frac{E}{\Theta^2}$$

Met L_{seq} in cd/m^2 , E in lux en Θ in graden is K ongeveer 10. Dit is de bekende Stiles-Holaday-relatie die lange tijd als algemeen geldig is beschouwd, tenminste voor Θ tussen 2 en 50 graden. Zie bijvoorbeeld Adrian (1969). Vos (1983) heeft op basis van alle beschikbare gegevens en van eigen werk een betere formule opgesteld die geldig is voor Θ tussen 10 boogminuten en 100 graden. Zie ook Vos & Padmos (1983). De formule is wel wat ingewikkelder, maar hangt nog steeds alleen van Θ af. Verblinding is - tenminste volgens de wetmatigheden die door Vos naar voren zijn gebracht - cirkelsymmetrisch en additief! Over de additiviteit bestaan overigens enige twijfels. Zie bijvoorbeeld Schreuder (1981).

Omdat de disability glare voor het grootse deel (volgens velen volledig) wordt veroorzaakt door lichtverstrooiing in het oog, hangt de mate van verblindingshinder sterk af van de conditie van het oog zelf. Het is bekend dat er grote verschillen bestaan in de helderheid van de oogmedia wanneer men verschillende mensen vergelijkt. Vooral de leeftijd is van groot belang. De hierboven genoemde factor K is dan ook geen constante, maar hangt sterk af van de leeftijd, en vertoont verder een aanzienlijke spreiding tussen personen. Verschillen van een factor 10 tussen personen kan gemakkelijk voorkomen. Het is dan ook de vraag of het zinvol is de verblinding met grote precisie te bepalen. Vos (1983) heeft ook deze leeftijdafhankelijkheid bestudeerd. Zie voorts Gregory (1970); Schouten (1972); Fry (1965) en Schreuder (1981).

2.6. Waarnemingsafstanden

Visuele informatie is de *input* van het (gedrags-)systeem; de handelingen (het verkeersgedrag) is de *output* ervan. Het systeem is een beslissings-systeem. De beslissingen betreffen de keuze (de *selectie*) van de meest adequate manoeuvre gegeven de input. De selectie hangt dus af van de omstandigheden. Om de juiste keuze van de manoeuvre te kunnen maken, heeft de verkeersdeelnemer derhalve een *beeld* nodig van de omgeving. Dit beeld betreft de feitelijke, actuele toestand van de situatie, maar belangrijker nog, het betreft de *toekomstige* toestand.

De toekomstige situatie kan uiteraard alleen *geschat* worden. Deze schatting is voor een groot deel gebaseerd op een *extrapolatie* van de feitelijke situatie op het moment, in combinatie met de gebeurtenissen uit het recente verleden; bij deze extrapolatie wordt gebruik gemaakt van de *ervaring* die de bestuurder heeft opgedaan in vergelijkbare situaties. Een *oordeel* over de situatie vormt dus een onderdeel van het proces. De uit de extrapolatie afgeleide verwachte, toekomstige situatie wordt het *verwachtingspatroon* genoemd. Het verwachtingspatroon is dus een beeld van de nabije toekomst dat is gebaseerd op twee dingen: de gebeurtenissen uit het recente verleden, en de ervaring die uit het geheugen worden afgeleid. Wanneer we hier spreken van het 'nabije verleden' gaat het meestal om seconden en ten hoogste om minuten.

Op basis van het verwachtingspatroon worden ook bepaalde visuele elementen verwacht. Een bekend voorbeeld: ziet men een bal de weg op rollen, dan mag men 'verwachten' dat er een kind achteraan zal hollen.

Weet men dit, of mag men dit op basis van de ervaring verwachten, dan kan men bewust naar dit element (dit kind) gaan *zoeken*. Door het zoeken wordt de waarnemer ineens in een actieve rol geplaatst; in plaats van passief af te wachten welke informatie bij de waarnemer terecht komt ('toevallig' of niet), wordt er nu gezocht. Daarbij kunnen verschillende *zoekstrategieën* aan de orde komen (*heuristieken*).

We zullen hier de term *zichtruimte* gebruiken om de mate aan te geven waarin 'vooruit' kan worden gezien; het kan daarbij gaan om de gewenste (of vereiste) *zichtruimte*, maar ook om de beschikbare *zichtruimte*. Wanneer er geen verwarring kan optreden, gebruiken we soms de meer gangbare, uit het Engels afkomstige term 'preview' (Schreuder, 1991b). Onder de *zichtruimte* wordt hier verstaan de afstand (uitgedrukt in tijd of in lengte) waarop een voorwerp (of een groep van voorwerpen) gezien moet kunnen worden om de betreffende, door het voorwerp noodzakelijk geworden manoeuvre, nog op een redelijke mate uit te voeren. In redelijke mate betekent daarbij: zonder zichzelf of het overige verkeer in gevaar te brengen, en zonder ernstige overlast te ondervinden of te veroorzaken. En dit alles moet niet alleen op de 'juiste' en de 'correcte' wijze gebeuren; ook dient het 'tijdig' te gebeuren, en wel bij voorkeur zo tijdig dan herstelmanoeuvres nog mogelijk zijn. Dit laatste punt leidt tot vragen betreffende de (vereiste) *zichtruimte*.

Om deze vragen te kunnen beantwoorden, is het nodig in wat meer detail te bekijken wat de verkeerstaak inhoudt. De verkeerstaak houdt in laatste instantie in het *veilig, vlot*, en bij voorkeur *comfortabel* bereiken van de bestemming (en dit met minimale kosten) (zie Schreuder, 1974; 1988a). De vlotheid en het comfort kunnen worden samengevat in een apart taakaspect, dat hier verder buiten beschouwing blijft. De veiligheid heeft twee deelaspecten: het vermijden van *verwachte* en het vermijden van *onverwachte* objecten die botsingsgevaar opleveren. (zie Schreuder, 1985a)

We noemden reeds enige belangrijke verschillen tussen 'gewone' manoeuvres en 'nood'-manoeuvres. Er zijn nog twee verschillen aan te geven. Het eerste verschil is gelegen in de toelaatbare (resp. de noodzakelijke) remvertraging. Bij een gewone manoeuvre moet rekening worden gehouden met het overige verkeer, en tot zekere hoogte met comfort-aspecten; een remvertraging van meer dan $2,5$ à 3 m/s^2 (bij snelheden boven ca. 30 km/uur) is niet acceptabel. Bij een noodmanoeuvre mag echter een hogere remvertraging worden toegelaten; als praktisch maximum neemt men gewoonlijk 5 m/s^2 , de minimale eis voor een personenauto om aan het verkeer te mogen deelnemen. Met een goede auto, met goede banden en op een goed wegdek is deze waarde ook bij vochtig weer meestal redelijk goed te bereiken. Met comfortabel rijden is deze waarde echter niet te rijmen. Over de eisen die aan de remvertraging moeten worden gesteld, rekening houdend met rijden in normaal verkeer alsmede met verlangens aangaande rijcomfort, is weinig onderzoek bekend. In Schreuder (1981) is een samenvatting gegeven, waaruit de genoemde waarden zijn ontleend.

Het tweede verschil tussen 'gewone' manoeuvres en 'nood'-manoeuvres is het feit dat een gewone manoeuvre steeds in het verwachtingspatroon past, en een noodmanoeuvre nooit. Dit volgt zonder meer uit de definitie van deze twee soorten manoeuvres. Het gevolg is dat men voor een noodmanoeuvre een langere reactietijd moet nemen dan voor een gewone

manoeuvre. De bekende 'schrikseconde' is waarschijnlijk aan de korte kant. Op basis van onderzoek van Riemersma (1979, 1985) wordt verder uitgegaan van een reactietijd van 3 seconden. Ook over de eisen die aan de minimale reactietijd moeten worden gesteld, rekening houdend met rijden in normaal verkeer alsmede met verlangens aangaande rijcomfort, is weinig onderzoek bekend. In Schreuder (1991b) is een samenvatting gegeven, waaruit de genoemde waarde van 3 seconden is ontleend.

In Tabel 4 zijn de waarden van de vereiste zichtruimte gegeven voor wegen buiten de bebouwde kom, waarbij de feitelijke (nominale) snelheid is gesteld op 25 m/s (ongeveer 90 km/uur). Zie voor details Schreuder (1991b). Deze minimaal noodzakelijke waarden van de zichtruimte zijn uit theoretische overwegingen afgeleid.

Manoeuvre	Preview (m)	Visueel kritisch element
Dwarspositie	75	wegmarkeringen
Snelheid (gekozen)	75	wegmarkeringen
... (voorligger)	...	(voorligger)
Bochten	375	lichtmasten, bermreflectoren
Inhalen zonder tegenliggers	(niet relevant)	
Inhalen met tegenliggers	600-1250	lichtmasten (tegenliggers)
Stoppen voor discontinuïteiten	175	(wegmarkeringen), bermreflectoren, voorwaar- schuwingstekens, verkeers- tekens, waarschuwinglichten, verkeerslichten
Noodmanoeuvres		
.. uitwijken	125	obstakels (ander verkeer)
.. noodstop	140	obstakels (ander verkeer)

Tabel 4. De 'preview' (Schreuder, 1991b, 1993).

Uit deze tabel blijkt dat voor de hierboven genoemde manoeuvres (voor 90 km/uur) de volgende minimale waarden van de zichtruimte genomen moeten worden:

- dwarspositie kiezen/handhaven binnen de rijstrook: 75 meter
- snelheid kiezen: 75 meter
- stoppen voor discontinuïteit: 175 meter
- nemen van een bocht: 375 meter
- noodmanoeuvre: uitwijken: 125 meter
- idem: noodstop: 140 meter

Deze waarden zijn reeds in Tabel 1 weergegeven.

Er zij hier gewezen op het verschil dat er bestaat tussen de waarden zoals die hierboven (en in Tabel 4) zijn gegeven, en de waarden die men in de populaire literatuur kan tegenkomen. De hier gegeven waarden zijn groter, en vaak aanzienlijk groter. Het verschil zit in hoofdzaak in de meer rea-

listische aannamen over de 'reactietijd' en over de remvertraging die hier zijn gehanteerd.

Uit Tabel 4 blijkt voorts dat het vooral de wegmarkeringen zijn die als visueel kritische elementen kunnen optreden. Dit geldt met name voor de manoeuvres 'dwarspositie kiezen' en 'snelheid kiezen'. De vereiste zichtruimte is daarbij (voor 90 km/uur) 75 meter. Bij de manoeuvre 'stoppen voor discontinuïteit' is de minimaal vereiste zichtruimte (ook voor 90 km/uur) ca. 175 meter. Voor afstanden van deze grootte-orde zijn wegmarkeringen, maar ook kleine, diffuus reflecterende, stationaire objecten niet van groot belang; wanneer er gestopt moet worden, dienen er andere objecten aanwezig te zijn die de noodzaak om te stoppen duidelijk maken. Omgekeerd is het natuurlijk ook niet *nodig* om te stoppen voor een wegmarkering of voor een doosje van 20 cm!

We vermeldden hierboven reeds het belangrijke onderzoek van Walraven (1980) en van Padmos (1981, 1988) betreffende de visuele elementen die voor het wegverkeer van belang zijn. In die studies komen andere aspecten van het rijgedrag aan de orde, zodat we ze hier niet verder bespreken.

2.7. Operationalisering

Ten behoeve van de methode om de kwaliteit van de verlichting in tunnels te bepalen, moeten deze gezichtspunten voor de drie belangrijkste (groepen van) risico-objecten worden *geoperationaliseerd*. Dit wordt in deze par. uitgewerkt. Begonnen wordt met de adaptatie, omdat die bij alle objecten van belang is.

2.7.1. De adaptatieluminantie

De adaptatieluminantie wordt bepaald door het drempelcontrast te bepalen. Wanneer bij twee verschillende luminantiepatronen in het gezichtsveld het drempelcontrast even groot is, kunnen die twee situaties met dezelfde adaptatieluminantie worden gekenmerkt. Wanneer het drempelcontrast in die twee situaties niet gelijk is, kan met behulp van de RCS-functie (zie par. 2.4) de adaptatieluminantie worden genormeerd.

In de straatverlichting gebruikt men gewoonlijk een benadering om de adaptatieluminantie te bepalen. Daarbij neemt men aan dat de adaptatieluminantie gelijk is aan de *gemiddelde luminantie van het wegdek*. Voor de omstandigheden zoals die zich bij de normale straatverlichting voordoen, is deze aanname te verdedigen, omdat de blik van de autobestuurder/waarnemer vrijwel steeds op het wegdek is gericht, en omdat de omgeving vrijwel steeds aanzienlijk donkerder is dan het wegdek. Dit geldt met name voor de verlichting van de wegen waarvoor de luminantie als criterium voor de verlichtingskwaliteit wordt gebruikt: de verkeerswegen (NSVV, 1991). Voor tunnels kan deze benadering echter niet worden gebruikt, omdat in tunnels de wanden meestal tenminste even helder zijn als het wegdek, en vaak aanzienlijk helderder (NSVV, 1992; Schreuder, 1990). De uit Hopkinson & Collins (1970) ontleende Afbeelding 7 geeft aan dat de adaptatieluminantie en de luminantie van (delen van) het gezichtsveld ver uiteen kunnen liggen.

Een tweede benadering van de adaptatieluminantie kan gevonden worden in het bepalen van de equivalente sluiertluminantie. Dit verschijnsel is uitgebreid beschreven in par. 2.5. De sluiertluminantie is van belang voor de praktijk van de verlichting van tunnelingangen, en komt daarom ook in de onderhavige methode aan de orde. De uitvoering ervan is in Hoofdstuk 3 beschreven. Voor het bepalen van de adaptatieluminantie is echter de directe methode gekozen, omdat alleen dan via de RCS-kromme de adaptatieluminantie kan worden genormeerd. De sluiertluminantie is daarbij enerzijds als een correctiefactor te beschouwen, anderzijds is deze luminantie van belang voor het 'sturen' van de verlichtingsinstallatie - dat wil zeggen het aanpassen van de ingangsverlichting aan de momentane toestand van het daglicht.

2.7.2. *Auto's als risico-object*

Op grond van overwegingen van de verkeersveiligheid in tunnels wordt gewoonlijk van de verlichting geëist dat ook *stilstaande* grote obstakels zo tijdig moet kunnen zien dat ervoor kan worden gestopt. Het gaat om obstakels van de maat van auto's; dat wil zeggen dat men er niet omheen kan rijden. Dit betekent in termen van hetgeen in par. 2.6 is gesteld dat de waarneembaarheidsafstand (de 'preview') ten minste 140 meter moet bedragen (bij de voor autosnelwegen 'matige' snelheid van 90 km/uur).

Wat betreft de waarneembaarheid heeft deze eis een aantal consequenties:

1. Een stilstaande auto moet kunnen worden waargenomen wanneer de auto *in* de tunnel staat en de waarnemer zich nog *buiten* de tunnel bevindt. Hier heeft men te maken met het 'zwarte gat-effect'.
2. Een obstakel van de maat van een auto beslaat op 140 meter een hoek van ca 35 boogminuten; het gaat 'visueel' dus om een klein object.
3. De auto moet als een 'obstakel' worden herkend: niet alleen als een auto, maar *bovenal* als een *stilstaande* auto.

Wat betreft punt 1, dit betekent dat de adaptatieluminantie moet worden bepaald. Wat betreft punt 2, het gaat om de waarneming van een object dat in hoekmaat betrekkelijk klein is. Daarbij komt het contrast tussen het object en zijn directe achtergrond aan de orde. Omdat het in feite om een groot object gaat dat op aanzienlijke afstand moet worden gezien, beslaat een eventueel door het object op de weg ervoor geworpen schaduw een kleine hoek, en kan worden verwaarloosd. Dit punt is vooral van belang bij de discussie over de voor- en nadelen van tegenstraalverlichting in tunnelingangen. Bij punt 3, komen twee aspecten aan de orde: de contrasten van onderdelen van de auto ten opzichte van elkaar, en de herkenning van 'kwalitatieve' aspecten zoals glimpekken, reflecties van lichtbronnen e.d. In Hoofdstuk 3 wordt uitgewerkt hoe deze aspecten kunnen worden bepaald.

2.7.3. *Wanden en geleiderailconstructies als risico-object*

In Tabel 3 is aangegeven dat van de dodelijke ongevallen die op de open weg gebeuren, en die van een type zijn dat voor tunnels relevant lijkt te zijn, bijna 20% te maken heeft met manoeuvres in lengterichting; van de ongevallen met letsel is het ruim 22%. In par. 2.2.3 hebben we aangegeven dat we deze getallen ook voor tunnels gebruiken, ofschoon bekend is dat tunnels een 'speciaal geval' zijn, en waarschijnlijk in vele opzichten

afwijken van de open weg. Onder 'manoeuvres in lengterichting' verstaan we hier alle ongevallen waarbij een botsing met de wand, de geleiderail- of andere constructies in lengterichting plaats vindt. Daarbij is aangenomen dat auto's die op de open weg van de weg raken en ongevallen in de berm veroorzaken (of ondergaan), in een tunnel wel tegen de wand 'moeten' botsen. Immers, bermen ontbreken vrijwel altijd in tunnels.

We kunnen deze resultaten vergelijken met die welke voor de zgn. 80 km/uur-wegen zijn verzameld. Ook op deze wegen komen veel eenzijdige ongevallen voor (Schreuder & Schoon, 1990). Een ongeval wordt als 'eenzijdig' betiteld wanneer er geen andere aan het verkeer deelnemende voertuigen bij zijn betrokken. Bochten schijnen speciale problemen op te leveren. Bij het overgrote deel van de eenzijdige ongevallen raakt het betreffende voertuig van de weg; de botsing vindt dan vooral plaats met bermmeubilair (bomen enz). Voor tunnels wordt dan, zoals gezegd, aangenomen dat het betreffende voertuig tegen de tunnelconstructie (wand, geleiderailconstructies, enz.) botst.

Voertuigen raken van de weg wanneer de deelmanoeuvres 'dwarspositie kiezen/handhaven binnen de rijstrook' en/of 'snelheid kiezen' onjuist worden uitgevoerd, en wanneer de daarop volgende 'noodmanoeuvre' zonder succes wordt uitgevoerd. De visuele informatie die nodig is om dergelijke 'fouten' te voorkomen, heeft vooral te maken met de *geleiding*. Men kan dus stellen dat ongevallen, waarbij fouten zijn gemaakt wat betreft de manoeuvres in lengterichting, ongevallen zijn waar het aan de geleiding heeft gemankeerd.

Uit een nadere analyse (Schreuder & Schoon, 1990) blijkt dat het vooral *wegmarkeringen* zijn, die de informatie kunnen verschaffen over de geleiding; informatie die een bestuurder nodig heeft om niet van de weg te raken. De door deze markeringsmiddelen verschaft informatie kan in vele gevallen worden aangevuld door de informatie afkomstig van bermreflectoren, lichtpunten, verkeersborden, waarschuwingstekens en -lichten. Van belang is te constateren dat het duidelijk zichtbaar zijn van de lichtpunten in tunnels - vooral van buiten naar binnen gezien - als een voordeel geldt voor tegenstraalverlichting. Zie Narisada et al. (1977) en Schreuder (1991)

Zoals in par. 2.6 is toegelicht, is voor iedere manoeuvre een bepaalde 'preview' nodig; de objecten die de manoeuvre nodig maken, moeten tijdig worden waargenomen. In Tabel 4 zijn de waarden van de preview gegeven voor wegen buiten de bebouwde kom, waarbij de feitelijke (nominale) snelheid is gesteld op 25 m/s (ongeveer 90 km/uur). Deze minimaal noodzakelijke waarden van de preview zijn uit theoretische overwegingen afgeleid. Uit deze tabel blijkt dat voor het kiezen en handhaven van de dwarspositie kiezen/handhaven binnen de rijstrook (voor 90 km/uur) de volgende minimale waarden van de preview ten minste 75 meter moet zijn. Voor het nemen van een bocht is een veel grotere preview nodig: ten minste 375 meter. Deze (samengestelde) manoeuvre is echter voor tunnels van ondergeschikt belang. Wanneer men fouten wat betreft de geleiding wil voorkomen, moeten de geleidingsmiddelen ten minste op 75 meter zichtbaar zijn; wanneer men de kwaliteit van een verlichting voor een tunnel wat dit betreft wil beoordelen, dan moet de waarneembaarheid van geleidingsmiddelen op 75 meter afstand worden beoordeeld.

De waarneembaarheid van voorwerpen die in de lengterichting van de tunnel (of van de weg) min of meer continu zijn, wordt bepaald door het contrast tussen het voorwerp en de achtergrond. Ofschoon er allerlei markerings- en geleidingsmiddelen in tunnels worden toegepast, hebben we de wegmarkeringen gekozen als criterium voor de waarneembaarheid. Het bedoelde contrast betreft dus het contrast tussen de wegmarkering en het wegdek, waarop de markering is aangebracht. In par. 2.2.4 zijn we ingegaan de verlichtingskundige aspecten die met deze constatering samenhangen; meer in het bijzonder op de invloed van de reflectie-eigenschappen van de wegmarkeringen. In Hoofdstuk 3 zal de praktische uitvoering ten behoeve van de bedoelde meetmethode worden besproken.

2.7.4. *Losse voorwerpen op de weg als risico-object*

Uit Tabel 3 volgt dat botsingen met 'losse voorwerpen op of naast de weg' op de open weg nauwelijks voorkomen. Zelfs wanneer men alleen de voor tunnels relevante situaties bekijkt, is het aantal ongevallen dat met dergelijke objecten te maken heeft, minder dan twee procent. Dit geldt voor *alle* wegen; wanneer men de gegevens zou hebben voor tunnels in auto(snel)wegen, mag men verwachten dat de bijdrage van losse voorwerpen relatief geringer is. In par. 2.3 hebben we aangegeven dat zulks alleen maar een vermoeden kan zijn, omdat gegevens ontbreken. Toch is het nodig om voorwerpen op de weg als risicodragende objecten te beschouwen.

De detecteerbaarheid van kleine voorwerpen is besproken in par. 2.3. Uit Afbeelding 6 is afgeleid dat ook voorwerpen die als 'kleine obstakels' kunnen worden beschouwd (stenen, dozen, uitlaatpijpen enz.) buiten het gebied van de 'wet van Ricco' vallen, en dus visueel *niet* als klein zijn aan te merken: de detecteerbaarheid wordt door het contrast bepaald en niet door de afmeting. De relevante psycho-fysische determinant is dus de contrastgevoeligheid, en niet de gezichtsscherpte.

Bij de bespreking van auto's als risico-object (par. 2.7.2) hebben we reeds aangeduid dat de meting van de contrastgevoeligheid van belang is. Daar ging het om het contrast tussen de auto zelf (een groot voorwerp op grote afstand) en de achtergrond, en om het contrast van onderdelen van de auto ten opzichte van elkaar. Bij kleine obstakels op de weg gaat het om het contrast tussen het obstakel en de weg (het wegdek). Daarbij moet met nog een extra factor rekening worden gehouden: de schaduw die het object op de weg kan werpen ten gevolge van de verlichting door lichtbronnen achter ('voorbij') het object. Deze factor zou vooral bij tegenstraalverlichting een rol kunnen spelen. Uit Afbeelding 8 blijkt echter dat de schaduw, gezien vanuit de positie van de automobilist-waarnemer, slechts een (kleine) hoek van minder dan een boogminuut beslaat. De invloed van de schaduw op de waarneembaarheid van kleine obstakels kan dus verwaarloosd worden. Het is dus om deze reden niet nodig om een 'echt' voorwerp op de weg te plaatsten; het is voldoende om de contrastgevoeligheid bij de geldende adaptatietoestand te bepalen.

2.7.5. *Waarnemingscriteria voor obstakels in tunnels*

Samenvattend omvat de methode ter bepaling van de kwaliteit van de ingangsverlichting van verkeerstunnels de volgende aspecten:

- bepaling van de adaptatietoestand;
- bepaling van de sluierluminantie;
- bepaling van het 'interne' contrast bij (visueel middelmatig grote) objecten (auto's);
- bepaling van de herkenbaarheid van (visueel middelmatig grote) objecten (auto's);
- bepaling van het drempelcontrast van in de lengterichting geplaatste objecten in het vlak van de weg (wegmarkeringen);
- bepaling van het drempelcontrast van op het wegdek geplaatste kleine objecten (obstakels).

3. Uitwerking

3.1. Bepaling van de adaptatietoestand

3.1.1. Alternatieven

Er is een aantal alternatieven onderzocht waarmee de adaptatietoestand bepaald kan worden. Deze alternatieven zijn in detail beschreven in het interimrapport van dit project (Geijtenbeek, 1992). In dit rapport zijn de voor- en nadelen van de verschillende methoden uiteengezet, en is een objectieve wijze beschreven waarmee de keuze uit mogelijke varianten is bepaald. We geven hier slechts een samenvatting.

De methoden die gebruikt kunnen worden moeten aan enige voorwaarden voldoen:

- er dient een (lieft dynamisch) contrastvoorwerp gebruikt te worden waarbij de achtergrond het wegdek is;
- de waarnemer moet zelf, vanwege adaptatie-effecten, een actieve verkeersdeelnemer zijn;
- ter controle worden de metingen met behulp van een videocamera vastgelegd;
- de kritische waarneming dient te worden uitgevoerd op een moment dat de waarnemer zich circa 100 meter van het contrastvoorwerp af bevindt.

Uiteraard dient aan de verkeersveiligheid de grootste zorg te worden besteed, omdat is geëist dat de metingen in het (normale) verkeer plaats vinden.

Een voorbeeld van een methode die onacceptabel onveilig is, is het uit een rijdende auto gooien van een echt voorwerp, bij voorbeeld een kartonnen doos. Deze methode zou voor de metingen op zich erg goed bruikbaar zijn, omdat de werkelijke situatie (een voorwerp op de weg) exact wordt nagebootst. De methode zou voor een 'experiment' wellicht in aanmerking kunnen komen, maar ze is voor de bedoelde methode, die in het normale verkeer toegepast moet kunnen worden, onbruikbaar, omdat bij andere weggebruikers schrikreacties worden uitgelokt. Dergelijke 'vivisectie-achtige' methoden worden verder niet besproken.

Een voorbeeld van een absoluut veilige methode, is het gebruik van een stilstaande waarnemer. Hierbij wordt een waarnemer die zelf geen verkeersdeelnemer is bij de tunnelingang geplaatst. Deze waarnemer kan dus veel meer aandacht aan het contrastvoorwerp besteden dan dat het geval is bij een werkelijke situatie, omdat hij of zij niet door het overige verkeer kan worden afgeleid. In Zwitserland is deze methode wel gebruikt, maar in par. 2.3 hebben we aangegeven dat deze methode voor het onderhavige onderzoek niet in aanmerking komt. We zullen deze methode dan ook niet bespreken.

Op basis van een 'brainstorming-sessie' zijn vijf methoden voorgesteld, die mogelijk in aanmerking zouden kunnen komen. Deze zijn: de haspelwagen; de 'dynamische laser'; de 'statische laser'; het hologram en het 'luxaflex'.

1. De 'haspelwagen'

Bij deze methode worden twee achter elkaar aan rijdende auto's gebruikt. De voorste vertegenwoordigt het visuele object, de achterste wordt door de waarnemer bestuurd. Aan de voorste auto wordt een gemodificeerde aanhangwagen, bijvoorbeeld een haspelwagen, gekoppeld, waaraan het contrastvoorwerp bevestigd is. Een kabelwagen (haspelwagen) is voor dit experiment uitermate geschikt, omdat men aan deze aanhanger een contrastvoorwerp kan bevestigen waarbij het wegdek als achtergrond fungeert. Het contrastvoorwerp kan bestaan uit een LCD- of plasma-scherm, waarop afbeeldingen worden getoond die met behulp van een computer worden aangestuurd.

Een voordeel van deze methode is dat er weinig nieuwe ontwikkelingen nodig zijn. Het systeem is een variant op de methode die ontwikkeld is voor de zgn. 'veldfactormetingen' (Schreuder, 1990a; 1991; 1991a en c). Het meetsysteem kan uit allerlei bestaande componenten worden samengesteld. Er dient alleen een robuuste oplossing gevonden te worden voor de bevestiging van het contrastvoorwerp. Een aanzienlijk nadeel van deze methode is de omslachtige organisatie om de twee auto's op 100 meter onderlinge afstand door de tunnel te laten rijden. Het invoegen in het overige verkeer met een vaste afstand tussen de twee meetvoertuigen is afhankelijk van iedere individuele locatie. De ervaring heeft geleerd dat in een drukke tunnel een derde auto gewenst is om het invoegen te begeleiden. Het verkeer wordt beïnvloed, hetgeen ingrijpen van politie en beheer nodig maakt.

2. De 'dynamische laser'

Vanuit een rijdende auto wordt, met behulp van laserstralen, 100 meter voor de auto een contrastvoorwerp op het wegdek geprojecteerd. De waarnemingen worden door de bestuurder uitgevoerd. In het voertuig wordt de benodigde apparatuur geplaatst ter registratie van de meetresultaten. Een voorwaarde is dat de luminantie van het te projecteren contrastvoorwerp moet worden aangepast aan de luminantie in de tunnel. Hiertoe dient de luminantie van het wegdek te worden gemeten, en worden teruggekoppeld naar het vermogen van de laser. Meting 'on line' heeft uiteraard de voorkeur, maar ook meting 'vanaf de wegberm' is mogelijk. Een voordeel van deze methode is, dat (mits de luminantie 'on line' te variëren is) er niet alleen bij de ingang van de tunnel gemeten kan worden, maar dat er in de gehele tunnelbuis of daarbuiten metingen kunnen worden verricht, zonder dat het verkeer in, of het beheer van, de tunnel wordt verstoord.

3. De 'statische laser'

In plaats van de laser op een rijdende auto te bevestigen, kan de laser ook buiten de tunnel op een vaste plaats worden opgesteld. Het licht afkomstig van de laser kan via een glasvezelkabel naar een kleine unit in het plafond van de tunnel worden gevoerd, en (loodrecht) naar beneden op het wegdek worden geprojecteerd.

Het belangrijkste nadeel is dat het contrastvoorwerp stil staat. Een tweede nadeel van deze methode is dat de tunnel moet worden afgesloten voor de installatie. Het verkeer wordt beïnvloed, hetgeen ingrijpen van politie en beheer nodig maakt.

4. Het 'hologram'

In beginsel is het mogelijk om (drie-dimensionele) holografische contrastvoorwerpen op de weg te projecteren.

Een voordeel van deze methode is dat er een heel realistisch contrast-voorwerp ontstaat. Echte voorwerpen die op het wegdek liggen zijn ook driedimensionaal. Een nadeel is dat er weinig ervaring bestaat omtrent het gebruik van holografische waarnemingsobjecten in het algemeen, en zeker in het verkeer. Een ander belangrijk nadeel is dat een drie-dimensionale projectie van een voorwerp boven of op de weg schrikreacties voor het overige verkeer kunnen opwekken. Ofschoon er geen 'fysiek' obstakel op de weg is, is deze methode alleen te gebruiken bij tunnels die op het moment van meten buiten gebruik zijn, bijvoorbeeld nieuw op te leveren tunnels.

5. *Het 'Luxaflex'*

Bij de laatste methode wordt een constructie op de weg gelegd waarop een contrastvoorwerp mechanisch kan worden afgebeeld. Voorwaarde is dat het voorwerp, wanneer het niet in 'gebruik' is, onzichtbaar is, en dat het ook in 'gebruik' zo plat is dat een auto zonder gevaar er overheen kan rijden. Men kan denken aan een constructie, bestaande uit een groot aantal driekantige prismatische cilinders. Zoals bekend, kan een dergelijk effect alleen met driekantige prisma's worden bereikt. Door alle cilinders nu tegelijkertijd in één positie te draaien kan een afbeelding zichtbaar worden gemaakt. Wanneer de cilinders verder worden gedraaid wordt de afbeelding weer onzichtbaar.

Deze methode heeft als voordeel dat geen (geavanceerde) elektronica nodig is. Een nadeel is dat het verkeer gedurig over de cilinders rijdt. Zeker op het moment van draaien zijn de cilinders zeer kwetsbaar. Er moet dus gekozen worden voor een zeer robuuste uitvoering. Een verder nadeel is het feit dat niet meer dan twee (verschillende) contrasten kunnen worden onderzocht.

3.1.2. *Keuze uit de alternatieven*

In het interimrapport (Geijtenbeek, 1992) zijn verdere details gegeven, alsmede een methode waarmee op basis van een objectieve inschatting van de voor- en nadelen een keuze kan worden gemaakt. Door een aantal criteria met hun relatieve gewichtsfactoren te kiezen, en de mate van toepasbaarheid in te schatten kan voor ieder van de alternatieven een getalwaarde worden bepaald die de 'bruikbaarheid' van de methode weergeeft. Voor de vijf besproken alternatieven vindt men op deze wijze de volgende getalwaarden:

- haspelwagen	153
- dynamische laser	194
- statische laser	189
- hologram	142
- 'luxaflex'	101

De 'score' van de dynamische laser is dus de hoogste. Voor deze methode is derhalve gekozen.

3.1.3. *Uitvoering*

In par. 3.1.2 is aangegeven dat de methode 'dynamische laser' is verkozen. Voor deze methode is - ter demonstratie - door de firma RESAL-LASER te Nieuw Lekkerland een proefopzet uitgevoerd. Daarbij is gekozen voor een Spectra-Physics argon/krypton mixed gas ionen-laser met een

uitgangsvermogen van 1 Watt. Met een dergelijk laag vermogen zijn geen gevaren te duchten. Met behulp van de hulpapparatuur (hardware en software) kunnen willekeurige figuren op de weg worden geprojecteerd. Uitrichten gebeurt met dezelfde hulpapparatuur.

Gekozen is voor een figuur in de vorm van een 'hoekige' (vierzijdige) letter C (Landolt ring). Deze kan in vier posities worden geprojecteerd zodat het kanselment bij de waarnemingen kan worden gereduceerd. De achterliggende theorie hieromtrent is beschreven in Blackwell (1946). Het criterium voor 'juiste' waarneming is daarmee de frequentie van juiste antwoorden in relatie tot het contrast; daaruit is de waarde van 50% correcte antwoorden af te leiden. Per definitie komt de bijbehorende contrastwaarde overeen met het *drempelcontrast* bij de bedoelde waarnemingsomstandigheden (zie CIE, 1981). Met behulp van de bekende RCS-kromme (zie par. 2.4 en Afbeelding 3) kan het adaptatieniveau (de adaptatie-luminantie) worden afgeleid. Uit de metingen van Adrian (1969; 1989), Blackwell (1946) en Schreuder (1964a) blijkt dat voor kleine contrasten zoals hier het geval is, het 'teken' van het contrast niet van belang is. Voor voorwerpen lichter of juist donkerder dan de achtergrond zijn alle effecten gelijk.

De aan te bieden contrasten moeten in de buurt liggen van de drempelwaarde. Daartoe moet de luminantie van het teken worden ingesteld op een waarde die in de buurt ligt van de luminantie van de achtergrond. 'In de buurt' betekent daarbij $10\% < C < 50\%$, of in luminantie-waarden $110\% < L_b < 150\%$, met L_b de luminantie van het wegdek ter plaatse. Zoals reeds eerder aangegeven, moet L_b bij iedere meting steeds opnieuw worden bepaald. Deze bepaling is een onderdeel van de methode.

3.2. De bepaling van de sluiertluminantie

In laatste instantie kan een object alleen worden waargenomen wanneer het contrast tussen het object en zijn directe achtergrond groter is dan de bij die waarnemingscondities behorende drempelwaarde van de contrastgevoeligheid (en mits het object groot genoeg is; Blackwell, 1946; CIE, 1981). Dit contrast bestaat uit twee componenten: een luminantiecontrast en een kleurcontrast. De praktijk leert dat de waarneming in voor het wegverkeer belangrijke omstandigheden in hoofdzaak wordt bepaald door het luminantiecontrast.

Het contrast wordt gewoonlijk gedefinieerd als

$$C = \frac{L_2 - L_3}{L_2} \quad [1]$$

Hierin is C het intrinsieke contrast; L_2 en L_3 zijn de luminanties van respectievelijk de achtergrond van het waar te nemen voorwerp en die van het voorwerp zelf. C is dus dimensieloos. Een positieve waarde van C betekent dat het waar te nemen object donkerder is dan de achtergrond (L_3 kleiner dan L_2), en een negatieve waarde van C betekent dat het object lichter is dan de achtergrond.

In de praktijk zal men zeer vaak vinden, dat de waarneming wordt gehinderd door allerlei versturende invloeden uit de omgeving. In Schreuder & Oud (1988) is aangetoond dat deze storing kan worden beschreven door een 'stoorkluminantie' die we met L_d (naar het engelse woord disturbance) zullen aanduiden. Deze stoorkluminantie zich als een 'lichtsluier' kan voordoen die zich over het gezichtsveld kan uitstrekken. Ten gevolge van een dergelijke sluier met kluminantie L_d worden alle kluminanties met L_d verhoogd. Het 'schijnbare' of 'zichtbare' contrast C' wordt dan

$$C' = \frac{(L_2 + L_d) - (L_3 + L_d)}{L_2 + L_d} = \frac{L_2 - L_3}{L_2 + L_d} \quad [2]$$

Uit [1] volgt dat $C * L_2 = (L_2 - L_3)$. Ingevuld in [2] levert dit op:

$$C' = \frac{L_2}{L_2 + L_d} C \quad [3]$$

Omdat L_d groter dan 0 is, is C' steeds kleiner dan C .

De 'stoorkluminantie' bestaat uit vier componenten (Schreuder & Oud, 1988). Zie ook Vos (1983) en Padmos & Alferdinck (1983, 1983a). Te zamen leveren deze vier componenten de stoorkluminantie L_d :

$$L_d = L_{\text{adef}} + L_{\text{seq}} + L_{\text{atm}} + L_{\text{ruit}} \quad [4]$$

Hierin is:

L_{adef} : de component die te maken heeft met de veranderingen van helderheid en het achterblijven van de adaptatie (Schreuder, 1990a, 1991, 1991a);

L_{seq} : de bijdrage tot de sluier die afkomstig is van het in het oog verstrooide licht (Vos, 1983; Vos & Padmos, 1983);

L_{atm} : de bijdrage tot de sluier afkomstig van het licht dat verstrooid is in de atmosfeer (Padmos & Alferdinck 1983);

L_{ruit} : de bijdrage tot de sluier afkomstig van het licht dat verstrooid is in de ruit van de auto (Padmos & Alferdinck, 1983a).

Hierin staat L_{seq} voor de equivalente sluierkluminantie. Het gaat daarbij niet om een fysieke maar om een equivalente kluminantie omdat er mogelijk in het visuele systeem factoren van neuronale aard optreden die geen 'fysieke' lichtsluier zijn. Voor L_{seq} wordt ook wel L_{oog} of soms ook L_e (eye) geschreven.

In de praktijk is het meestal voldoende om L_{seq} te bepalen. L_{adef} speelt alleen een rol bij zeer snelle wijzigingen in de adaptatiekluminantie, die uit overwegingen van waarneembaarheid en van rijcomfort dienen te worden vermeden. L_{atm} kan buiten beschouwing blijven mits voor de metingen een heldere dag wordt uitgezocht. Uit Padmos & Alferdinck, 1983) blijkt dat L_{atm} verwaarloosbaar is wanneer het meteorologische zicht groter is dan ca. 15 km. Dit correspondeert met een 'heldere' dag, zonder extreem te zijn. L_{ruit} tenslotte kan buiten beschouwing blijven wanneer bij de metingen de autoruit zorgvuldig (en frequent!) wordt gereinigd.

Bij alle metingen is het noodzakelijk dat de sluiertluminantie L_{seq} wordt meegemeten. Het subsysteem voor het meten van deze sluiertluminantie is ontwikkeld door studenten van de Technische Universiteit te Delft. Hierover is apart gerapporteerd.

De L_{seq} wordt als volgt bepaald. Eerst wordt een afbeelding van de situatie gemaakt op het moment dat de meting van het contrast wordt gedaan; meestal betekent dit een opname vanaf een punt op de weg ca. 60 meter voor het tunnelportaal. De afbeelding kan naar keuze worden gemaakt met een fotocamera, een 'normale' video-camera, of met een 'still-video' camera. Vervolgens wordt de afbeelding (met een zgn. 'frame-grabber' en een digitizer) gedigitaliseerd. Daarna wordt van iedere 'pixel' de hoek tussen de richting van de pixel en de kijkrichting vastgesteld. Daaruit wordt de gewichtsfactor voor de luminantie van deze pixel wat betreft de L_{seq} -bijdrage aan de hand van de zgn. 'Vos-formule' (Vos, 1983) bepaald.

Daarna wordt van iedere pixel de luminantie vastgesteld. Voor de calibratie wordt een ijkkast, bestaande uit een vijftal vlakken van bekende luminantie, meegefotografeerd. De ijkkast geeft een aantal relatieve waarden die in de buurt liggen van de te meten luminanties. Dit wordt verwezenlijkt door een horizontaal matglas (waarvan de luminantie recht evenredig is met de horizontale verlichtingssterkte op het vlak van het matglas) via een spiegel onder 45 graden in het gezichtsveld op te nemen. De vijf ijkvlakken worden verkregen door neutraalfilters tussen te voegen. De absolute waarde van de luminanties van de grijstrappen kan worden bepaald door een rechtstreekse meting met behulp van een luminantiemeter ('spotmeter') of door middel de horizontale verlichtingssterkte op het vlak van het matglas continu mee te meten en mee te registreren.

Sommering van de volgens de kijkhoek gewogen luminanties levert de sluiertluminantie op. In Afbeelding 9 is een voorbeeld gegeven van de resultaten van een meting in de Noord-tunnel.

3.3. Bepaling van het 'interne' contrast bij objecten

In par. 2.7.2 hebben we aangegeven dat op grond van overwegingen van de verkeersveiligheid geëist wordt dat voor ook stilstaande grote obstakels (auto's) kan worden gestopt. Daartoe moet de 'preview' ten minste 140 meter bedragen (bij de voor autosnelwegen 'matige' snelheid van 90 km/uur). Een obstakel van de maat van een auto beslaat op 140 meter een hoek van ca. 35 boogminuten; het gaat 'visueel' dus om een klein object. De detectie van een dergelijk object wordt echter bepaald door de contrastgevoeligheid; dit in tegenstelling tot objecten die als 'puntvormig' worden waargenomen. De detectie daarvan wordt bepaald door de gezichtsscherpte. Tussen deze twee gebieden bestaat geen scherpe grens, maar de overgang ligt voor het dag-zien bij een objectafmeting van 1 à 3 boogminuten (de 'wet van Ricco') - klein dus ten opzichte van de obstakels die voor het verkeer van belang zijn. Men mag concluderen dat verkeersobstakels overdag als 'contrastobjecten' mogen worden beschouwd.

Bij het waarnemen van contrastobjecten gaat het om twee aspecten: voor kleine objecten overheerst het contrast tussen het voorwerp en zijn (directe) achtergrond: het *randcontrast*. Voor grotere voorwerpen over-

heerst het contrast tussen delen van het object zelf: het *interne contrast*. We zullen op het randcontrast terugkomen in par. 3.6 bij de bespreking van de bepaling van het drempelcontrast van op het wegdek aanwezige kleine obstakels.

Voor de bepaling van het interne contrast kan de methode worden gebruikt, die is ontwikkeld voor het bepalen van de *veldfactor* bij tunnelingen. Deze methode is in detail beschreven in Schreuder (1989; 1990a; 1991a, c en d). We zullen hier de bedoelde experimenten kort samenvatten.

Zoals reeds is aangegeven is het overdag binnenrijden van de ingang het grootste visuele probleem bij een lange verkeerstunnel. Wanneer de tunnelingang onvoldoende is verlicht, doet deze zich voor als een 'zwart gat' waarin geen enkel detail te onderscheiden is. Alleen met een goede ingangsverlichting is het zwarte gat-effect te bestrijden. Voor het opstellen van de eisen ten behoeve van deze ingangsverlichting gaat men ervan uit dat er zich in de tunnelingang voorwerpen kunnen bevinden die gezien moeten kunnen worden. Het 'kunnen zien' wordt, zoals hierboven is aangegeven, bepaald door het feit of het contrast tussen voorwerp en zijn achtergrond, of tussen delen van het voorwerp, al dan niet boven de drempelwaarde voor de contrastgevoeligheid ligt.

Deze drempelwaarde voor de contrastgevoeligheid kan worden bepaald op basis van de bekende gegevens uit de waarnemingsfysiologie. Voor de toepassing van deze gegevens bij het ontwerp van verlichtingsinstallaties voor tunnels is echter nog een verdere factor nodig: het gaat om de zgn 'veldfactor'. De veldfactor f is een vermenigvuldigingsfactor die de relatie aangeeft tussen enerzijds de drempelwaarde zoals die in het laboratorium wordt gevonden, en anderzijds de drempelwaarde die op de weg in het werkelijke verkeer wordt gevonden. Deze factor vertegenwoordigt het feit dat de waarnemer tegelijk verkeersdeelnemer is: naast het waarnemen van eventuele objecten moet het voertuig worden bediend, en moet op het overige verkeer worden gelet.

In Schreuder & Oud (1988) is aangegeven dat men kan aannemen dat de veldfactor uit afzonderlijke onderdelen is samengesteld, en ook hoe deze onderdelen kunnen worden bepaald. Voor details wordt naar deze studie verwezen.

De opzet van de experimenten is in detail beschreven in Biesheuvel & Planken (1989). Zie ook Stam (1989). Uitgangspunt was het feit dat de waarnemer tegelijk verkeersdeelnemer moest zijn; de metingen dienen in het normale verkeer te worden uitgevoerd. Daartoe is een opstelling gebruikt die in beginsel uit twee (personen)auto's bestond die op een vaste afstand achter elkaar door de tunnel reden. Op de voorste auto was een contrastobject bevestigd; de achterste auto werd door de waarnemer bestuurd, waarbij op gezette tijden moest worden aangegeven welke van de objecten nog zichtbaar was.

Het contrastobject bestond uit een bord waarop de cijfers 1 t/m 6 waren afgebeeld. De hoogte van de cijfers was 0,25 meter. De cijfers waren diffuus grijs, de achtergrond was diffuus wit, zodat er tussen cijfer (object) en achtergrond geen kleurverschil bestond: de twee onderscheidden zich

uitsluitend door hun luminanties. De cijfers waren continu zichtbaar. Op geregelde tijdstippen (ca. 1,5 sec na elkaar) gaf de waarnemer aan welk cijfer zij/hij nog net kon zien. Met behulp van randapparatuur werden de tijdstippen, de corresponderende locatie van de auto's in de tunnel of op de weg, de afstand tussen de auto's, de snelheid, het daglicht, de schakelstand van het kunstlicht, het ritnummer enz. gemeten en via radio-verbindingen op een enkele videoband geregistreerd. Op deze wijze was de synchronisatie tussen de verschillende metingen gewaarborgd.

Voor de bepaling van het interne contrast kan deze methode worden gebruikt. Zoals in Schreuder (1989; 1990a; 1991a; 1991b; 1991c) is aangegeven, moet de sluiertiluminantie bij iedere 'rit' worden meegemeten. Bovendien zijn een aantal andere gegevens nodig (meteorologisch zicht, verkeer, weer, schakelstand van de tunnelverlichting, enz.). Uit praktische overwegingen is het daarom aan te bevelen om alle metingen zo kort mogelijk na elkaar, of bij voorkeur gelijktijdig, uit te voeren.

3.4. Bepaling van de herkenbaarheid van objecten

Grote voorwerpen kunnen worden *ontwaard* wanneer het randcontrast of het interne contrast groter is dan de drempelwaarde voor de contrast-gevoeligheid (rekening houdend met eventuele veldfactoren). Voor het *herkennen* van het voorwerp (het kunnen toedelen van het voorwerp aan de juiste klasse van voorwerpen, bijvoorbeeld tot de klasse van stilstaande auto's, of tot de klasse van langzaam rijdende auto's, of tot de klasse van snel rijdende auto's) is meer nodig. Van belang zijn factoren als:

- het verwachtingspatroon;
- bekendheid met het voorwerp;
- bekendheid met de klasse van voorwerpen;
- vorm, gedaante en structuur van het voorwerp, enz.

In Schreuder (1993) zijn een aantal fundamentele aspecten die met herkennen samenhangen, besproken. Voor de praktijk komt het erop neer dat er geen objectieve methode bestaat om herkenbaarheid van voorwerpen in het verkeer te bepalen. De belangrijkste hinderpaal is dat waarnemers, wil het experiment zin hebben, op de hoogte moeten zijn van het feit dat ze in een experiment medewerken, hetgeen het verwachtingspatroon, en daarmee de herkenning van voorwerpen, essentieel beïnvloedt. Laboratorium-onderzoek is wel mogelijk en zelfs zeer succesvol. Zie bijvoorbeeld Theewes (1989, 1990, 1992). Voor de praktijk dienen we ons echter te beperken tot *subjectieve beoordelingen*, een in de verlichtingskunde zeer gebruikelijke werkwijze. In dit geval zijn deze subjectieve beoordelingen zonder veel moeite te realiseren. Een aantal waarnemers passeert onder normale verkeersomstandigheden als bestuurder van een auto de tunnel met de bedoelde verlichtingsinstallatie(s); na iedere rit wordt een vragenlijst ingevuld, waarin (onder meer) vragen zijn opgenomen die te maken hebben met het *gemak* van waarnemen, en het *gemak* waarmee andere auto's herkend zijn. Dergelijke methoden zijn vaak gebruikt bij het beoordelen van roosters van tunnels (Schreuder & Oud, 1988; Tan et al., 1983; Van den Brink, 1984), maar ook voor openbare verlichting (De Boer (ed.), 1967; De Boer & Van Heemskerck Veeckens, 1955; De Boer & Schreuder, 1966, 1967; De Grijs, 1972).

De metingen zelf vereisen weinig voorbereiding. Het is voldoende om een vragenlijst op te stellen, en een aantal waarnemers (bij voorkeur mensen die in zekere mate op de hoogte zijn van verkeer en verlichting, en die enige ervaring hebben in dit soort metingen) in een aantal situaties hun beoordelingen te laten maken. Omdat het in eerste instantie om een kwalitatieve inschatting gaat, is het niet nodig om een grote 'steekproef' te gebruiken. De ervaring met de roosterproeven in de Beneluxtunnel (Tan et al., 1983) heeft geleerd dat tien à twintig waarnemers genoeg is, wanneer iedere waarnemer een aantal beoordelingen uitvoert.

3.5. Bepaling van het drempelcontrast van objecten in het vlak van de weg

In par. 2.7.3 hebben we aangegeven dat van de ongevallen met letsel op de open weg (en die voor tunnels relevant lijken te zijn), ruim 22% te maken heeft met manoeuvres in lengterichting, namelijk botsingen met de wand, de geleiderailconstructies of andere constructies in lengterichting. Ofschoon de situatie in vele opzichten anders is, hebben we een vergelijking getrokken met de zgn. '80 km/uur-wegen'. Daar blijken dergelijke ongevallen vooral te maken hebben met gebreken in de geleiding. Onder aanname dat dit ook in tunnels geldt, is gesteld dat het vooral om de waarneming van wegmarkeringen gaat. Daarbij is aangenomen dat ze ten minste op 75 meter zichtbaar zijn.

De waarneembaarheid van wegmarkeringen wordt bepaald door het contrast tussen de markering en de achtergrond (het wegdek) waarop de markering is aangebracht. De kwaliteit van de tunnelverlichting wordt, wat betreft de waarneembaarheid van wegmarkeringen, bepaald door de vraag of markeringen met een bekend contrast ten opzichte van het wegdek, onder de vigerende verlichting (nog juist) zichtbaar zijn. Opnieuw gaat het dus om het bepalen van de drempelwaarde voor de contrastgevoeligheid; het verschil met de in par. 3.1 besproken bepaling van de adaptatietoestand ligt erin dat nu niet het *drempelcontrast*, maar de *luminantie* als variabele optreedt. Het contrast tussen markering en wegdek is voor de gangbare markeringsmaterialen bekend (zie bijvoorbeeld SCW, 1982; Schreuder, 1978; 1985; Schreuder & Schoon, 1990). De methode die in par. 3.1.1 is beschreven (de 'dynamische laser') geeft verder alle mogelijkheden om de bedoelde metingen uit te voeren.

De feitelijke bepaling van de drempelwaarde gebeurt door in een aantal ritten door de tunnel steeds een bepaald contrast te vertonen. Dit moet gedurende een korte tijd, bij voorbeeld gedurende 100 à 200 ms gebeuren, ten eerste om het dynamische karakter te waarborgen, en ten tweede om het betreffende punt in de tunnel te kunnen definiëren, ook voor een bewegende waarnemer. Bij iedere presentatie geeft de waarnemer/autobestuurder aan of hij of zij het object heeft gezien, en, zo ja, wat de oriëntatie van het testbeeld was. Gebruik makend van de zgn 'up-and-down'-methode wordt vervolgens vastgesteld welk contrast *nog juist waarneembaar* is. Dit nog juist waarneembare contrast is (per definitie) het gezochte *drempelcontrast*. De up-and-down-methode wil zeggen dat, wanneer het object gezien is, het contrast voor de volgende rit wordt verlaagd; wanneer het object niet is gezien (of verkeer is benoemd) wordt het contrast verhoogd. Op deze wijze kan de drempel met een minimaal aantal ritten worden bepaald.

De praktische uitvoering is vrijwel gelijk aan die welke eerder is beschreven. De firma RESAL-LASER heeft daartoe in nauw overleg met de Bouwdienst van de Rijkswaterstaat, met de SWOV en met C. Stam Advies een opstelling gerealiseerd. Deze opstelling is op 31 augustus 1993 aan alle betrokkenen (tot tevredenheid) gedemonstreerd. Zie verder Hoofdstuk 5.

Op het dak van een bestelauto is een argon/krypton-laser met een vermogen van 1 Watt (zoals gezegd ruimschoots binnen alle risico-grenzen) bevestigd. Deze laser vereist een aanzienlijk vermogen. Daarom is een waterkoeling nodig. Voor het verschaffen van het vermogen wordt een aggregaat op een aanhangwagen achter de bestelauto bevestigd. De laser wordt software-matig gestuurd, zowel wat betreft het vermogen, de vorm van het uitgestraalde figuurtje (het testobject, bestaande uit een 'vierkante Landolt C') als wat betreft de richting van de bundel. De bundel is groenwit van kleur en is op de weg gericht op een punt 100 meter voor de auto. De helderheid van de lichtvlek op de weg wordt bepaald door het laser- vermogen te regelen. Voor de regeling wordt de luminantie van dezelfde plek op de weg gemeten. Dit gebeurt door middel van een - aan de luminantiemeter gekoppelde - videocamera, waarbij het betreffende deel van het wegdek 'on line' wordt afgetast middels een 'frame grabber'. Dit levert de luminantie van het betreffende weggedeelte op. De feitelijke luminantie-waarde van de testfiguur wordt zodanig gekozen dat een van te voren vastgestelde waarde van het contrast wordt bereikt. Na activeren van de apparatuur is de laser binnen ca. 100 msec op vol vermogen met de gewenste configuratie van het testbeeld. De sluierluminantie wordt (off-line) bepaald door een foto- of video-opname (afhankelijk van de momenteel beschikbare apparatuur) te maken van het gezichtsveld. In par. 3.2 is beschreven hoe de sluierluminantie wordt bepaald.

De meetprocedure is als volgt. Na het instellen van de apparatuur, en het vastleggen van omstandigheden van waarnemer, plaats, datum, tijd, weer, meteorologisch zicht, verkeer, tunnelverlichting e.d. wordt een rit gemaakt. Van te voren wordt - voor iedere rit opnieuw - het contrast en de configuratie van het testbeeld vastgesteld, en in de computer ingetoetst. Op een vast punt op 50 meter voor de tunnel wordt de apparatuur geactiveerd. De luminantie van het weggedeelte op 100 meter voor de auto - dus gelegen op 50 meter binnen de tunnel - wordt bepaald. De laser wordt ingesteld en zendt het testbeeld uit (voor ca. 100 à 200 ms, naar gelang de instelling). De waarnemer geeft aan of het beeld gezien is, en, zo ja, wat de stand van de 'C' is. Volgens de beschreven procedure van de up-and-down-methode worden een aantal ritten gemaakt, totdat de drempelwaarde is bepaald. Voor iedere rit worden de opnamen gemaakt ten behoeve van de bepaling van de sluierluminantie. Alle gegevens betreffende de instelling van de laser, de timing, de luminantie enz., worden op de harde schijf van de computer geregistreerd. De metingen, daarbij inbegrepen de reacties van de waarnemer, worden op de video-band vastgelegd. De synchronisatie van band en harde schijf wordt door de computer software-matig gewaarborgd. Een schema van de meetopstelling is gegeven in Afbeelding 10.

4. Uitvoering van de metingen

De methode die in dit rapport is beschreven zal in de eerste plaats worden toegepast voor het bepalen van het effect van tegenstraalverlichting. Daar toe is, zoals hierboven is aangegeven, in de tunnel te Velsen een proefinstallatie aangebracht. De metingen zullen in de (na-)zomer van 1993 en in de winter van 1993-1994 plaatsvinden. Ter vergelijking zullen ook metingen in de Drechttunnel te Dordrecht worden uitgevoerd.

De metingen betreffen in de eerste plaats de hierboven genoemde bepaling van het drempelcontrast. Het ligt in de bedoeling om ook de andere aspecten te meten; een 'complete' serie metingen omvat de volgende aspecten:

- het bepalen van de adaptatietoestand;
- het bepalen van de sluierluminantie;
- het bepalen van de zichtbaarheid van auto's;
- het bepalen van de zichtbaarheid van wegmarkeringen
- het bepalen van het drempelcontrast van kleine objecten
- het bepalen van de zichtbaarheid van kleine objecten.

5. Ten besluit: De demonstratie van 31 augustus 1993

Op 31 augustus 1993 is in de Drecht-tunnel te Dordrecht een demonstratie gegeven van de meetmethode. Deze demonstratie is uitgevoerd door RESAL-LASER te Nieuw-Lekkerland, en bijgewoond door vertegenwoordigers van de Bouwdienst van de Rijkswaterstaat, de SWOV en C. Stam Advies. Een aantal ritten is gemaakt, waarbij de verschillende (sub)systemen zijn getest onder realistische omstandigheden. Behalve enige mankementen in de software ten behoeve van de meting en de calibrering van de luminantie bleken alle subsystemen te naar bevrediging te functioneren.

De demonstratie is unaniem als bevredigend beschouwd. Het project is daarmee voltooid. In het Voorwoord is de omschrijving van dit project gegeven. Deze luidde: 'De tweede fase voor het ontwikkelen van een meetmethode waarmee de kwaliteit van tegenstraalverlichting kan worden bepaald. De methode moet in de toekomst ook geschikt gemaakt kunnen worden voor de klassieke verlichtingssystemen. De thans te ontwikkelen methode moet hierop aansluiten. De methode zal worden gedemonstreerd door middel van een werkend meetsysteem'.

Het onderhavige eindrapport geeft een beschrijving van deze opdracht.

Literatuur

- Adrian, W. (1964). Zur Blendungsbewertung bei der Beleuchtung von Strassen. *Lichttechnik* 16 (1964) 541-546.
- Adrian, W. (1969). Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Bewertung. *Lichttechnik* 21(1969)2A-7A.
- Adrian, W. (1978). Bericht über die Messung des Schöneegg-Tunnels von 17.2.78. 1978. (Niet gepubliceerd; Bijlage bij Riemenschneider, 1978).
- Adrian, W. (1989). Visibility of targets: Model for calculation. *Lighting Res. Technol.* 21(1989)181-188.
- Adrian, W. & Schreuder, D.A. (1970). A simple method for the appraisal of glare in street lighting. *L. Res. Technol.* 2(1970) 61-73.
- Adrian, W. & Schreuder, D.A. (1972). A modification of the method for the appraisal of glare in street lighting. In: CIE (1972).
- Anon. (1974). Das Prinzip der Gegenstrahlbeleuchtung für Strassentunnels. *Alumagazin*, Zürich, April 1974.
- Anon. (1974). Wegontwerp en wegverlichting tegen de achtergrond van de verkeersveiligheid. Pre-adviezen congresdag 6 december 1974. Het Nederlandse Wegcongres, Den Haag.
- Biesheuvel, M.A. & Planken, J.J.A. (1989). Bepaling f-factor tunnelingang, Afstudeeropdracht Hoger Technisch Onderwijs HTO, Rotterdam.
- Bonomo, M. (1980). L'illuminazione dei tratti iniziali delle gallerie autostradali (De verlichting van de ingangen van tunnels in autosnelwegen). *Luce* (1980) 1: 1-15.
- Blackwell, H.R. (1946). Contrast thresholds of the human eye. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 36 (1946) 624-643.
- Blaser, P. (1990). Counterbeam lighting; A proven alternative for the lighting of the entrance zones of road tunnels. *Transp. Res. Record* 1287, pp. 244-251.
- CBS (1989). Statistiek van de ongevallen op de openbare weg 1988. CBS-Publicaties. SDU-Uitgeverij, Den Haag.
- CBS (1992). Statistiek van de ongevallen op de openbare weg 1991. CBS-Publicaties. SDU-Uitgeverij, Den Haag.
- CIE (1981). An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. Publ. No. 19/2 (two volumes). CIE, Paris.
- CIE (1984). Tunnel entrance lighting. Publ. No. 61. CIE, Paris.
- CIE (1990). Guide for the lighting of road tunnels and underpasses (Draft March 1990). Publ. No. 26/2. CIE, Vienna.
- Crothers, R.P. (1990). Pro-beam; A viable alternative to lighting tunnel entrances. Paper prepared for Visibility Symposium, TRB, Washington D.C., July 25, 1990.
- Boer, J.B. de (1951). Fundamental experiments of visibility and admissible glare in road lighting. CIE, Stockholm.
- Boer, J.B. de & Schreuder, D.A. (1966). Limitation de la gêne par les sources lumineuses en éclairage public. *Lux* (1966) No 40; 491-500.
- Boer, J.B. de & Schreuder, D.A. (1967). Glare as a criterion for the quality in street lighting. *Trans. Illum. Engn. Soc. (London)*. 32 (1967) 117 - 128.
- Boer, J.B. de & Van Heemskerck Veeckens, J.F.T. (1955). Observations on discomfort glare in street lighting. CIE, Zürich.
- Boer, J.B. de (ed.) (1967). Public lighting. Centrex, Eindhoven.

- Dunbar, C. (1938). Necessary values of brightness contrast in artificially lighted streets. *Trans. Illum. Engng. Soc. (London)* 3(1938)21.
- Fry, G.A. (1965). Distribution of focussed and stray light on the retina produced by a point source. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 55 (1965) 333-335.
- Geijtenbeek, M. (1992). Contrastmetingen verkeerstunnels. Eindrapport Hogeschool Rotterdam.
- Gregory, R.L. (1970). *The intelligent eye*. Weidenfeld & Nicholson, London.
- Griep, D.J. (1968). Traffic accidents, visual performance and driving behaviour. In: Henkes (ed.) (1968).
- Griep, D.J. (1971). Analyse van de rijtaak. *Verkeerstechniek* 22(1971)-303-306; 370-378; 423-427; 539-542.
- Grijs, J.C. de (1972). Visuele beoordeling van verlichtingscriteria in Den Haag en Amsterdam. *Electrotechniek* 50 (1972) no 14.
- Henkes, H.E. (ed.) 1968. *Perspectives in ophthalmology; Report of the 1967 Postgraduate Courses held under the auspices of the Netherlands Ophthalmological Society and the Medical Faculty of Rotterdam, June 1967*. Excerpta Medica Foundation, Amsterdam.
- Hopkinson, R.G. & Collins, J.B. (1970). *The ergonomics of lighting*. Macdonald & Co., London.
- IES (1988). Annual Conference of The Illuminating Engineering Society of North America. Minneapolis, MN, August 7-11, 1988.
- Janoff, M.S. (1988). Subjective rating of visibility and alternative measures of roadway lighting. In: IES (1988).
- Janssen, S.T.M.C. (1991). Accident risk on bridges and tunnels compared with the total road network. Paper presented at: IIE Symposium international et exposition: Les ouvrages d'art et la sécurité routière (Abstract). 19-22 Juin 1991. Luxembourg.
- Janssen, S.T.M.C. (1991a). Vergelijking van de verkeersonveiligheid in tunnels en op bruggen van autosnelwegen. SWOV, Leidschendam (Niet gepubliceerd).
- Ketvirtis, A. (1989). Directional light application in vehicular tunnel illumination design. Paper to be presented at IES National Conference 1989 (Zonder nadere aanduiding aangehaald door Crothers, 1990).
- Licht84 (1984). Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschland, Niederlande, Oesterreich, Schweiz. Mannheim 5-7 Juni, 1984.
- Meseberg, H.-H. (1990). Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen. In: Meseberg (ed.) (1990).
- Meseberg, H.-H. (1990a). Lichttechnische Eigenschaften van Markierungen. In: Meseberg (ed.) (1990).
- Meseberg, H.-H. (1990b). Erläuterungen zu den 'Hinweisen für die Anwendung von Fahrbahnmarkierungen mit erhöhten Nachtsichtbarkeit bei Nässe'. In: Meseberg (ed.) (1990).
- Meseberg, H.-H. (ed.) (1990). *Fahrbahnmarkierungen '90*. Heft 9. DSGM. Kirschbaum Verlag, Bonn, 1990.
- Narisada, K.; Inoue, T. & Bjorset, H.-H. (1977). Tunnel lighting; Luminous intensity of luminaires to guide approaching drivers. Draft, March 1977. (Ref. CIE, 1984).
- Narisada, K. & Yoshikawa, K. (1974). Tunnel entrance lighting; Effect of fixation point and other factors on the determination of requirements. *Lighting Res. Technol.* 6 (1974) 9-11.
- Novellas, F. (1982). Eclairage des tunnels routiers; Intérêt des systèmes à mobilisation de contraste. *Rev. Routes Aérodr.*, 1982 (Jaartal geschat).

- NSVV (1991). Aanbevelingen voor openbare verlichting, Deel I. NSVV, Arnhem.
- NSVV (1992). Aanbevelingen voor de verlichting van lange verkeers-tunnels. NSVV, Arnhem.
- Padmos, P. (1981). Veiligheids- en comfortaspecten van het autorijden bij duisternis buiten de bebouwde kom, in relatie tot wegverlichting. IZF 1981 C-21. IZF-TNO, Soesterberg.
- Padmos, P. (1982). Discussiebijdrage. In: SLG (1982).
- Padmos, P. (1984). Visually critical elements in night time driving in relation to public lighting. In: TRB (1984).
- Padmos, P. (1988). Visuele problemen op autosnelwegen bij duisternis. IZF 1988 C-17. IZF-TNO, Soesterberg.
- Padmos, P. (1991). Hartslag als maatstaf voor belasting tijdens het autorijden bij duisternis. IZF 1991 C-2. IZF-TNO, Soesterberg.
- Padmos, P. & Alferdinck, J.W.A.M. (1983). Verblinding bij tunnelingangen II: De invloed van atmosferisch strooilicht. IZF 1983 C-9. IZF-TNO, Soesterberg, 1983.
- Padmos, P. & Alferdinck, J.W.A.M. (1983a). Verblinding bij tunnelingangen III: De invloed van strooilicht van de autovoorraad. IZF 1983 C-10, IZF-TNO, Soesterberg.
- Padmos, P. & Walraven, J. (1982). Wegverlichting buiten de bebouwde kom; Welke visuele informatie heeft een automobilist nodig? Elektrotechniek 60(1982) 449-451.
- Paulmann, G. & Neis, H. (1985). Untersuchungen über die Erhöhung der Nachtsichtbarkeit bei Nässe durch Verstärkung der Retroreflexion infolge profilierte Markierungen. Forschungsbericht 3.143 G 81 C. Technische Hochschule Darmstadt.
- Riemersma, J.B.J. (1979). The perception of deviation from a straight course. IZF 1979 C-6. IZF-TNO, Soesterberg.
- Riemersma, J.B.J. (1985). Koershouden op de rechte weg. Verkeerskunde 36 (1985)367-372.
- Schouten, T.M. (1972). Verblinding, enige fysiologische, leeftijdsafhankelijke oorzaken. R-72-9. SWOV, Voorburg.
- Schreuder, D.A. (1964). De luminantietechniek in de straatverlichting. De Ingenieur 76 (1964)E89-E99.
- Schreuder, D.A. (1964a). The lighting of vehicular traffic tunnels. Centrex, Eindhoven.
- Schreuder, D.A. (1967). Theoretical basis of road lighting design. Chapter III in : De Boer (ed.) (1967).
- Schreuder, D.A. (1971). Autoverlichting binnen de bebouwde kom. Verkeerstechneek (1971) 583-588.
- Schreuder, D.A. (1972). Discomfort glare in street lighting. Lighting Res. Technol. 4 (1972)47-48.
- Schreuder, D.A. (1974). De rol van functionele eisen bij de wegverlichting. In: Anon (1974a).
- Schreuder, D.A. (1978). Zichtbaarheid van wegmarkeringen op natte wegen; Een literatuurstudie. SVT/SCW, Arnhem.
- Schreuder, D.A. (1979). Tunnel lighting engineering; The third generation. Contributed to CIE TC 4.6, SC 3. SWOV, Voorburg (zie ook Schreuder, 1980a).
- Schreuder, D.A. (1980). Geprofileerde wegmarkeringen. R-80-51. SWOV, Voorburg.

- Schreuder, D.A. (1980a). Tunneleinfahrtbeleuchtung: Die dritte Generation. R-80-27. SWOV, Voorburg. Ook in: LITG, 1980 (zie ook Schreuder, 1979).
- Schreuder, D.A. (1981). De verlichting van tunnelingangen; Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels. R-81-26 I en II. SWOV, Voorburg.
- Schreuder, D.A. (1983). Glare in road lighting. CIE Journal 2(1983)53-57.
- Schreuder, D.A. (1985). De zichtbaarheid van wegmarkeringen op natte wegen; Een aanvullende literatuurstudie. R-85-23. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1985a). Fundamentele overwegingen omtrent visuele en verlichtingskundige aspecten van de verkeersveiligheid. R-85-61. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1989). The field factor for the determination of tunnel entrance luminance levels. Paper SLG/CIE Symposium on New developments in tunnel lighting, Lugano, Switzerland, 12 October 1989.
- Schreuder, D.A. (1990). Aanbevelingen voor de verlichting van lange tunnels voor het gemotoriseerde verkeer. R-90-3. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1990a). De veldfactor bij de bepaling van de verlichtingsniveaus bij tunnelingangen. R-90-10. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1991). Tegenstraalverlichting in tunnels; Een overzicht van de beschikbare literatuur. R-91-96. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1991a). Practical determination of tunnel entrance lighting needs. Paper presented at the TRB Annual Meeting, January 15, 1991, Washington D.C.
- Schreuder, D.A. (1991b). Visibility aspects of the driving task: Foresight in driving. A theoretical note. R-91-71. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1991c). De veldfactor bij de bepaling van de verlichtingsniveaus bij tunnelingangen; Verslag van een nadere analyse van het experimentele onderzoek. R-91-65. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1991d). Lighting requirements in the entrance of tunnels in traffic conditions. Paper prepared for presentation at the CIE Session in Melbourne, Australia, July 1991.
- Schreuder, D.A. (1992). Openbare verlichting als verkeersveiligheidsmaatregel; Stand van zaken en toekomst. R-92-64. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. (1992a). De invloed van windturbineparken op de verkeersveiligheid. R-92-74. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. & Oud, H.J.C. (1988). The predetermination of the luminance in tunnel entrances at day. R-88-13. SWOV, Leidschendam.
- Schreuder, D.A. & Schoon, C.C. (1990). De relatie tussen het koershouden van voertuigen en wegmarkering op 80 km/uur-wegen; Een literatuurstudie. R-90-54. SWOV, Leidschendam.
- SCW (1982). Zichtbaarheid 's nachts van wegmarkeringen op droge en natte wegdekken. SCW-Mededeeling 52 / SVT-Mededeeling 17. SCW, Arnhem.
- SLG (1982). Bericht Lichttechnische Gemeinschaftstagung 'Licht82. Dok.No.500/82. SLG, Zürich.
- Stam, A. (1989) Resultaten meting tunnelverlichting Drechtunnel. Stam en Van Vuren, Organisatieadviseurs, Sliedrecht (Niet gepubliceerd).
- Stembord, H.L. & Swart, L. (1991). Tunnels veiliger dan 'gewone' wegen? Wegen 65 (1991) 3; 11-14.
- Stolzenberg, K. (1984). Konzepte und Empfehlungen für Tunnelbeleuchtung. In: Licht84 (1984) 16.

- Tan, T.H.; Van den Brink, T.J.D. & Swart, L. (1983). Tunnelingangsverlichting. *Electrotechniek* 61 (1983) 669-675.
- Theewes, J. (1989). Visual selection: Endogenous and exogenous control; A review of the literature. IZF 1989 C-3. IZF-TNO, Soesterberg.
- Theewes, J. (1990). Exogenous and endogenous control of visual attention. IZF 1990 C-3. IZF-TNO, Soesterberg.
- Theewes, J. (1992). Selective attention in the visual field. Proefschrift VU, Amsterdam. Bariet, Ruinen.
- TRB (1984). Providing visibility and visual guidance to the road user. Symposium, July 30- August 1, 1984. TRB, Washington, D.C.
- Van den Brink, T.J.D. (1984). Experimenten met daglichtroosters. Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde (Niet gepubliceerd).
- Vos, J.J. (1983) Verblinding bij tunnelingangen I: De invloed van strooilicht in het oog. IZF 1983 C-8. IZF-TNO, Soesterberg.
- Vos, J.J. & Padmos, P. (1983). Straylight, contrast sensitivity and the critical object in relation to tunnel entrance lighting. CIE, Amsterdam.
- Walraven, J. (1980). Visueel critische elementen by nachtrijden; Een verkennend onderzoek. IZF 1980 C-22. IZF-TNO, Soesterberg.
- Walthert, R. (1976). Verschiedene Systeme der Tunnelbeleuchtung. In: LITG (1976).
- Walthert, R. (1978). Sehverhältnisse im Bereich von Tunneln. *Strasse und Verkehr* 64(1978)235-239.

Afbeeldingen 1 t/m 10

Afbeelding 1. Verkeersveiligheid in tunnels in autosnelwegen in Nederland (1986-1989) (Ontleend aan Janssen, 1991a).

Afbeelding 2. Verkeersveiligheid in de tunnelbuizen van tunnels in autosnelwegen in Nederland (1986-1989) (Ontleend aan Janssen, 1991a).

Afbeelding 3. De referentiefunctie voor de relatieve contrastgevoeligheid (de RCS-functie), afgeleid van de referentiefunctie voor de waarneembaarheid door RSC als 1 te stellen voor de referentieluminantie $L_{\text{ref}} = 100 \text{ cd/m}^2$ (Ontleend aan CIE, 1981, Figuur 4).

Afbeelding 4. De invloed van variaties van de hoek die door het waarnemen object wordt ingenomen (alfa 3) op de gemiddelde waarde van $\log L_2$ (Ontleend aan Schreuder, 1964a, Figuur 40).

Afbeelding 5. De invloed van variaties in de waarnemingstijd t op de gemiddelde waarde van $\log L_2$ (Ontleend aan Schreuder, 1964a, Figuur 41).

Afbeelding 6. De relatie tussen de drempelwaarde van de contrastgevoeligheid en de adaptatieluminantie met de grootte van het object als parameter (Ontleend aan Schreuder, 1971, Figuur 7; Bron: Adrian, 1964).

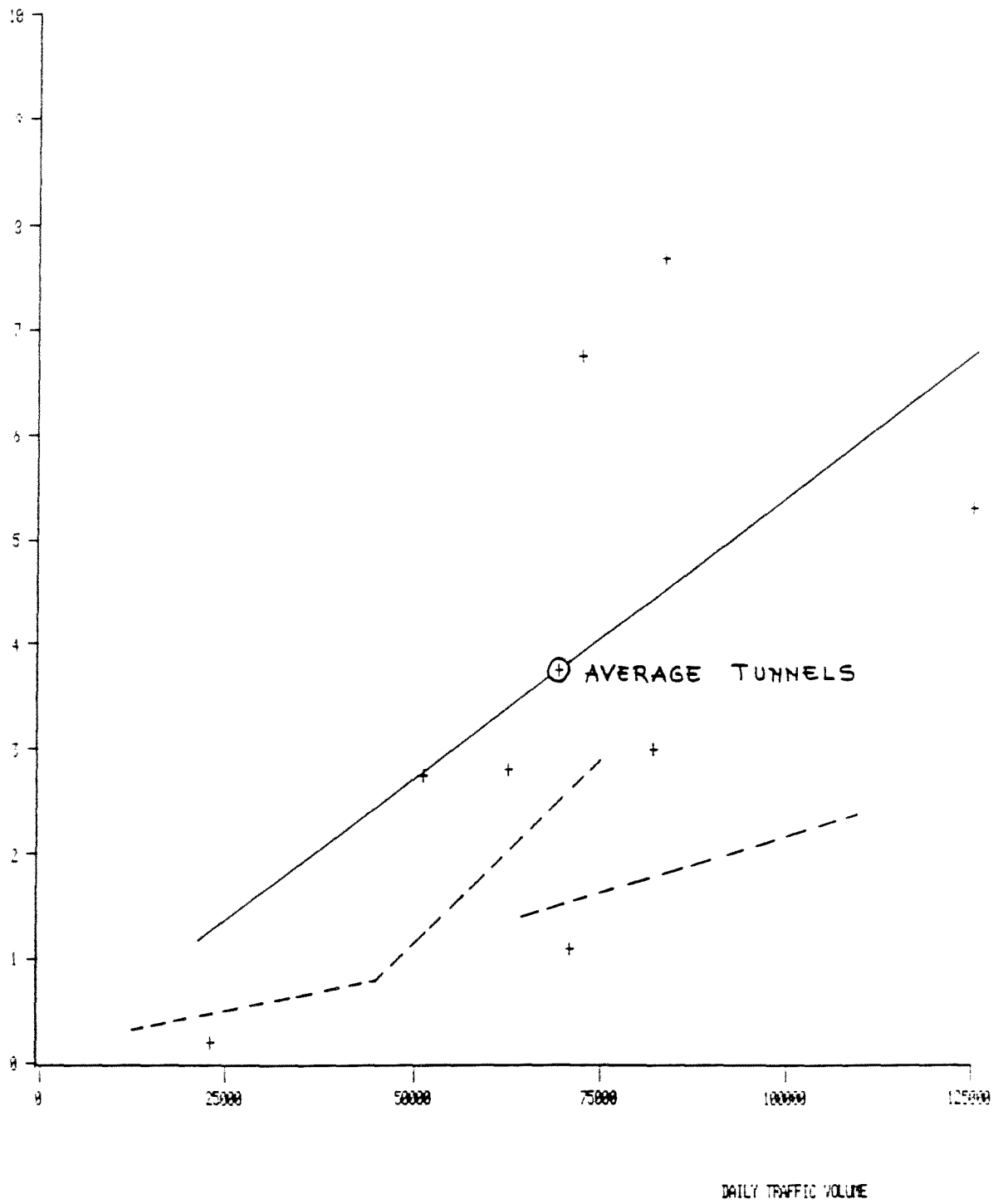
Afbeelding 7. Het gebied van waarneembare luminanties in afhankelijkheid van de adaptatie (Ontleend aan Hopkinson & Collins, 1970, Figuur 1.4).

Afbeelding 8. De schaduw van een object ten gevolge van lichtbronnen voorbij het object.

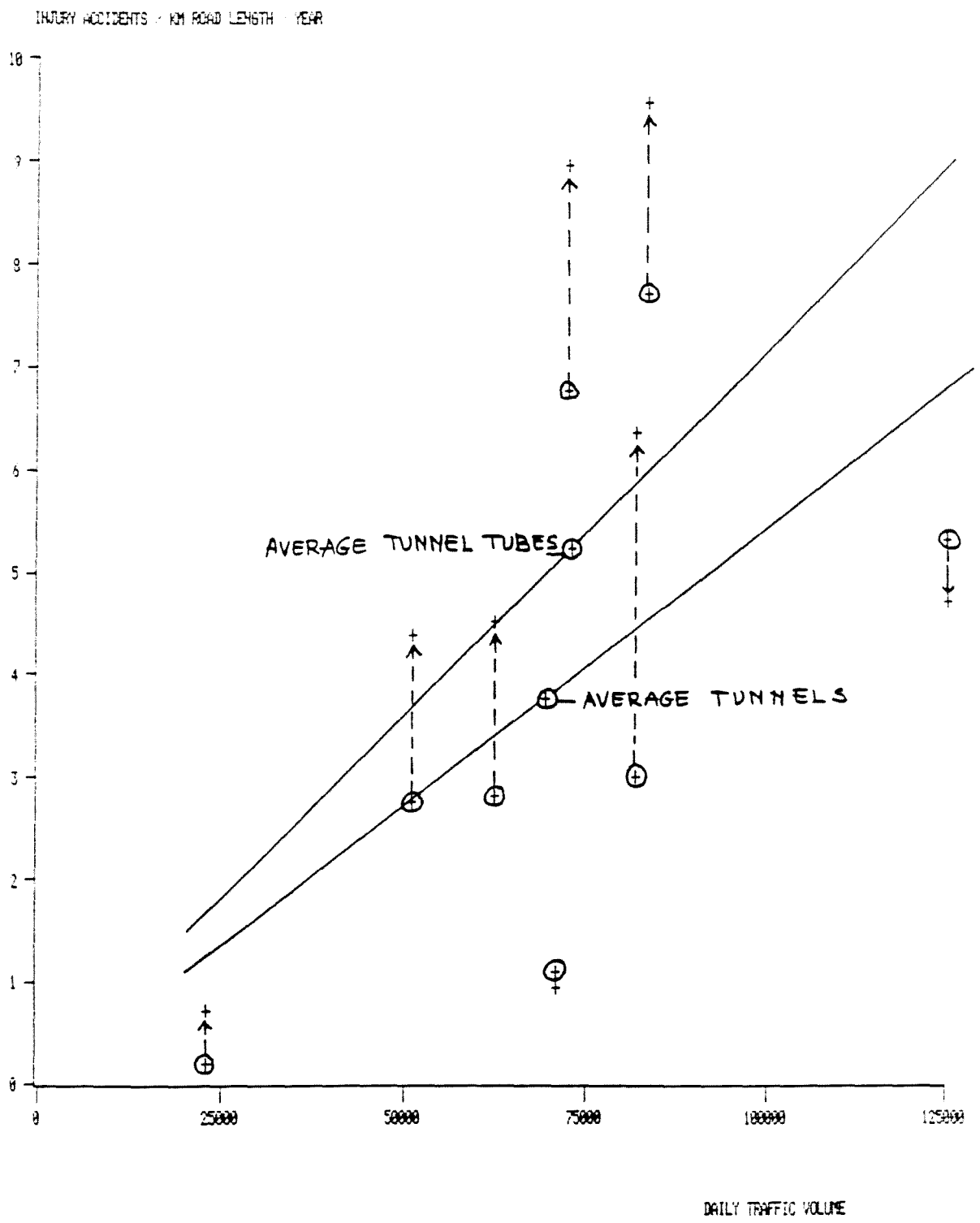
Afbeelding 9. Voorbeeld van een meting van de sluiertluminantie in de Noord-tunnel.

Afbeelding 10. Meetopstelling dynamische contrastmeting.

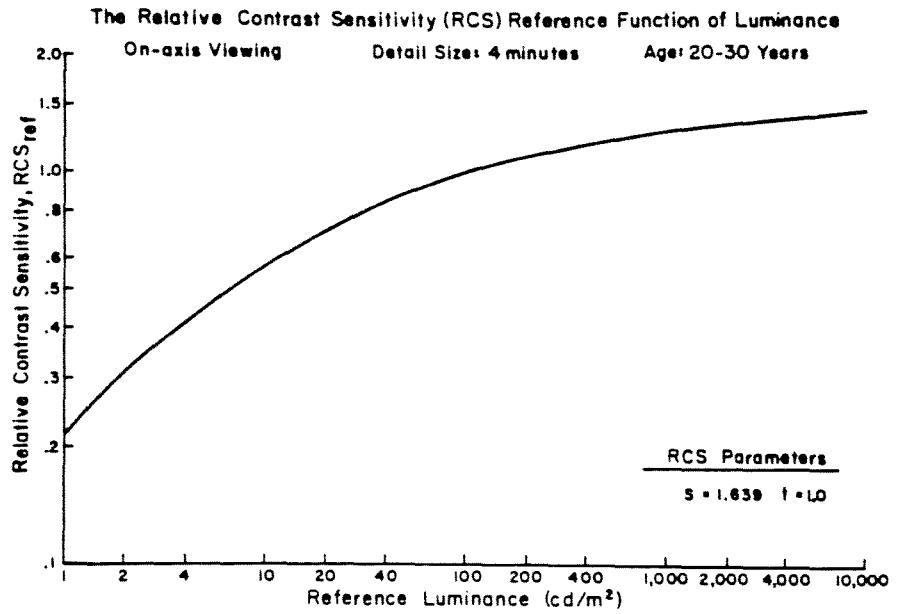
INJURY ACCIDENTS PER KM ROAD LENGTH PER YEAR



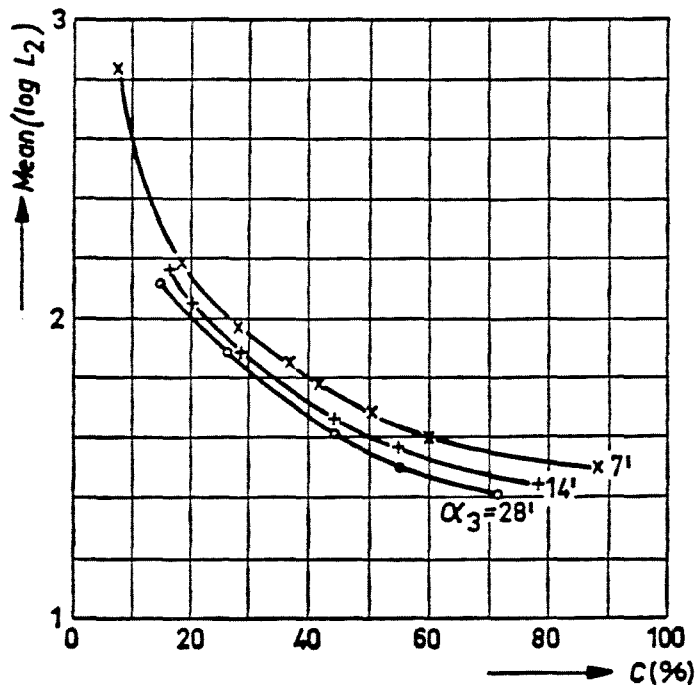
Afbeelding 1. Verkeersveiligheid in tunnels in autosnelwegen in Nederland (1986-1989) (Ontleend aan Janssen, 1991a).



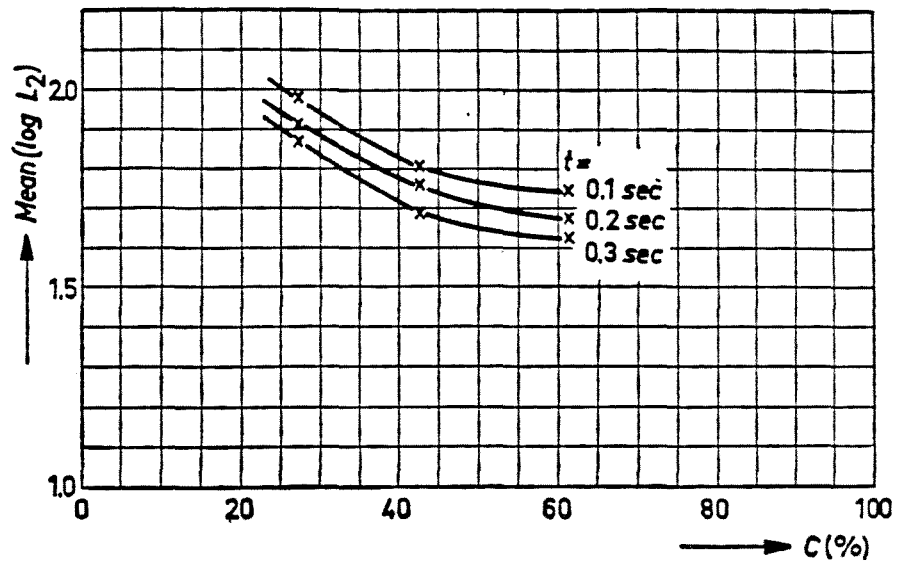
Afbeelding 2. Verkeersveiligheid in de tunnelbuizen van tunnels in auto-snelwegen in Nederland (1986-1989) (Ontleend aan Janssen, 1991a).



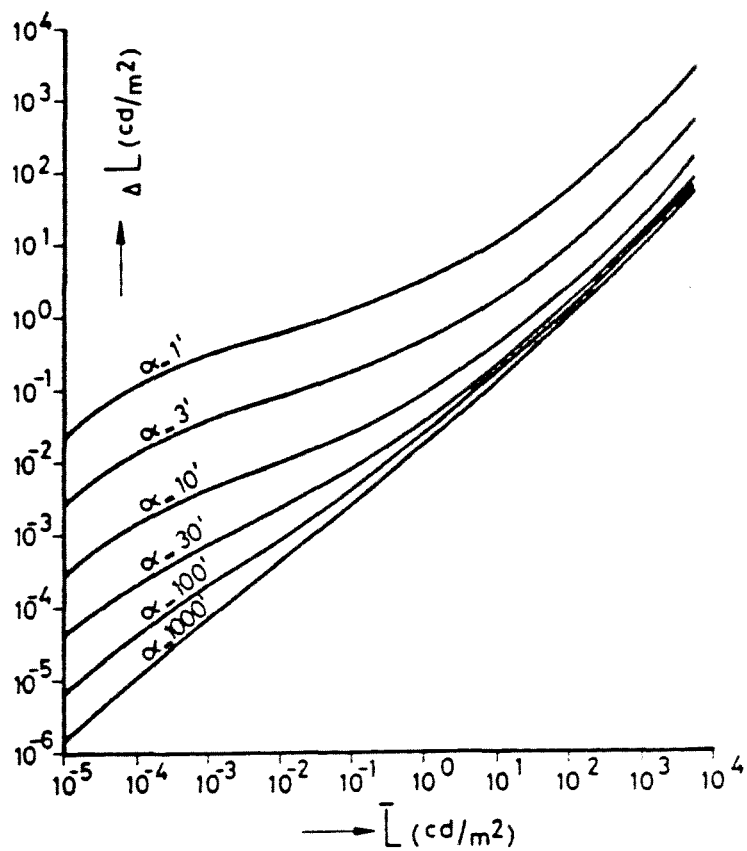
Afbeelding 3. De referentiefunctie voor de relatieve contrastgevoeligheid (de RCS-functie), afgeleid van de referentiefunctie voor de waarneembaarheid door RSC als 1 te stellen voor de referentieluminantie $L_{ref} = 100$ cd/m^2 (Ontleend aan CIE, 1981, Figuur 4).



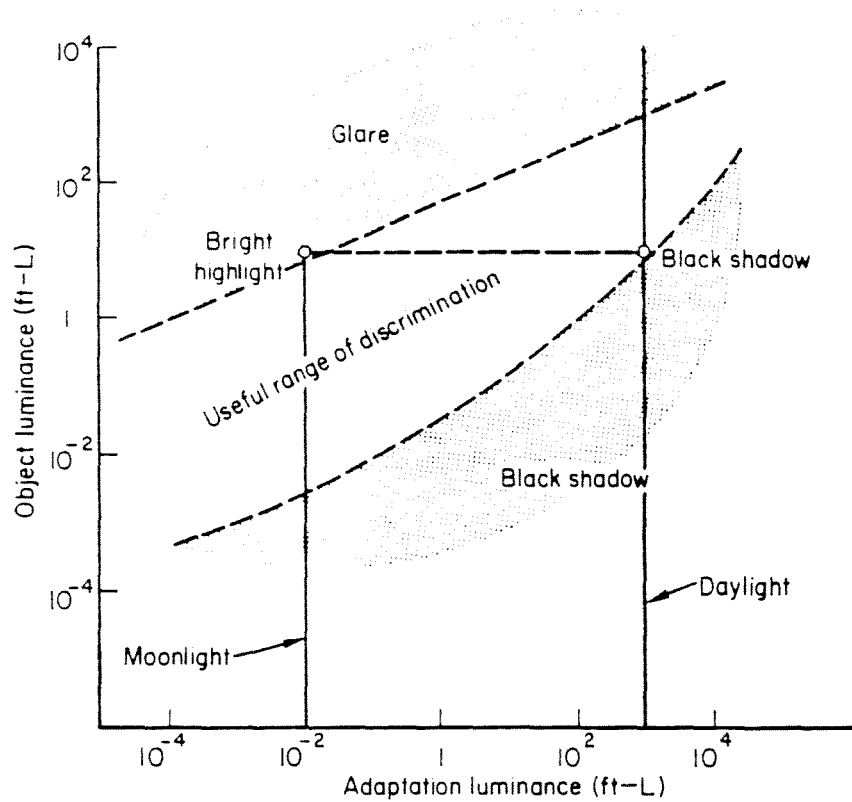
Afbeelding 4. De invloed van variaties van de hoek die door het waar te nemen object wordt ingenomen (alfa 3) op de gemiddelde waarde van $\log L_2$ (Ontleend aan Schreuder, 1964a, Figuur 40).



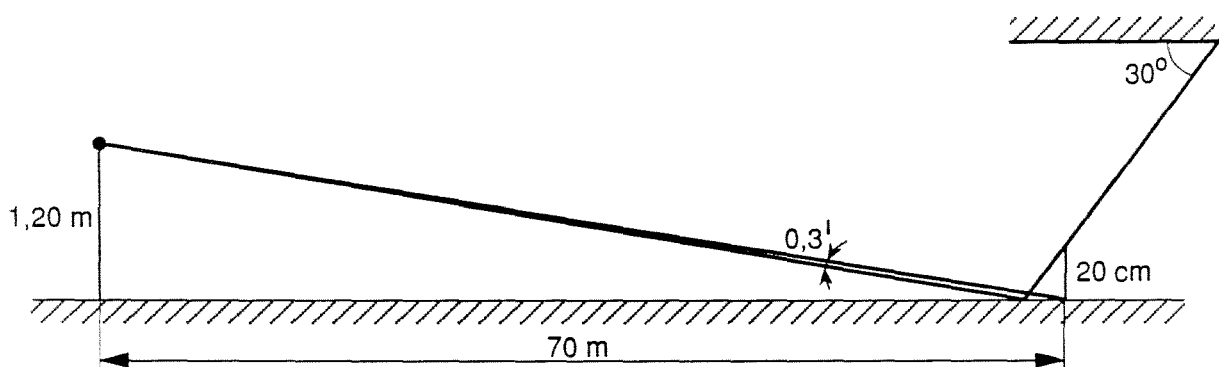
Afbeelding 5. De invloed van variaties in de waarnemingstijd t op de gemiddelde waarde van $\log L_2$ (Ontleend aan Schreuder, 1964a, Figuur 41).



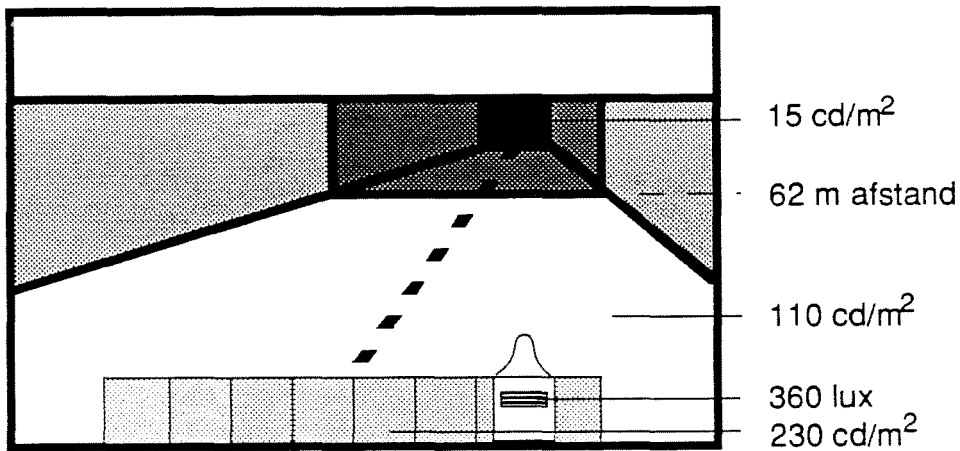
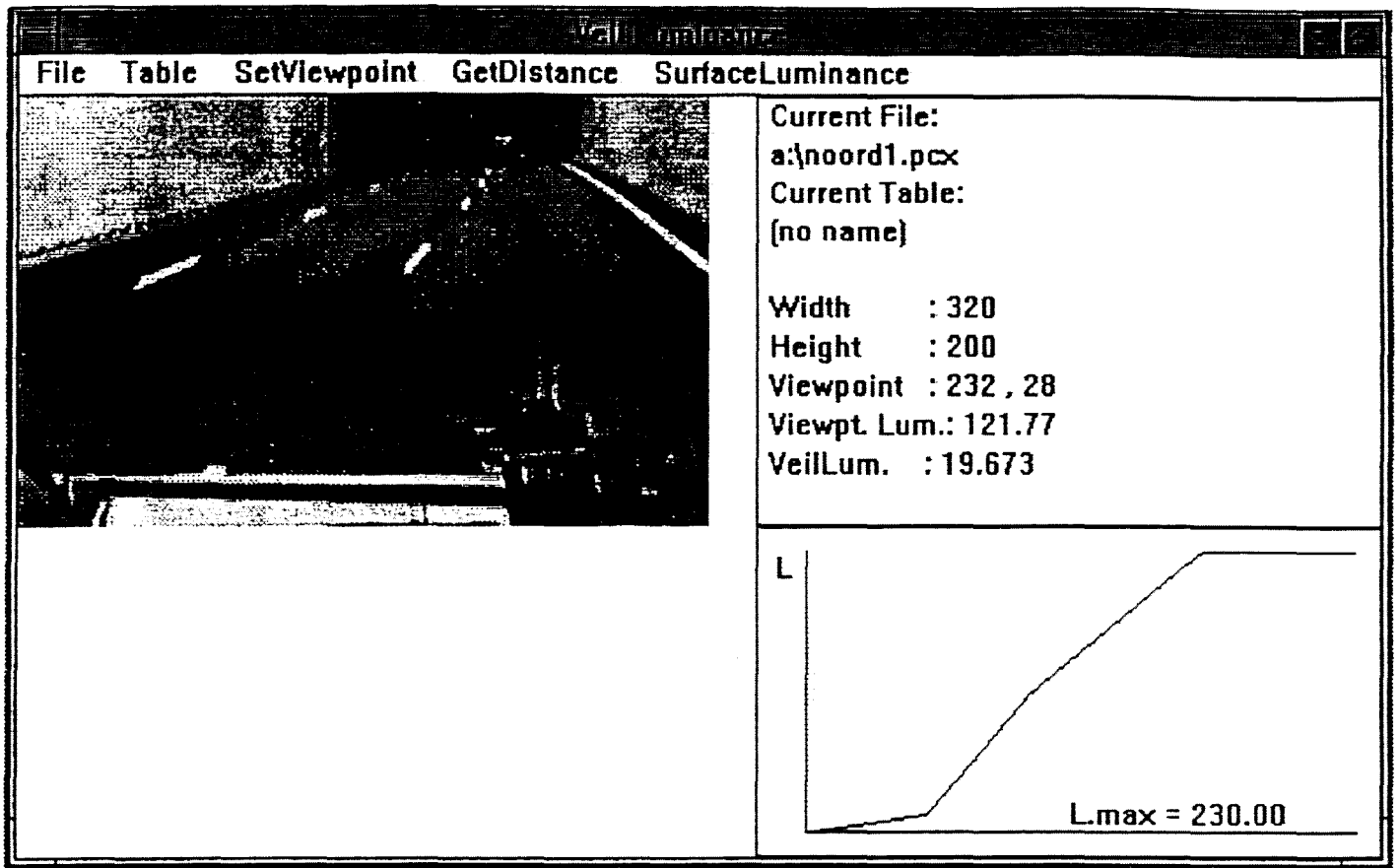
Afbeelding 6. De relatie tussen de drempelwaarde van de contrastgevoeligheid en de adaptatieluminantie met de grootte van het object als parameter (Ontleend aan Schreuder, 1971, Figuur 7; Bron: Adrian, 1964).



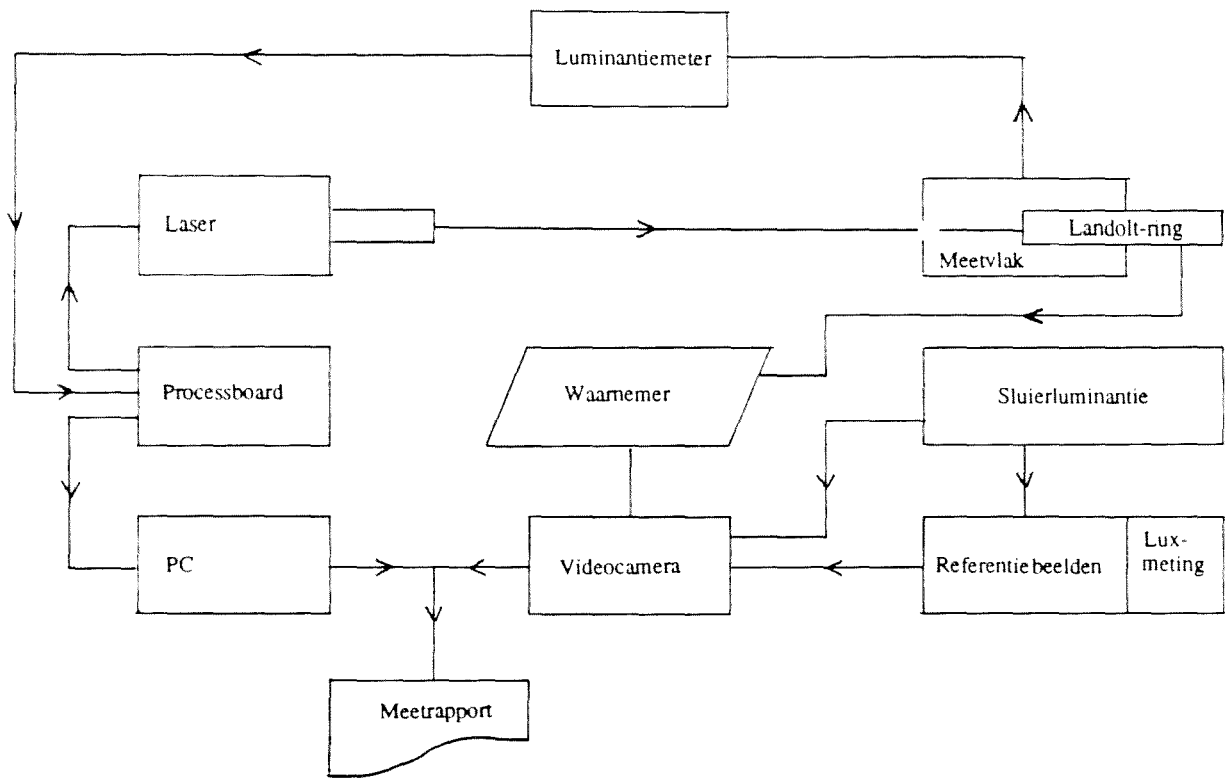
Afbeelding 7. Het gebied van waarneembare luminanties in afhankelijkheid van de adaptatie (Ontleend aan Hopkinson & Collins, 1970, Figuur 1.4).



Afbeelding 8. De schaduw van een object ten gevolge van lichtbronnen voorbij het object.



Afbeelding 9. Voorbeeld van een meting van de sluiertluminantie in de Noord-tunnel.



Afbeelding 10. Meetopstelling dynamische contrastmeting.