

TEGENSTRAALVERLICHTING IN TUNNELS

Een overzicht van de beschikbare literatuur

R-91-96

Dr. ir. D.A. Schreuder

Leidschendam, 1991

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Voorwoord

1. Inleiding
 - 1.1. Tegenstraalverlichting als systeem
 - 1.2. Eisen te stellen aan tunnelverlichting

2. De tegenstraling
 - 2.1. Terminologie
 - 2.2. Het beginsel van de tegenstraalverlichting

3. De theorie van de tegenstraalverlichting
 - 3.1. Waarnemingsaspecten
 - 3.1.1. Waarneembaarheid
 - 3.1.2. Verwachtingspatroon
 - 3.1.3. Beslissingsprocessen
 - 3.1.4. Waarnemen en beslissen
 - 3.1.5. De zichtruimte
 - 3.1.6. Verkeersrelevante objecten
 - 3.1.7. Visuele standaardobjecten voor tunnels
 - 3.2. De visuele waarneming van contrasten
 - 3.2.1. Het contrast
 - 3.2.2. De basisformule
 - 3.2.3. Het intrinsieke contrast
 - 3.2.4. De stoorkluisluminantie L_d
 - 3.2.5. De veldfactor
 - 3.3. Verkeersaspecten
 - 3.3.1. Het wegverkeer
 - 3.3.2. De functionele aanpak voor verkeersvoorzieningen
 - 3.3.3. Vraag en aanbod
 - 3.3.4. De luminantietechniek in de wegverlichting
 - 3.4. Reflectie van wegdekken en wegmarkeringen
 - 3.4.1. Reflectie en retroreflectie
 - 3.4.2. Reflectie van wegdekken
 - 3.4.3. Waarnemingscondities
 - 3.4.4. Reflectie-eigenschappen van wegmarkeringen

- 3.5. Wegmarkeringen in tunnels
 - 3.5.1. Waarneembaarheid van wegmarkeringen
 - 3.5.2. Geprofileerde wegmarkeringen
 - 3.5.3. Het nut van wegmarkeringen in tunnels
 - 3.5.4. Drainerende wegdekken
- 3.6. Theoretische consequenties voor de tegenstraalverlichting in tunnels
 - 3.6.1. Kwaliteitscriteria voor verlichting
 - 3.6.2. Contrast
 - 3.6.3. De visuele geleiding
 - 3.6.4. Armatuurrendement
 - 3.6.5. Bouwhoogte
 - 3.6.6. Ongelijkmatigheid
 - 3.6.7. Verblinding
 - 3.6.8. Flikkereffecten
 - 3.6.9. Daglicht
 - 3.6.10. Wegmarkeringen

4. De historie van de tegenstraalverlichting in tunnels

5. Onderzoekingen

- 5.1. Berekeningen over de effectiviteit van tegenstraalverlichting
 - 5.1.1. De geldigheid van de fundamentele experimenten
 - 5.1.2. Het "standaardobject" als kenmerk voor de visuele taak
 - 5.1.3. Berekening van de contrastfactor
- 5.2. Experimenten
 - 5.2.1. Ervaringen met tegenstraalverlichting
 - 5.2.2. Experimenten met tegenstraalverlichting
 - 5.2.3. De proeven in de Schöneegg-tunnel
 - 5.2.4. Experimenten in de tunnel bij Wevelgem
 - 5.2.5. Experimenten met meestraling
 - 5.2.6. Overige rijproeven
 - 5.2.7. Conclusie

6. Proefnemingen in Nederland

- 6.1. Oogmerk van de proefnemingen
- 6.2. Opzet van de proefnemingen
- 6.3. Uitvoering van de proefnemingen

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1. Conclusies

7.2. Aanbevelingen

Literatuur

Tabellen 1 t/m 7

VOORWOORD

Dit overzicht is een onderdeel van de werkzaamheden die door de SWOV worden uitgevoerd aangaande het onderwerp "tegenstraalverlichting", in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat middels de opdracht nr. DUHA 037 van 6 mei 1991.

Het overzicht sluit aan bij een eerder door de SWOV in opdracht van de Rijkswaterstaat gemaakte literatuurstudie over de ingangsverlichting van lange tunnels (Schreuder, 1981). Bij dit aanvullende overzicht is gebruik gemaakt van de notitie "Plan van aanpak tegenstraalverlichting" die door RWS-Bouwdienst is opgesteld (Swart, 1991).

Het onderzoek betreft de vraag of het beginsel van de tegenstraalverlichting voor toepassing in Nederlandse tunnels in aanmerking komt. Het onderhavige rapport is daarvan een onderdeel; het betreft een overzicht van de bestaande kennis. Daarbij is mede gebruik gemaakt van niet-gepubliceerde rapporten. Een tweede fase van het onderzoek betreft het inrichten van een proefinstallatie; de definitieve beslissingen daarover zullen mede aan de hand van de uitkomsten van het onderhavige rapport worden genomen. Vooruitlopend op deze beslissingen zijn in dit rapport enige overwegingen opgenomen over de beginselen van deze proefinstallatie, meer in het bijzonder over de methoden om na te gaan of de proefinstallatie aan de te stellen eisen voldoet; d.w.z. of de proefinstallatie inderdaad uitsluitsel kan geven over de vraag of tegenstraalverlichting voor Nederlandse tunnels in aanmerking komt.

1. INLEIDING

1.1. Tegenstraalverlichting als systeem

Traditioneel worden (lange) tunnels op een symmetrische wijze verlicht; dit wil zeggen dat het licht door de armaturen even sterk met het verkeer mee wordt gericht als tegen het verkeer in. De verlichting heeft daarmee een min of meer "diffuus" karakter zonder voorkeursrichting. In Zwitserland is het zgn. "tegenstraalbeginsel" uitgewerkt ("Gegenstrahlbeleuchtung"). Daarbij wordt het licht volledig of in hoofdzaak tegen de rijrichting van het verkeer gericht.

Wanneer tegenstraalverlichting wordt toegepast, heeft dit consequenties voor een aantal aspecten van het ontwerp van de verlichting van de tunnel, maar ook enige consequenties voor andere aspecten van het tunnelontwerp, zoals bijvoorbeeld de keuze van de oppervlakken die voor het wegdek en de wanden in de tunnel worden gebruikt. Men kan dus met recht spreken van een "systeem" van tegenstraalverlichting.

Tegenstraalverlichting is een discussiepunt onder de experts op het gebied van de tunnelverlichting. Naast een groot aantal technisch-wetenschappelijk te toetsen argumenten is er ook sprake van een zekere "schoolvorming": deskundigen zijn "voor" of "tegen" tegenstraalverlichting.

Het systeem wordt in Zwitserland, Frankrijk, Oostenrijk en Joego-Slavie op grote schaal toegepast, sporadisch ook in (zuidelijk) Duitsland en Italië. Men kan wel van een "Alpen-systeem" spreken, omdat buiten het Alpengebied, ook in andere bergachtige regionen, tegenstraalverlichting nauwelijks of helemaal niet wordt toegepast. In de Alpenlanden wordt tegenstraalverlichting met verve verdedigd. De beslissingen die ertoe hebben geleid dat tegenstraalverlichting daar op grote schaal wordt toegepast, is gebaseerd op een niet precies te achterhalen afweging van de voor- en nadelen. Op grond van al evenmin te achterhalen afwegingen wordt in de meeste andere landen de tegenstraalverlichting afgewezen: (noordelijk) Duitsland, Engeland, Japan, USA, Scandinavische landen, enz. In Nederland zijn de meningen verdeeld.

Aangezien de toetsbare argumenten veelal zeer valide zijn, lijkt het wenselijk te onderzoeken of het beginsel voor Nederland voor toepassing in aanmerking komt.

Tegenstraalverlichting is een punt van discussie niet alleen bij tunnelverlichting, maar ook bij verkeersverlichting meer in het algemeen. Ofschoon het daarbij om in beginsel dezelfde zaken gaat, heeft de discussie een ietwat ander karakter. Dit komt omdat er in het terrein van de straatverlichting voorstanders zijn van symmetrische verlichting, die tegenover zich vinden de voorstanders van "meestralende" verlichting. In par 5.2.5 zal de meestralende verlichting verder worden toegelicht; niet omdat het een oplossing is voor het probleem van het zo goed mogelijk verlichten van een straat of een tunnel, maar wel omdat de argumenten zeer veel lijken op de argumenten voor en soms ook die tegen tegenstraalverlichting.

1.2. Eisen te stellen aan tunnelverlichting

Tunnelverlichting wordt, zoals vrijwel alle openbare verlichting, tot de functionele verlichting gerekend. In par. 3.3.2 gaan we verder in op de kenmerken van functionele verlichting; hier zal de consequentie van deze keuze kort worden samengevat, en wel in de vorm van de eisen die aan de verlichting in tunnels worden gesteld.

De functionele aanpak is gebaseerd op de gedachte dat de functie van de verlichting is het vlotte en veilige verloop van het wegverkeer in en door de tunnel mogelijk te maken. Het eerste vereiste is dat het verkeer op het zelfde niveau van verkeersafwikkeling en met dezelfde mate van verkeersveiligheid kan worden afgewikkeld; met andere woorden: men wijst de mogelijkheid af dat de tunnel een "bottle neck", of een "accident black spot" wordt. Deze overweging is ingegeven door twee aspecten:

1. Tunnels zijn smalle, afgesloten buizen. Dit betekent dat een ongeval in een tunnel gemakkelijker tot een ramp kan uitgroeien dan op de open weg; voorts kan het verkeer (de personen) in een tunnel moeilijk bereikt worden. De eisen die aan de technische voorzieningen in een tunnel worden gesteld - de verlichting inbegrepen - zijn, gezien de extra bronnen van gevaar en de moeilijke bereikbaarheid, zwaarder dan die welke voor de open weg gelden;

2. Tunnels worden (in Nederland tenminste) alleen aangelegd wanneer het

verkeersaanbod een onderbreking (zoals bij bruggen of veren kunnen voorkomen) ten enen male onacceptabel is.

De functies waar het bij de verlichting van tunnels om gaat, zijn gebaseerd op de rijtaak. De rijtaak bestaat uit het nemen van de juiste beslissingen, en het correct uitvoeren ervan. Het gaat daarbij om twee groepen van beslissingen, en wel beslissingen die te maken hebben met het "gewone" verkeer - de normale afwikkeling, de normale doorstroming - en om beslissingen die te maken hebben met (plotselinge, onverwachte en ongewenste) noodsituaties - de beslissingen die te maken hebben met het vermijden van botsingen. Deze rijtaakaspecten zijn uitgewerkt in par. 3.1.5, alwaar ze worden aangeduid met Taak I en Taak II.

Gezien de reeds genoemde extra gevarenbronnen, en de moeilijke bereikbaarheid, wordt aan de installaties in de tunnel (daarbij inbegrepen de verlichting) de eis gesteld dat Taak II moet kunnen worden uitgevoerd. Meer concreet: het wordt noodzakelijk geacht dat voor een stilstaand obstakel tijdig kan worden gestopt - eventueel middels een noodstop. In par. 3.1.5 wordt nader toegelicht dat voor een noodstop bij 70 km/uur een zichtruimte van ca. 100 meter, en voor 110 km/uur een zichtruimte van ca. 180 meter nodig is. Op deze zichtruimten dient het ontwerp van de installatie voor de tunnelverlichting te zijn gebaseerd.

2. DE TEGENSTRALING

2.1. Terminologie

Onder "tegenstraalverlichting" wordt verstaan die wijze van het verlichten van een tunnel waarbij het licht van de armaturen (in hoofdzaak of geheel) in tegengestelde richting ten opzichte van de rijrichting van het verkeer wordt uitgestraald.

De term "tegenstraalverlichting" is geleidelijk ingeburgerd geraakt. In andere landen worden vergelijkbare termen gebruikt (Gegenstrahl; counter-beam enz.; zie bijv. Schreuder, 1981; Stolzenberg, 1984, en BSI, 1986). De term is eigenlijk niet geheel correct. Het kenmerk van de tegenstraalverlichting is dat men het effect van de lichtstralen die tegen de verkeersrichting in het wegdek, de wanden en de objecten treffen, optimaal probeert te benutten. Dit hoeft niet in te houden dat er door de armaturen geen andere lichtstralen worden uitgezonden. Wel is het logisch te verwachten dat, wanneer met vooral gebruik maakt van "tegenstralen", men poogt om minder licht in andere richtingen uit te stralen. Dit leidt tot de wenselijkheid van armaturen met (in de lengterichting van de tunnel gezien) asymmetrische lichtverdelingen. Daarom spreekt men ook wel van "asymmetrische" verlichting.

In het Frans wordt vaak de term van "verlichting met contrastverhogende werking" gebruikt; dit is een duidelijke verwijzing naar een van de kenmerken van tegenstraalverlichting (Novellas, 1982).

In het onderhavige rapport zal de term "tegenstraalverlichting" worden gebruikt.

2.2. Het beginsel van de tegenstraalverlichting

Het idee van de tegenstraalverlichting is reeds oud. Zowel in de straatverlichting als in de tunnelverlichting is het reeds in de jaren vijftig toegepast. Zoals in Hoofdstuk 3 zal worden beschreven, is het idee van de tegenstraalverlichting een direct uitvloeisel van de zgn. "luminantietechniek" in de straatverlichting. De luminantietechniek is in detail beschreven in Schreuder (1964a; 1967). In Hoofdstuk 4 zullen we kort ingaan op de geschiedenis van de tegenstraalverlichting.

Het grondbeginsel van de luminantietechniek is dat de waarneming van objecten op de weg door twee dingen wordt bepaald:

- de adaptatieluminantie
- het contrast.

Wanneer men rekening houdt met de gebruikelijke kenmerken en waarden van de reflectie van wegdekken en objecten, is het "vanzelf" duidelijk dat tegenstraalverlichting de doeltreffendheid (effectiviteit) van de verlichting verhoogt.

Met twee aspecten is daarbij 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). Deze vragen zullen in deze literatuurstudie aan de orde komen.

Aan tegenstraalverlichting kleven, in vergelijking tot traditionele (symmetrische) verlichting, een aantal voor- en nadelen. De belangrijkste voordelen zijn:

- Door gebruik te maken van het spiegelende aandeel van de reflectie van het wegdek, wordt bij gelijke horizontale verlichtingssterkte op het wegdek een hogere wegdekluminantie bereikt. Iets dergelijks geldt ook voor de wanden. Omgekeerd kan bij gelijke luminantie met een lagere verlichtingssterkte worden volstaan.
- Door het tegenstraaleffect wordt de achterkant van eventuele objecten sterker, en de voorkant ervan zwakker verlicht, zodat de luminantie van de objecten lager wordt.
- Deze twee effecten te zamen leiden tot een hoger contrast tussen object en wegdek, en dus (meestal) tot een betere zichtbaarheid. Omgekeerd kan voor gelijke zichtbaarheid een lager lichtniveau worden geïnstalleerd.
- De visuele geleiding wordt verbeterd.

De belangrijkste nadelen zijn:

- De scherpere lichtverdeling leidt meestal tot een lager armatuurrendement.
- De bouwhoogte van de armaturen is groter, zodat de hoogte van de tunnelconstructie groter moet zijn.
- Het luminantiepatroon op het wegdek en op de wanden is minder gelijkmatig.

- De verlichting levert sterkere verblinding op.
- De verlichting kan niet met continue lichtlijnen worden uitgevoerd. daarom is de kans op hinder door flikkereffecten groter.

Deze voor- en nadelen, maar vooral de voordelen, zijn op vele plaatsen in de literatuur beschreven. In Hoofdstuk 3 komen we terug op de meer technisch-wetenschappelijk georiënteerde publikaties; hier 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); Stolzenberg (1984); Walthert (1976, 1978).

Een punt dat aparte aandacht verdient is de waarneembaarheid van wegmarkeringen. De waarneembaarheid van wegmarkeringen op de "open weg" blijkt vooral bij duisternis problemen op te leveren op wegen zonder openbare verlichting, en dan speciaal bij nat wegdek (al dan niet bij regen). De markeringen worden onder die omstandigheden uitsluitend verlicht door autokoplantaarns - een extreme vorm van "meestralende" verlichting. Om bij die verlichtingswijze de waarneembaarheid te waarborgen, worden retro-reflecterende elementen (glasparels, hoekspiegels, "katte-ogen") in de wegmarkering verwerkt. Om de waarneembaarheid ook bij nat wegdek te waarborgen, worden de wegmarkeringen "geprofileerd". Aangezien wegmarkeringen bij de geleiding van het verkeer in tunnels een belangrijke functie vervullen, is het nodig om apart te bekijken hoe de waarneembaarheid van wegmarkeringen kan worden bevorderd wanneer tegenstralende verlichting wordt toegepast. Om deze redenen is een aanzienlijke ruimte in dit rapport aan de wegmarkeringen ingeruimd (par. 3.5). In par. 3.6 komen we terug op andere aspecten die met de meestralende verlichting te maken hebben.

3. DE THEORIE VAN DE TEGENSTRAALVERLICHTING

3.1. Waarnemingsaspecten

3.1.1. Waarneembaarheid

Wanneer we de eisen die aan de waarneming in het verkeer willen onderzoeken, dan is het uiteraard van belang om na te gaan waar deze waarneming voor dient. Deze vraag lijkt een vanzelfsprekend antwoord op te leveren: het ontwaren van gevaarlijke obstakels. Dit is terecht, maar het is slechts een deel van het antwoord. We zullen ons bij de verdere bespreking van de waarneming beperken tot de waarneming zoals die door een bestuurder van een motorvoertuig (personenauto, vrachtwagen of motorfiets) moet worden uitgevoerd. Voor andere verkeersdeelnemers gelden zeer analoge beschouwingen; de ervaring heeft echter geleerd dat de eisen die eruit volgen, over het algemeen minder zwaar zijn, zodat het gerechtvaardigd is om ons tot automobilisten te beperken.

Bij de waarneming van objecten in het verkeer dient steeds een aantal aspecten te worden onderscheiden. Deze aspecten zullen worden toegelicht aan de hand van de omschrijving van een aantal begrippen:

Waarnemen (waarneembaarheid): hieronder wordt verstaan het algemene begrip van het verzamelen en verwerken van informatie. Waarnemen is in laatste instantie het overbrengen van informatie. Waarneembaarheid is een kwalitatief begrip.

Detecteren (detecteerbaarheid): hieronder wordt verstaan de mate waarin aan de primaire waarneming wordt voldaan, waarbij alleen de aanwezigheid van een object wordt geconstateerd. Meestal wordt de detecteerbaarheid onder laboratoriumomstandigheden bepaald en uitgedrukt in drempelwaarden: de kans (meestal gesteld op 50%) dat het object ontwaard wordt. Detecteerbaarheid is een kwantitatief begrip. Wanneer het om de visuele waarneming gaat, spreekt men meestal van de zichtbaarheid.

Opvallen (opvallendheid: hieronder wordt verstaan de mate waarin het object kan worden waargenomen in de "werkelijke wereld", waarbij rekening wordt gehouden met de in de werkelijke wereld voorkomende verstoringen. De opvallendheid is te beschouwen als het "vermogen" van een object om de aandacht te trekken, resp. te richten. De opvallendheid wordt meestal in veldexperimenten bepaald; ze wordt gewoonlijk uitgedrukt in de mate waarin

de drempelwaarde (zie detecteerbaarheid) wordt overschreden (de "bovendrempeligheid"). Opvallendheid is een kwantitatief begrip.

Herkennen (herkenbaarheid: hieronder wordt verstaan de mate waarin de vergelijking van het object met de inhoud van het "geheugen" mogelijk is; de mate waarin het object aan een klasse van vooraf bekend objecten kan worden toegedeeld. De herkenbaarheid wordt bepaald met de methoden van de cognitieve psychologie; aangezien nog maar weinig kwantitatieve methoden ter beschikking staan, is herkenbaarheid een semi-kwalitatief begrip.

In psychologische termen: detecteerbaarheid hoort tot de waarnemingsfysiologie; de opvallendheid tot de functiepsychologie, en herkenbaarheid tot de cognitieve psychologie. Op dit gebied is recentelijk veel onderzoek uitgevoerd; veel onderzoek is nog niet afgesloten. Een gevolg daarvan is dat er op een aantal details nog geen eenstemmigheid is tussen de op dit terrein werkzame onderzoekers; over de hoofdzaken is men het echter intussen wel ongeveer eens. Overzichten van de literatuur zijn gegeven in: Hagenzieker (1989, 1990, 1991); Hagenzieker & Van der Heijden, 1990, 1990a); Norman (1976); Riemersma (1988, 1988a, 1988b); Schreuder (1985, 1985c, 1988a, 1988b, 1990); Theewes (1989, 1990); Wertheim (1986).

Men kan stellen dat in de gegeven volgorde (detecteerbaarheid - opvallendheid - herkenbaarheid) steeds "hogere" niveaus van het centrale zenuwstelsel, alsmede van het bewustzijn, bij de waarneming betrokken zijn. Dit is van belang wanneer men maatregelen overweegt om de waarneembaarheid te verbeteren: aan de zichtbaarheid is niet veel te doen; de opvallendheid kan door training, en de herkenbaarheid door opleiding en educatie worden verbeterd.

Een essentieel onderdeel van het waarnemingsproces is uiteraard het waar te nemen object. In vele gevallen is het gemakkelijk aan te geven welk object waargenomen dient te worden; in het wegverkeer is dit echter niet het geval. We komen verderop nog terug op "het" object bij wegverkeer, maar we vermelden reeds hier het discussiepunt aan bij de controverse over tegenstraalverlichting ten grondslag ligt: tegenstraalverlichting komt vooral tot zijn recht bij stilstaande objecten (en een stilstaande waarneemer). De "voorstanders" van tegenstraalverlichting vinden dat daarmee de wezenlijke kenmerken van de visuele taak in het verkeer kunnen worden aangegeven; de "tegenstanders" zijn echter van mening dat een stilstaand

object nauwelijks, en een stilstaande waarnemer in het geheel niet relevant is voor de waarneming in het wegverkeer.

3.1.2. Verwachtingspatroon

Bij de aspecten van de waarneming is het verwachtingspatroon van groot belang. Hieronder wordt verstaan de mate waarin het "opduiken" van een object van een bepaalde klasse "in de lijn der verwachtingen" ligt. Onverwachte objecten worden veel moeilijker - later, slechter, of soms in het geheel niet - gedetecteerd in vergelijking tot verwachte objecten. De verwachting hangt af van een aantal factoren:

- de waakzaamheid van de waarnemer (arousal);
- de oplettendheid van de waarnemer (alertness);
- de bekendheid met de objecten (algemene ervaring als verkeersdeelnemer);
- de bekendheid met de situatie (plaatselijke ervaring van de verkeersdeelnemer).

Op dit gebied is zeer veel onderzoek gedaan. Tamelijk oude, maar zeer complete overzichten van de invloed van het verwachtingspatroon op de waarneming (in hoofdzaak visueel, maar ook akoestisch) en op de daarop gebaseerde beslissingspatronen zijn gegeven in Broadbent (1958); Krendel & McRuer (1960); Graham (ed.) (1965). Modernere overzichten zijn gegeven in Michon et al. (eds.) (1979); Norman (1976); Sheridan & Ferrell (1974) en in de verslagen van de jaarlijkse "NASA Conferences on Manual Control"; zie bijvoorbeeld Krendel & McRuer (1969). Griep (1971) heeft een nog steeds actueel overzicht gegeven van de invloed van verwachtingspatronen op de perceptie in het verkeer. Zie ook Blaauw & Riemersma (1975); Padmos (1984); Walraven (1980). Het verwachtingspatroon is een belangrijke factor in de gedachten over de categorisering van wegen, en de herkenbaarheid van de klassen (Janssen, 1988; Janssen, 1986).

In essentie komt het erop neer dat objecten die in het verwachtingspatroon vallen, gemakkelijker worden waargenomen dan objecten die "vreemd" of "onverwacht" zijn. Op grond van deze overwegingen kan de rijtaak (of eigenlijk de verkeerstaak), zoals reeds in par. 1.2 is aangegeven, worden verdeeld in een "Taak I" die te maken heeft met manoeuvres ten gevolge van verwachte objecten, en een "Taak II" die te maken heeft met onverwachte objecten. Meer in het bijzonder moet men bij onverwachte objecten met een

langere "reactietijd" rekenen dan bij verwachte objecten. Zie Tabel 1; en verder ook par. 3.1.5.

Ervaren verkeersdeelnemers spelen daarop in. Deze verkeersdeelnemers zoeken op actieve wijze de omgeving af naar die objecten die volgens hun verwachtingspatroon in de betreffende situatie van weg en verkeer aanwezig zullen zijn. Meer in het bijzonder zal dit voor wegmarkeringen op 80 km/-uur-wegen het geval zijn; immers op dergelijke wegen behoren wegmarkeringen tot de normale uitmonstering. Wanneer ze wegens slecht onderhoud, of wegens bepaalde atmosferische situaties (regen, mist) slecht zichtbaar zijn, zullen de verkeersdeelnemers ernaar gaan zoeken. Uiteraard worden voorwerpen die er wel zijn, maar die slecht zichtbaar zijn, veel gemakkelijker ontwaard wanneer er actief naar wordt gezocht. Over deze materie is veel onderzoek gedaan. Het betreft bij voorbeeld studies van oogbewegingen, waarbij is gebleken dat ervaren autobestuurders een geheel andere zoekstrategie vertonen dan nieuwelingen (Cohen, 1985; Cohen & Zwahlen, 1989; Matanzo & Rockwell, 1967; Riemersma, 1979; Rockwell et al., 1967; Zwahlen, 1980). Ook is op dit gebied psychologisch onderzoek uitgevoerd. Er is echter geen onderzoek bekend dat direct op het wegverkeer betrekking heeft; het is dus niet mogelijk om kwantitatief aan te geven in welke mate de waarneembaarheid objecten bevorderd wordt door het "juiste" verwachtingspatroon, of door doelgerichte zoekstrategieën.

Onderzoek heeft tot het inzicht geleid dat bij tunnels het verwachtingspatroon anders wordt: tunnels spelen kennelijk in de belevingswereld van automobilisten een belangrijke rol. Dit blijkt ten eerste in de aanpassingen van de patronen van oogbeweging in de buurt van tunnels. Dit is gevonden door Narisada & Yoshikawa (1974) en door Zwahlen (1979): gebleken is dat in de buurt van de tunnelingang de ogen veel meer gericht zijn op de tunnel zelf, en minder op de omgeving. In de Japanse praktijk wordt daarom vaak van het "fixatiepunt" gesproken (Narisada & Yoshikawa, 1974); dit in tegenstelling tot het door Schreuder (1964) ingevoerde "adapatatiepunt".

Ten tweede blijkt het belang van de ervaring van de tunnel in de belevingswereld van de automobilist in de veranderingen in het rijgedrag die bij tunnelingangen zijn geconstateerd. Gallagher & Freedman (1979) vonden dat bij tunnelingangen die "onvoldoende" waren verlicht, vaak, en soms zeer bruusk, werd geremd; daaruit is geconcludeerd dat een "onvoldoende"

verlichte tunnel een gevaar voor het wegverkeer kan opleveren (Gallagher et al., 1979). "Onvoldoende" is daarbij globaal aangeduid als "niet in overeenstemming met de gangbare Amerikaanse aanbevelingen". Recentere onderzoeken in Duitsland geven geen bevestiging van deze resultaten: er blijkt weinig invloed van de verlichting te zijn op de gemeten snelheid waarmee de tunnel binnen wordt gereden (Kayser & Pasderski, 1990). Een mogelijke verklaring van het verschil in uitkomsten van deze metingen zou kunnen zijn dat ook de "slechte" Europese tunnels anno 1990 goed verlicht zijn in vergelijking tot de tunnels die door Gallagher zijn onderzocht. Ook is het mogelijk dat de automobilisten van nu meer aan het fenomeen "tunnel" zijn gewend.

3.1.3. Beslissingsprocessen

Men verwacht van de verlichting een bijdrage tot de verkeersafwikkeling en de verkeersveiligheid. Beslissingen dienaangaande worden genomen door het "beleid", maar ook de beslissingen te nemen door de ontwerpers en beheerders van de verlichting, alsmede door de weggebruikers zijn van belang. Hier gaan we in op een bepaald aspect van beslissingsprocessen, en wel de - steeds terugkerende - relatie tussen "doel" en "middel". Details van dit aspect zijn besproken door Schreuder (1985a).

Beslissingen worden genomen op basis van informatie, en leiden tot een actie. In de meeste gevallen betreft de actie een keuze tussen twee alternatieven. Men kan het gekozen van de twee alternatieven beschouwen als het "doel" van de beslissing. Een doel is echter nooit een "echt einddoel": het doel is steeds te beschouwen als een middel om een in ruimte of tijd verder weg liggend doel te bereiken.

Beslissingen kunnen steeds in een hiërarchische opklimming worden gerangschikt, waarbij het doel op niveau n steeds het middel is op niveau n+1; het doel op niveau n+1 is het middel op niveau n+2, enz. Omgekeerd is het middel op niveau n het doel op niveau n-1, enz. Voor de praktijk kan de reeks naar beide kanten als onbegrensd worden beschouwd.

3.1.4. Waarnemen en beslissen

Waarnemen en beslissen worden als onderdelen beschouwd van de rijtaak, of,

beter gezegd, de verkeerstaak. Op het gebied van de verkeerstaak is reeds veel onderzoek uitgevoerd. De eerste studies dateren uit de jaren zeventig (Asmussen, 1972; 1972a; Griep, 1971, Schreuder, 1970; 1970a). Deze studies waren sterk theoretisch getint, en bovendien, door gebrek aan resultaten van bruikbare experimenten, vooral kwalitatief. Meer recent is veel, ook kwantitatief, resultaat ter beschikking gekomen. Overzichten zijn gegeven door Hagenzieker (1989); Riemersma (1979, 1985); enz. Veel van dit onderzoek betreft waarnemen op de rechte weg, maar ook is veel studie gedaan aan waarneembaarheid in bogen. Zie bijvoorbeeld Armour et al. (1989), Cavallo et al. (1988), Levelt (1987), Riemersma (1988b, 1989, 1989a, b).

In het algemeen dient de waarneming om de visuele informatie te verzamelen die nodig is om de voor het deelnemen aan het verkeer noodzakelijke manoeuvres te kunnen uitvoeren. Deze manoeuvres kunnen worden ondergebracht in een hiërarchie van beslissingsprocessen (Schreuder, 1974; 1977). Het kan daarbij gaan om elementaire manoeuvres ("gewoon" doorrijden, binnen resp. buiten de rijstrook uitwijken, snelheid aanpassen, en tenslotte stoppen). Uit deze elementaire manoeuvres kunnen samengestelde manoeuvres worden samengesteld (bochten nemen, voorrangskruisingen passeren, inhalen enz). Anderzijds kunnen de elementaire manoeuvres in manoeuvredelen worden opgesplitst (snelheid handhaven, afstand tot voorligger handhaven, dwarspositie handhaven). Het beslissingsniveau waarop deze manoeuvres plaatsvinden, wordt aangeduid met de term manoeuvreniveau. Erboven en eronder liggen andere niveaus, die te maken hebben met resp. de keuze van de route enz, en met de bediening van het voertuig. Voor ons onderwerp is alleen het manoeuvreniveau van belang. Gedetailleerde besprekingen van deze hiërarchie van beslissingsprocessen en van de ermee samenhangende waarnemingsprocessen zijn gegeven door Schreuder (1975a).

Dit alles geldt voor manoeuvres die te maken hebben met objecten die in het verwachtingspatroon liggen. Wanneer een verkeersdeelnemer geconfronteerd wordt met onverwachte objecten, zijn veelal noodmanoeuvres nodig, die een aantal andere kenmerken kunnen vertonen dan de hier beschreven "gewone" manoeuvres. We komen terug op deze noodmanoeuvres in de volgende paragraaf.

3.1.5. De zichtruimte

De term "zichtruimte" wordt hier gebruikt 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. Soms wordt hiervoor de uit het Engels afkomstige term "preview" gebruikt. Dit kan tot misverstand aanleiding geven, omdat in de strikte, technische betekenis zoals die in de regeltheorie en de stuurkunde wordt gebruikt, de preview als de directe inputgrootte geldt bij een bepaald type van stuurstrategie. In het Nederlands kan dus de term "zichtruimte" worden gebruikt; in het Engels is er echter geen alternatief voor de term "preview" wanneer men het algemenere begrip wil hanteren. Dit is het geval bij de aparte notitie, waarin is aangegeven wat de zichtruimte moet zijn voor verschillende manoeuvres op verschillende wegtypen (Schreuder, 1990). 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.

Zoals we reeds in par. 1.2 hebben aangegeven, behoort tunnelverlichting tot de functionele verlichting gerekend. Zoals in par. 3.3.2 is uitgewerkt, is de functie van de verlichting: het mogelijk maken dat het verkeer op een vlotte en veilige manier kan worden afgewikkeld. Zelfs wordt gewoonlijk geëist dat doorstroming en veiligheid in de tunnel zelf op een hoger niveau liggen dan op de direct aansluitende wegen; dit wegens de moeilijke bereikbaarheid in de tunnel zelf in geval van calamiteiten. In Nederland wordt voorts gewoonlijk de eis gesteld dat de snelheid (vlotteheid) van het verkeer gelijk kan zijn aan die van de aangrenzende wegen om de genoemde redenen van verkeersafwikkeling; echter wordt in sommige landen (Duitsland bijvoorbeeld) geaccepteerd dat, op autosnelwegen, de snelheidslimiet in de tunnel lager ligt dan op de open weg.

De functies zijn gebaseerd op de uit de verkeerstaak af te leiden rijtaak. De rijtaak bestaat zoals aangegeven, uit het nemen van de juiste beslissingen op basis van de uit de omgeving afkomstige (vooral visuele) informatie, het vergelijken van deze externe informatie met de interne informatie (die in hoofdzaak uit het geheugen afkomstig is), en ten slotte uit het correct uitvoeren van deze beslissing. 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) zicht-ruimte.

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: men kan spreken van Taak I (zie Schreuder, 1985c). De veiligheid heeft twee deelaspecten: het vermijden van verwachte en het vermijden van onverwachte objecten die botsingsgevaar opleveren. Het eerste wordt, net als andere verwachte elementen, tot de Taak I gerekend; het onverwachte element van de tweede groep objecten maakt het noodzakelijk om een tweede taakaspect in te voeren: Taak II. Dit taakaspect heeft (per definitie zou men kunnen zeggen) het karakter van een noodtoestand: de maatregelen die genomen dienen te worden zijn noodmaatregelen, en de manoeuvres zijn noodmanoeuvres.

Er zijn twee belangrijke verschillen tussen "gewone" manoeuvres en "nood"-manoeuvres. 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 comfortaspecten; een remvertraging van meer dan 2,5 à 3 m/s² (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/s², 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. Zie ook Schreuder (1981).

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; bij de beschouwingen over de eisen die aan tunnelverlichting moeten worden gesteld (par. 2.2), is uitgegaan van een reactietijd van 3 seconden.

In Tabel 2 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). Deze minimaal noodzakelijke waarden van de zichtruimte zijn uit theoretische overwegingen afgeleid.

Uit Tabel 2 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

Uit Tabel 2 blijkt voorts dat het vooral de wegmarkeringen zijn die als visueel kritische elementen kunnen optreden, Dit geldt met name voor de manoeuvres "kiezen dwarspositie" en "kiezen snelheid". De vereiste zichtruimte is daarbij (voor 90 km/uur) 75 meter. Bij de manoeuvre "stoppen voor discontinuïteiten" 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 (zie par. 5.1.2) 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!

Wegmarkeringen zijn dus ook in tunnels van belang (zie par. 3.5). Naast wegmarkeringen en bermreflectoren spelen ook de lichtpunten van de tunnelverlichting zelf een belangrijke rol. We komen hierop terug in par. 3.6.3.

Ook verkeerstekens, waarschuwingstekens en -lichten en verkeerslichten kunnen een bijdrage leveren tot de preview. De bijdrage zal echter bij tunnelingangen vaak niet al te groot kunnen zijn:

- verkeerstekens brengen gecodeerde informatie over;
- verkeerslichten komen alleen bij uitzondering bij tunnels voor;
- verkeerslichten verhogen veelal het risico voor ongevallen, ook al zijn ze op papier als verkeersveiligheidsmaatregel bedoeld;

- waarschuwingslichten zijn a-specifiek; anderzijds zijn ze zeer opvallend, zodat ze alleen met mate dienen te worden gebruikt.

3.1.6. Verkeersrelevante objecten

In de Tabel 2 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; dit in tegenstelling tot de voorwerpen die gevaar (kunnen) opleveren. Deze gevaarlijke voorwerpen worden de risicodragende elementen genoemd. Ook hier moet weer onderscheid worden gemaakt tussen de twee taakaspecten (Taak I en Taak II; zie par. 3.1.5).

Voor Taak I gaat het om drie groepen van voorwerpen die als visueel kritische elementen kunnen optreden:

- voorwerpen behorende tot het wegmeubilair (lichtmasten, bermreflectoren, voorwaarschuwingstekens, verkeerstekens, waarschuwingslichten, verkeerslichten);
- voorwerpen behorende tot de weg zelf (wegmarkeringen);
- andere verkeersdeelnemers (met name 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. De CBS-statistieken kunnen een aanduiding geven over het relatieve voorkomen van allerlei objecten en voorwerpen bij ongevallen. In Tabel 3 is een selectie gegeven uit de gedetailleerde CBS-gegevens over 1988 (CBS, 1989).

Uit Tabel 3 blijkt dat ruim twee-derde van de ongevallen te maken hebben met botsingen tussen voertuigen die aan het verkeer deelnemen; het grootste deel daarvan betreft bewegende voertuigen. Ongeveer 10% betreft voet-

gangers, terwijl ruim 20% te maken heeft met stilstaande obstakels (bomen, lichtmasten) en met "eenzijdige" ongevallen (van de weg raken na slippen enz). Nauwelijks een half procent betreft de obstakels die in de verlichtingskunde als "standaardobject" zijn ingevoerd. Deze getallen gelden voor de letselongevallen en voor 1988; aangenomen mag worden dat voor alle ongevallen een vergelijkbare verdeling geldt. Als conclusie geldt:

- botsingen tussen voertuigen overheersen;
- botsingen met allerlei (vaste) obstakels komen vrij veel voor;
- ongevallen met voetgangers zijn verre van zeldzaam;
- ongevallen met "losse" voorwerpen kunnen worden verwaarloosd.

Dit geldt voor het gehele land; voor tunnels is de situatie geheel anders. Zo zijn botsingen tussen kruisende voertuigen in tunnels niet te verwachten, evenmin als botsingen met afslaand verkeer en eenzijdige ongevallen; bij Nederlandse tunnels zijn tegenliggers zeldzaam, terwijl ook obstakels als bomen, lichtmasten en dieren niet te verwachten zijn. Uit Tabel 3 blijven slechts enkele rubrieken over. Deze zijn weergegeven in Tabel 4; de getallen (aantallen) uit Tabel 3 zijn ongewijzigd overgenomen; die zullen als "relatieve ongevallenkans" worden gehanteerd. Alleen dan heeft het zin om ze te gebruiken om de relatieve frequenties te bepalen. Deze bepaling leidt ertoe dat men zou mogen verwachten dat ruim drie-kwart van de ongevallen te maken heeft met kop/staartbotsingen; bijna 20% met botsingen met vaste obstakels, en bijna 5% met "losse" obstakels. Dit laatste percentage is aanzienlijk groter dan de waarde die voor de open weg geldt (nauwelijks een half procent), maar ook hier blijkt dat verreweg het grootste risico te maken heeft met andere voertuigen - rijdend of stilstaand.

3.1.7. Visuele standaardobjecten voor tunnels

Verlichting is functioneel. Dat wil zeggen dat verlichting "iets" moet verlichten; de te verlichten objecten zijn de verkeerskundige standaardobjecten. Nu zijn deze standaardobjecten vaak niet precies te definiëren; daarom stelt men vaak de visuele standaardobjecten in de plaats. Wanneer men de eisen die aan de verlichting van tunnels moet worden gesteld wil bepalen, wordt ervan uitgegaan dat de verkeerskundige standaardobjecten zichtbaar zullen zijn (in alle relevante omstandigheden) wanneer de waarneembaarheid van de visuele standaardobjecten (onder die omstandigheden)

is gewaarborgd. De visuele standaardobjecten zijn uiteraard niet identiek met de verkeerskundige standaardobjecten, maar ze moeten er wel veel op lijken, met name wat betreft afmetingen, reflectie-eigenschappen, locatie en bewegingstoestand.

Wat dit betreft mag worden betwijfeld of de keuze van het traditionele "standaardobject" van 20 bij 20 cm op 100 meter afstand, en met een (diffuse) reflectie van 20%, een goede keuze is. 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 de Tabellen 2 en 4. 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 (1991b), vindt het traditionele standaardobject nog steeds opgang bij de beschouwingen over tegenstraalverlichting in tunnels (zie bijv. Blaser; 1990). We zullen verderop ingaan op de consequenties van deze constatering.

We hebben hierboven reeds een nieuwe "trend" in de openbare verlichting genoemd: de meestralende verlichting. Deze trend is vooral in de USA te zien; de nieuwste codes voor straatverlichting van de IES zijn erop gebaseerd (zie IES, 1988). De gedachte is op zichzelf goed te verdedigen; immers, op de open weg moet men rekening houden met de (meestralende) autoverlichting; deze ondersteunt een meestralende openbare verlichting, maar verstoort een symmetrische of een tegenstralende verlichting. Om echter de waarde van deze uitspraak voor de praktijk te kunnen ondersteunen, blijkt een heel speciaal soort "visueel object" te moeten worden ingevoerd. Het gaat om zeer kleine objecten (ca. 10 cm hoog), waarvan de waarneembaarheid moet worden gewaarborgd. Deze waarborg wordt vereist voor het gehele wegoppervlak, en de zgn. "small target visibility (STV)" wordt gedefinieerd als het percentage objecten dat vanuit een bepaald punt waarneembaar is. Dit is een variant op het oude begrip "revealing power" hetgeen door Waldram (1938) is ingevoerd en door Knudsen (De Boer & Knudsen, 1963) en Van Bommel (1978) verder is uitgewerkt. Volgens de opvatting van

velen is echter de relevantie van STV voor het wegverkeer gering of zelfs afwezig; het gaat om de waarneembaarheid van stationaire objecten vanuit een stationaire waarnemingspositie, terwijl de objecten zo klein zijn dat ze geen enkel gevaar voor het verkeer kunnen opleveren. De discussie over het voor en tegen van STV is echter even heftig (en even weinig zakelijk) als de discussie over tegenstraalverlichting. Een neerslag van deze discussie is te vinden in het verslag van de workshop die gedurende de laatste CIE-sessie is gehouden (CIE, 1991).

De STV is vooral beperkt tot openbare verlichting op de open weg. De reden dat we het hier vermelden is, dat ook voor tunnelverlichting de meestralende verlichting ("pro-beam") naar voren wordt gebracht (Ketvirtis, 1988, 1989). Het is van belang om kennis te nemen van de daarbij gebruikte argumenten, omdat deze een zekere overeenkomst hebben met de argumenten voor en tegen de tegenstraalverlichting. We komen in par. 5.2.5 terug op deze argumenten, maar we vermelden reeds hier onze conclusie: meestralende verlichting is voor Nederlandse tunnels niet geschikt.

Deze conclusie kan worden onderbouwd met een grote hoeveelheid ervaring die in de Velsertunnel is opgedaan: de oorspronkelijke verlichting was van een zuiver "meestralend" karakter. Dit leidde tot flikkereffecten en tot een gebrek aan visuele geleiding, terwijl de wegdekluminantie relatief laag bleef. Deze verlichting is dan ook reeds lang geleden aangepast (zie hiervoor bijv. NSvV, 1963; Schreuder, 1964, 1967a; Zijl, 1958).

3.2. De visuele waarneming van contrasten

3.2.1. Het contrast

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 bestaan 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. Ook objecten die in kleur afwijken van de achtergrond blijken alleen voldoende duidelijk waarneembaar (meestal: herkenbaar) te zijn

wanneer er naast dit kleurcontrast ook een niet te gering luminantiecontrast bestaat (Cornsweet, 1971; Graham (ed.), 1965; Gregory, 1970; Haber & Hershenson, 1973; Le Grand, 1956; Schober, 1960). De verdere bespreking zal in hoofdzaak beperkt blijven tot het luminantiecontrast; korthedshalve wordt onder "contrast" verstaan het luminantiecontrast, tenzij uitdrukkelijk anders aangegeven.

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, en kan lopen van $-∞$ tot $+1$. Een positieve waarde van C betekent dat het waar te nemen object donkerder is dan de achtergrond (L_3 kleiner dan L_2). Een negatieve waarde van C betekent derhalve dat het object lichter is dan de achtergrond. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt tussen "gewone", diffuus reflecterende objecten en zelf-lichtgevende of retroreflecterende objecten. Bij diffuus reflecterende objecten is L_3 weliswaar groter dan L_2 , maar niet zeer veel groter. Onder deze omstandigheden blijkt het "teken" van het contrast van ondergeschikt belang te zijn; voorwerpen die "een beetje" lichter zijn dan de achtergrond worden even gemakkelijk waargenomen als voorwerpen die "een beetje" donkerder zijn. Bij zelf-lichtgevende of retroreflecterende objecten is de situatie echter geheel anders; hierbij is L_3 vaak zeer veel groter dan L_2 . In dergelijke gevallen wordt de waarneembaarheid van de bedoelde objecten vrijwel uitsluitend door L_3 bepaald, en heeft L_2 nauwelijks enige invloed. Met deze factor dient men terdege rekening te houden bij de toepassing van retroreflectoren (bijvoorbeeld wegdekreflectoren) in tunnels. Momenteel worden retroreflectoren in Nederland niet of nauwelijks in tunnels toegepast. We zullen daarom het "teken" van het contrast buiten beschouwing laten.

De mate waarin een contrast kan worden waargenomen, wordt gewoonlijk uitgedrukt in de contrastgevoeligheid. Maatgevend daarvoor is het kleinste contrast dat onder bepaalde, wel-omschreven waarnemingscondities nog kan worden waargenomen. Dit kleinste contrast wordt de contrastdrempel (of drempelcontrast) genoemd. De relatie tussen het drempelcontrast en de

adaptatietoestand hoort tot de klassieke onderzoeken in de waarnemingsfysiologie: reeds König deed in 1881 baanbrekend werk. Vele onderzoekers hebben dit onderzoek herhaald, verfijnd en aangevuld. Het eindresultaat van al deze inspanningen is neergelegd in het CIE-standaardwerk op dit gebied (CIE, 1981). Globaal komt het erop neer dat de contrastdrempel steeds kleiner wordt bij toenemende adaptatie; met andere woorden: meer licht betekent betere waarneming.

Over de algemene geldigheid van deze regel bij extreem hoge adaptatietoestanden moeten enige kanttekeningen worden gemaakt. De onderzoeken waarop het CIE-werk is gebaseerd, zijn vrijwel zonder uitzondering beperkt maximaal 1000 à 2000 cd/m². Voor hogere waarden heeft men volstaan met extrapolaties. Metingen van Schreuder (1964) hebben echter aangetoond dat bij aanzienlijk hogere luminanties (tot 8000 à 10.000 cd/m²) het drempelcontrast weer toeneemt: bij zeer hoge helderheden kan men niet beter, maar slechter waarnemen. Dit is nader uitgewerkt in Schreuder (1981). Overigens zij opgemerkt dat uit metingen van het drempelcontrast in rijproeven in bestaande tunnels deze teruggang niet is gebleken (Schreuder, 1989, 1990a, 1991a). Kortom, het is niet geheel duidelijk wat er nu eigenlijk gebeurt bij zeer hoge luminanties. Toch is dit juist bij de verlichting van tunnelingangen van belang: in de zomer kan in de volle zon de luminantie van een wegdek (zeker van een wegdek met cementbeton) tot 10.000 cd/m² oplopen (Schreuder, 1964). Dit is overigens de reden waarom men in de "derde generatie" van de tunnelverlichting (Schreuder, 1979) ervoor gekozen heeft om het wegdek en de omgeving vlak bij de tunnelingang zo donker mogelijk te maken. Meestal blijft men op deze manier buiten de "gevaarzone" van luminanties boven ca. 3000 cd/m² (Schreuder, 1981).

3.2.2. De basisformule

Het grootste visuele probleem bij het door gemotoriseerd verkeer passeren van een lange verkeerstunnel is gelegen bij het overdag binnenrijden van de ingang. Wanneer de tunnelingang onvoldoende is verlicht, doet deze zich voor als een "zwart gat" waarin geen enkel detail te onderscheiden is (Schreuder, 1964; 1981). Het meest cruciale onderdeel van aanbevelingen en richtlijnen voor de verlichting van tunnels is dan ook steeds gelegen in de ingangsverlichting (NSvV, 1963, 1991; CIE, 1973, 1990). Dit is mede het gevolg van het feit dat de ingangsverlichting het duurste gedeelte van de verlichtingsinstallatie is.

De oorzaak van het "zwarte-gat effect" is gelegen in een aantal eigenschappen van het menselijke visuele systeem. Ten eerste is er een zekere - soms zeer aanzienlijke - tijd nodig voor de aanpassing van de gevoeligheid van het systeem aan een ander lichtniveau (de zgn. adaptatie). Ten tweede wordt de waarneming in een donker gedeelte van het gezichtsveld bemoeilijkt wanneer er rondom dat donkere gedeelte heldere partijen voorkomen. Deze heldere partijen fungeren als verblindingsbronnen, die een "lichtsluier" over het gehele gezichtsveld veroorzaken. De verblinding kan worden uitgedrukt in de helderheid (luminantie) van deze sluier.

Overdag overheerst in de situaties zoals die zich in Nederland voordoen, gewoonlijk het tweede effect: de adaptatie van het ene lichtniveau naar het andere speelt meestal een ondergeschikte rol. Anders is het bij schemer of duisternis; daarvoor zijn dan ook andere lichttechnische eisen te stellen aan de verlichtingsinstallatie. Ook is het anders wanneer de tunnelingang wordt omgeven door sneeuw die door de zon wordt beschenen. De door de NSvV en de CIE in concept opgestelde aanbevelingen gaan verder in op deze materie.

Zoals in par. 3.2.1 is aangegeven, wordt het contrast 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.

In de praktijk zal men zeer vaak vinden, dat de waarneming wordt gehinderd door allerlei versturende invloeden uit de omgeving. Zoals in de reeds genoemde studie van Schreuder & Oud (1988) is aangetoond, kan deze storing worden beschreven door een "stoorkluminantie" die we met L_d (naar het engelse woord disturbance) zullen aanduiden. We komen in par. 3.2.4 op deze stoorkluminantie terug; hier volstaan we met de opmerking dat deze stoorkluminantie zich als een "lichtsluier" kan voordoen die zich over (grote delen van) het gezichtsveld kan uitstrekken. Ten gevolge van een dergelijke sluier met luminantie L_d worden alle luminanties 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 is dan 0, is C' steeds kleiner dan C . Een voorwerp is onder bepaalde praktijkomstandigheden alleen zichtbaar wanneer C' groter is dan het kleinste contrast dat onder die omstandigheden kan worden waargenomen. Dit kleinste waarneembare contrast wordt de bij de praktijk behorende "drempelwaarde" van het contrast genoemd. Deze drempelwaarde is groter dan de "echte" drempelwaarde zoals die in een laboratorium wordt gemeten. De laboratoriumwaarde van deze drempel wordt met C'' aangegeven. C' is dus steeds groter dan C'' . Deze ongelijkheid heeft te maken met het verschil in waarnemingscondities in het laboratorium en in "het veld". De relatie tussen C' en C'' wordt meestal aangeduid met een "veldfactor" f : met stelt dat $C' = f * C''$. Het betreffende voorwerp is dus zichtbaar wanneer C' groter is dan fC'' ; dus $fC'' < C'$. Wanneer men dit invult in [3] vindt men

$$(L_2 - L_d) * fC'' < L_2 * C,$$

en dus

$$L_2 * fC'' - L_d * fC'' < L_2 * C.$$

Hieruit volgt (omdat C groter is dan fC''):

$$L_2 (C - fC'') < L_d * fC''.$$

En hieruit kan voor L_2 (de luminantie die in de drempelzone van de tunnel tenminste aanwezig moet zijn, waarbij de ongelijkheid door een gelijkteken wordt vervangen) worden afgeleid:

$$L_2 = \frac{L_d * fC''}{C - fC''} \quad [4]$$

Deze formule wordt wel de basisformule genoemd, omdat met behulp van deze formule de luminantie in de tunnelingang bepaald kan worden.

3.2.3. Het intrinsieke contrast

C is het intrinsieke contrast van het voorwerp waarvan men vindt dat het gezien moet kunnen worden; C is dus een arbitrair gekozen waarde. Meestal kiest men 0,2 of 0,3; dit correspondeert met gangbare obstakels als stenen, dozen of uitlaatpijpen. We hebben reeds aangegeven dan voor diffuus reflecterende voorwerpen, waarbij L_3 nooit sterk van L_2 afwijkt, het feit of het voorwerp donkerder of lichter is dan de achtergrond, verwaarloosd kan worden. Anders is het bij retroreflecterende wegmarkeringen die met een veel hogere C corresponderen (en dan met een minteken).

Wanneer men te maken heeft met oppervlakken die een diffuse reflectie vertonen, kan, zoals in par. 3.4 is aangegeven, met een enkele "reflectiefactor" worden volstaan. De luminantie is dan evenredig met de verlichtingssterkte; de evenredigheidsfactor is de bedoelde reflectiefactor. Wanneer het gaat om de waarneembaarheid van een contrast tussen twee onderdelen van een en hetzelfde object, grenzen deze delen uiteraard aan elkaar. Men mag dan aannemen dat de verlichtingssterkte op de twee aangrenzende delen gelijk is; de luminanties zijn dan evenredig met de respectievelijke reflectiefactoren. Het contrast tussen die twee onderdelen is dan als volgt te bepalen.

$$C = \frac{L_2 - L_3}{L_2} = \frac{p_2 E_2 - p_3 E_2}{p_2 E_2} = \frac{p_2 - p_3}{p_2}$$

waarin p_2 en p_3 de (diffuse) reflectiefactoren zijn van de respectievelijke delen van het object, en E_2 de verlichtingssterkte ter plaatse van het object. De reflectiefactoren p_2 en p_3 kunnen wanneer gewenst eenmalig worden gemeten.

3.2.4. De stoorkluminantie L_d

Hierboven is reeds gesproken van de "stoorkluminantie" L_d . Zoals in de eerder genoemde studie in detail is aangegeven, bestaat de "stoorkluminan-

tie" 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 :

$$L_d = L_{adef} + L_{seq} + L_{atm} + L_{ruit}$$

Hierin is:

L_{adef} : de component die te maken heeft met de veranderingen van helderheid en het achterblijven van de adaptatie (Schreuder, 1990, 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 sluierluminantie. Het gaat daarbij niet om een fysieke, maar om een equivalente luminantie 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.

3.2.5. De 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.

Uit de in par. 3.2.2 gegeven basisformule kan door herschrijven een betrekking voor de veldfactor worden afgeleid:

$$f = \frac{L_2 C}{C'' (L_d + L_2)} \quad [5]$$

In Schreuder (1989, 1990a, 1991a,b,c) is beschreven op welke wijze de veldfactor bepaald kan worden, en hoe deze bepaling in de praktijk is uitgevoerd. De resultaten van deze studies leiden tot de conclusie dat als afgeronde waarde voor de veldfactor geldt: $f = 6$

3.3. Verkeersaspecten

3.3.1. Het wegverkeer

Het huidige maatschappelijke bestel is zeer gecompliceerd. Vooral door het in ruimtelijke zin vaak ver uiteen liggen van plaatsen waar de productie en de consumptie plaatsvinden, is er een grote stroom van vervoer van goederen ontstaan. Voorts is er een grote stroom van diensten. Verreweg het grootste deel van dit verkeer speelt zich op de (openbare) weg af. Zowel wat betreft het aantal verkeersbewegingen, de hoeveelheid vervoerde artikelen, de massa ervan, en vooral wat betreft het aantal vervoerde personen, vertegenwoordigen andere verkeerswijzen (rail, water en lucht) slechts een geringe, en in vele opzichten verwaarloosbare, bijdrage tot het geheel (zie bijv. PAO, 1991).

3.3.2. De functionele aanpak voor verkeersvoorzieningen

Het verkeer heeft verkeersvoorzieningen nodig. De voor deze studie belangrijkste voorziening is de weg (inclusief de tunnels) met alle erbij behorende hulpmiddelen zoals o.a. de verlichting. Verder kan men de voertuigen, de verkeersregelininstallaties en de regels en voorschriften tot de verkeersvoorzieningen rekenen (Schreuder, 1970; 1974; 1975; 1991d, e).

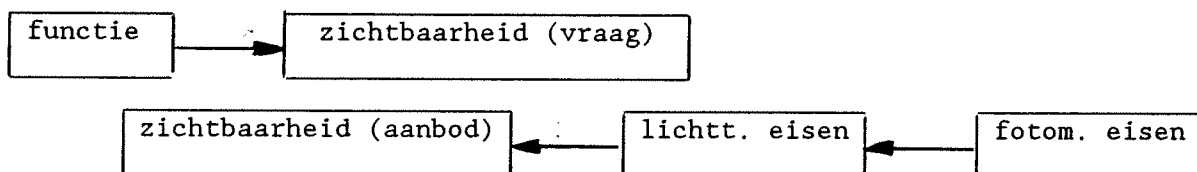
Op basis van de (moderne) functionele aanpak kan op een objectieve wijze worden vastgesteld aan welke eisen de bedoelde voorzieningen moeten voldoen om de genoemde functies te kunnen vervullen.

Verlichting in tunnels is steeds functioneel. Het gaat daarbij vooral om de verkeersafwikkeling (het gebruik van de tunnel die zonder verlichting geheel duister zou zijn) en om de verkeersveiligheid (verkeersongevallen

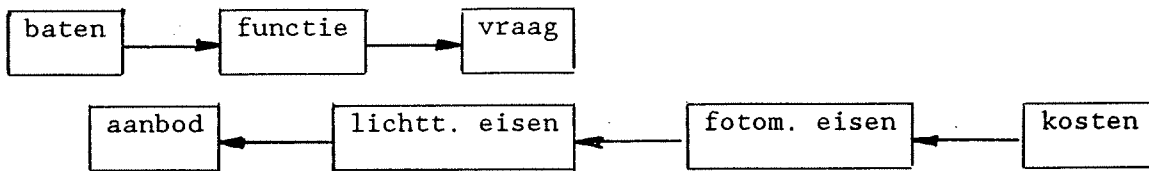
voorkomen). In tunnels die door fietsers en voetgangers worden gebruikt, zijn ook de burgerlijke veiligheid (misdaadpreventie en -bestrijding) en het gevoel van veiligheid van belang. Bij de eventuele toepassing van tegenstraalverlichting dient met deze factoren rekening te worden gehouden.

3.3.3. Vraag en aanbod

Op basis van deze functionele beschrijving kunnen de functionele vereisten waaraan de verlichting moet voldoen, worden gegeven. Deze functionele vereisten zijn de uitkomst van een (politiek) beslissingsproces, en zijn het resultaat van beleidsoverwegingen. Aan de hand van deze functionele vereisten kunnen zichtbaarheidseisen worden opgesteld, die te maken hebben met de waarneembaarheid van de objecten die moeten worden waargenomen. De zichtbaarheidseisen kunnen worden gesplitst in "vraag" en "aanbod": de functionele vereisten bepalen de "vraag" naar waarneembaarheid, terwijl de verlichtingsinstallatie het "aanbod" van de waarneembaarheid verschaft. Op basis van deze zichtbaarheidseisen kunnen de lichttechnische eisen worden opgesteld; deze hebben te maken met lichtniveau, verblinding, lichtkleur, gelijkmatigheid, in-en uitschakelen van de verlichting enz. De lichttechnische eisen kunnen tenslotte worden vertaald in fotometrische en geometrische eisen; deze hebben betrekking op de lichtverdeling van de te gebruiken lamp/armatuur-combinaties, met de opstellingswijze en ophanghoogte van de verlichtingsmiddelen, enz. Deze eisen kunnen in hun samenhang in een schema worden ondergebracht. Dit schema kan worden toegepast op verschillende functies van de verlichting. Hieronder is het afgebeeld, in dit geval toegespitst op de verkeersveiligheid.



Dit schema kan worden uitgebreid met de "baten" aan de kant van de functionele vereisten, en met de "kosten" aan de kant van de installatie. Het schema ziet er dan als volgt uit:



Op deze wijze kan het schema dienen als basis voor een kosten/baten-analyse (Schreuder, 1977; 1991e,f). Uiteraard kunnen de "kosten" en de "baten" ook voor andere functionele vereisten worden opgesteld.

Kosten/baten-analyses betreffende openbare verlichting kunnen in beginsel voor drie doelen worden gebruikt:

1. Het beoordelen van de algemene doelmatigheid van openbare verlichting als verkeersveiligheidsmaatregel.
2. Het bepalen van het lichtniveau (of de range van lichtniveaus) waar de openbare verlichting doelmatig is.
3. Het bepalen van het nut van openbare verlichting voor afzonderlijke wegvakken.

Voor wegverlichting beginnen kosten/baten-analyses ingang te vinden. (zie BGC, 1990; Buijn, 1991; Schreuder, 1991f, g. Het is aan te bevelen om ten behoeve van dezelfde drie doelen ook voor tunnelverlichting het gebruik van kosten/baten-analyses te bevorderen.

3.3.4. De luminantietechniek in de wegverlichting

In par. 3.1 hebben we aangegeven dat er een aantal objecten is dat voor waarneming in aanmerking komen. Op het manoeuvre niveau dient de waarneming voor het ontwaren van drie groepen van objecten:

- het verloop van de weg, met name van markeerstrepen enz;
- andere verkeersdeelnemers (resp. hun signaallichten);
- de (reeds genoemde) gevaarlijke obstakels.

Detectie van voorwerpen kan alleen plaats vinden wanneer het contrast voldoende groot is. Meestal gaat men ervan uit dat het daarbij gaat om het contrast tussen het object en de achtergrond, maar in vele gevallen gaat het om het contrast tussen delen van het object. We komen verderop nog op dit punt terug.

De "luminantietechniek in de straatverlichting" is gebaseerd op het uit-

gangspunt dat het gewoonlijk vrij gemakkelijk is om de luminantie van de achtergrond voldoende hoog te maken; voor de achtergrond wordt het wegdek gekozen (bij de "luminantietechniek in de tunnelverlichting" kan met daarvan maken: wegdek en tunnelwanden; dit heeft geen verdere consequenties voor de redenering). Men behoeft er vervolgens alleen maar voor te zorgen dat de objecten donker zijn (blijven) en een flink groot contrast is gewaarborgd. Dit "donker blijven" is voor de belangrijkste stationaire of vrijwel stationaire obstakels gewoonlijk het geval: stenen, dozen en ook voetgangers zijn meestal donker. Hieruit volgt vanzelf de grondidee van de tegenstraalverlichting: richt licht tegen de rijrichting (kijkrichting); het wegdek wordt helder en de obstakels blijven donker.

De luminantietechniek is beschreven door Schreuder (1964a). De ideeën zijn afkomstig uit het oude werk over de "revealing power" van Waldram (1938) en Moon (1961; zie ook Moon & Cettei, 1938); het is nader uitgewerkt door Knudsen (1967, 1968; zie ook Vermeulen & Knudsen, 1968); Van Bommel (1978); Vermeulen (1966) en Westermann (1975a), en het wordt recentelijk als basis genomen voor de recente Aanbevelingen voor Straatverlichting van Noord Amerika. Over de fundamenteën van deze aanbevelingen is op twee conferenties in Augustus 1988, in Minneapolis, in detail gediscussieerd: IES (1988) en TRB (1988). Belangrijke bijdragen zijn daar geleverd door Adrian (1988); Freedman (1988); Keck (1988); Janoff (1988) en Rea (1988).

Ofschoon er veel aandacht is besteed aan de luminantietechniek, en de daaruit volgende "revealing power" is besteed, en het gevolg erg logisch lijkt, is het verhaal incompleet. Ten eerste zijn de belangrijkste gevarenbronnen op wegen met uitsluitend of in hoofdzaak een verkeersfunctie, niet stenen en dozen, en meestal ook niet de voetgangers, maar andere (motor)voertuigen. Ten tweede is het belangrijkste onderdeel van de rijtaak niet het ontwijken van deze obstakels, maar het volgen van de weg. Ten derde gaat het bij de waarneming van voertuigen nauwelijks om het contrast tussen voorwerp en wegdek of achtergrond, maar om het contrast tussen delen van het object (glimmende delen, enz). Nog sterker: dit idee wordt opzettelijk uitgewerkt bij de gedachte dat het vooral om de waarneembaarheid van signaallichten gaat: voorwerpen die zo zijn aangebracht dat het contrast tussen delen van het object (het signaallicht en de rest van de auto) zo groot mogelijk is. Iets dergelijks geldt voor wegmarkeringen. En ten vierde heeft men bij voorzieningen die door fietsers

en/of voetgangers worden gebruikt, te maken met eisen van burgerlijke veiligheid en van gevoelens van veiligheid. Daarbij speelt vooral de herkenbaarheid van (het gezicht van) andere weggebruikers een rol. Deze aspecten worden in het geheel niet door de luminantietechniek gedekt.

3.4. Reflectie van wegdekken en wegmarkeringen

3.4.1. Reflectie en retroreflectie

De luminantie van een (zelf niet-lichtgevend, verlicht) voorwerp is evenredig met de verlichtingssterkte die door het opvallende licht teweeg wordt gebracht, en met de reflectiefactor. Deze reflectiefactor hangt af van de oppervlaktegesteldheid van het voorwerp, en van de wijze van verlichten. Het voorwerp kan drie soorten reflectie vertonen (en mengvormen ervan):

1. Diffuse reflectie. Het licht wordt ongeacht de wijze van instraling, naar alle richtingen even streek weerkaatst (verstrooid). Dit is het geval bij alle oppervlakken die een korrelstructuur hebben, en waarvan de korrels "random" zijn georiënteerd. Voorbeelden zijn: talkpoeder, sneeuw, enz.;
2. Spiegelende (of reguliere) reflectie. Het licht volgt de zgn. spiegelwetten van Snellius: de hoek tussen de invallende lichtstralen en de verticaal (normaal) op het oppervlak is gelijk aan de hoek tussen de weerkaatste lichtstralen en deze normaal. Voorbeelden: metalen oppervlakken zoals spiegels, niet-kristallijne stoffen zoals glas en water, enz.;
3. Retroreflectie. Zoals reeds in par. 3.2 kort is aangeduid, wordt het licht teruggekaatst in de richting waar het vandaan kwam. Daartoe zijn die materialen of die voorwerpen voorzien van optische systemen (retroreflectoren) die de omkeer van de stralengang door reflectie bewerken.

3.4.2. Reflectie van wegdekken

Alleen in geval van diffuse reflectie is er sprake van een enkele reflectiefactor, die dan ook een scalaire grootte 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, de zgn. reflectie-indicatrix. Zie bijvoorbeeld Schreuder (1967) en SCW (1974).

Een gedetailleerde studie van enige honderden wegdekken heeft tot het inzicht geleid dat wegdekken wat betreft hun reflectie-eigenschappen in een klein aantal klassen kunnen worden ingedeeld aan de hand van een klein aantal karakteristieke reflectiewaarden. Op basis van het werk van Westermann (1963, 1964, 1967) is een klasse-indeling (de zgn. q_0 -kappa-classificatie) in vier klassen (R1 t/m R4) voorgesteld; door Sorensen (1975) uitgebreid voor natte wegen (Zie CIE, 1976). Onderzoek in Nederland heeft aangetoond dat een betere en nauwkeurigere classificatie mogelijk is aan de hand van drie karakteristieken. Deze indeling heeft slechts twee klassen (C1 en C2) plus een schaalfactor (q_p genaamd). Dit systeem is beschreven in SCW (1974). Deze classificering is door de CIE en de PIARC als alternatief geaccepteerd (CIE, 1984b). Zie ook Burghout (1977, 1977a).

In sommige speciale gevallen zijn verdere vereenvoudigingen aan te brengen. Zo is overdag de lichtinval bij benadering alzijdig; bovendien vertonen droge wegmarkeringmaterialen (net als droge wegdekken) een reflectie die niet al te veel van de diffuse reflectie afwijkt, zodat de reflectie overdag van droge wegmarkeringen meestal op voldoende nauwkeurige wijze met een enkel getal (een scalar dus) kan worden beschreven. Wanneer de oppervlakken nat zijn, is deze benadering niet meer geoorloofd. Ook bij straatverlichting moet met de verschillende hoeken rekening worden gehouden. Het sterkste is dit het geval bij de waarneming van retroreflecterende materialen wanneer ze verlicht worden door de koplamp(en) van het voertuig van de waarnemer; de reflectie kan gemakkelijk het honderd-voudige bedragen van de diffuse reflectie van hetzelfde materiaal (CIE, 1987, 1988; Dutruit, 1974; Schreuder, 1985).

Van belang is het feit dat in vrijwel alle gevallen de reflectie van wegdekken zodanig is dat het meeste licht in dezelfde richting als de instraling wordt gereflecteerd: wegdekken zijn vrijwel steeds in meer of mindere mate spiegelend van karakter. Dit was de basis voor het q_0 /kappa-systeem

dat door Westermann (1963; 1964) is ingevoerd: kappa gaf de spiegeling aan, en qo de totale reflectie (Zie ook CIE, 1976, 1984a; Schreuder, 1967). De grondgedachte is, zij het minder duidelijk zichtbaar, nog steeds aanwezig, ook bij het C1-C2-systeem. Dit geldt al voor droge wegen; voor vochtige en natte wegen is deze spiegeling nog veel sterker. Omdat de natte toestand van wegen zeer moeilijk is te definiëren, wordt vooral met droge wegdekken rekening gehouden.

Het spiegelende karakter van wegdekken leidt ertoe dat licht dat tegen de waarnemingsrichting in het wegdek treft, sterker wordt gereflecteerd dan licht dat met de waarnemingsrichting mee het wegdek treft. Men noemt de luminantie die het gevolg is van het invallende licht wel de "luminance yield" (Schreuder, 1967; Knudsen, 1967, 1968). Wegdekken vertonen een zodanige reflectie dat de luminance yield voor tegenstralend licht vrijwel altijd groter, en gewoonlijk veel groter, is dan voor meestralend licht. Dit punt is van beslissend belang bij het beoordelen van de voor- en nadelen van tegenstralende verlichting in tunnels.

Er is in het verleden veel onderzoek uitgevoerd op dit gebied. In Schreuder (1981) is een overzicht van dit onderzoek gegeven, vooral voor zover het was toegespitst op de voor- en nadelen van tegenstraalverlichting. De belangrijkste publikaties zijn van Anon (1973a); Burghout (1971, 1977, 1977a); CIE (1976); De Boer et al. (1959); Frederiksen (1972); Frederiksen & Gudum (1972); Keschull (1968); OECD (1976); Schreuder (1965, 1967); SCW (1974); Sørensen & Nielsen (1974) en Tooke & Hurst (1975).

3.4.3. Waarnemingscondities

Iedere wijze van deelname aan het verkeer heeft zijn eigen problemen. Voor verkeerstunnels zijn het echter vooral de motorvoertuigen, meer in het bijzonder de personenauto's die van belang zijn, of liever gezegd, de bestuurders van deze auto's. Moderne personenauto's zijn zodanig geconstrueerd dat de bestuurder vrij laag zit; de ooghoogte van bestuurders boven de grond bedraagt vaak niet veel meer dan een meter. Er bestaat een duidelijke trend voor steeds lagere auto's. De drijfveer hiertoe is het vage, maar machtige begrip "styling": om deze trend een schijn van redelijkheid te geven, wordt gewezen op het feit dat lagere auto's minder luchtweerstand hebben. Hieruit wordt - rijkelijk voorbarig - de conclusie

getrokken dat ze ook onder praktijkomstandigheden minder brandstof gebruiken. Elders is gewezen op de gevaarlijke aspecten van deze trend (Schreuder & Lindeijer, 1987). De trend bestaat echter; momenteel kan 1,20 meter als een goed gemiddelde voor de ooghoogte boven de weg van bestuurders van personenauto's worden genomen. Voor bestelauto's en zeker voor vrachtauto's is de ooghoogte gewoonlijk beduidend hoger; we zullen ons speciaal richten op het ongunstigste geval, en 1,20 als normwaarde voor de ooghoogte gebruiken.

In par. 3.1.5 hebben we aangegeven dat de preview zelfs bij eenvoudige manoeuvres vele tientallen meters bedraagt, soms zelfs enige honderden meters. Bij een ooghoogte van 1,20 meter en een preview van enige tientallen meters worden alle horizontale vlakken, zoals het wegdek en de erop aangebrachte wegmarkeringen, onder een zeer strijkende hoek worden waargenomen. Deze hoek bedraagt aanzienlijk minder dan 1 graad. In het verleden is echter als nominale waarde voor deze hoek de waarde van 1 graad gekozen; deze waarde is voor metingen en berekeningen van luminanties en reflectie-eigenschappen van wegdekken door de CIE vastgesteld (CIE, 1976, 1984b). Voor zover het om droge wegdekken gaat, is deze hoek niet zeer kritisch; onderzoek heeft uitgewezen dat een afwijking van ca. 10' geen grote afwijkingen oplevert (Schreuder, 1967). Voor natte oppervlakken is de invloed waarschijnlijk aanzienlijk groter; meetgegevens bestaan echter niet.

Bij een waarnemingshoek van 89 graden (1 graad met de horizontaal) vertonen vrijwel alle oppervlakken een sterke spiegeling, ook die oppervlakken die onder steilere waarneming diffuus lijken te reflecteren. Daarom is het, zoals in par. 3.4.2 is aangegeven, nodig om voor de beschrijving van de reflectie-eigenschappen van wegdekken en wegmarkeringen rekening te houden met alle betreffende hoeken.

De verticale oppervlakken van voorwerpen op of bij de weg worden onder deze omstandigheden echter waargenomen onder een richting die vrijwel samenvalt met de normaal op dat oppervlak. De reflectie van dergelijke oppervlakken kan als diffuus worden beschouwd, en met een enkele "reflectiefactor" worden beschreven. Uitzonderingen zijn glimmende oppervlakken (glasruiten, chroom-bumpers, gladde lak), tenminste voor zover ze worden beschenen door kleine (als puntvormig te beschouwen) lichtbronnen, en mits

de lichtbronnen via de spiegeling aan het glimmende oppervlak te zien is. Bij vrijwel alle beschouwingen over tegenstraalverlichting in tunnels wordt uitgegaan van de (waarneembaarheid van) kleine, verticale, diffuus reflecterende, stationaire obstakels. Voor dergelijke obstakels kan de situatie beschreven worden in termen van de verticale verlichtingssterkte. Voor glimmende oppervlakken gaat deze benadering echter in het geheel niet op; de gangbare beschouwingen over tegenstraalverlichting verliezen dus veel van hun betekenis wanneer de waarneembaarheid van glimmende voorwerpen aan de orde komt.

3.4.4. Reflectie-eigenschappen van wegmarkeringen

Zoals in het voorafgaande reeds in het kort is aangegeven, levert de waarneembaarheid van wegmarkeringen op de "open weg" vooral bij duisternis problemen op te leveren op wegen zonder openbare verlichting, en dan speciaal bij nat wegdek (al dan niet bij regen). De markeringen worden onder die omstandigheden uitsluitend verlicht door autokoplantaarns - een extreme vorm van "meestralende" verlichting. Om bij die verlichtingswijze de waarneembaarheid te waarborgen, worden retro-reflecterende elementen (glasparels, hoekspiegels, "katte-ogen") in de wegmarkering verwerkt.

In par. 3.4.1 is in het kort de reflectie van het licht besproken. De luminantie van een (zelf niet-lichtgevend, verlicht) voorwerp is evenredig met de verlichtingssterkte die door het opvallende licht teweeg wordt gebracht, en met de reflectiefactor. Deze reflectiefactor hangt af van de oppervlaktegesteldheid van het voorwerp, en van de wijze van verlichten. Zoals reeds is vermeld, bestaan er drie soorten reflectie (en mengvormen ervan), te weten de diffuse reflectie, de spiegelende reflectie, en de retroreflectie. De laatste is voor wegmarkeringen van speciale betekenis.

Retroreflectie kan op drie verschillende wijzen worden bereikt.

- Het licht kan (steeds drie maal) aan drie onderling loodrecht staande spiegels worden weerkaatst. Ongeacht de positie van de spiegels ten opzichte van de invallende lichtbundel, wordt het licht teruggekaatst in de richting waar het vandaan kwam. Er is dus sprake van "echte" retroreflectie. De betreffende elementen worden hoekspiegels of ook wel prisma-reflectoren genoemd (in het Engels: corner cubes). Dit type retroreflectoren wordt op grote schaal toegepast op voertuigen (achterreflectoren

voor auto's en fietsen), gevarendriehoeken en dergelijke, en ook op bermreflectoren en vele typen wegdekreflectoren. Ook de nieuwere soorten foliemateriaal ("diamond grade" [R]) horen ertoe.

- Het licht wordt door een (bolvormige) lens gebundeld, en aan een eveneens bolvormige, concentrisch met de lens geplaatste, spiegel in het brandvlak van de lens weerkaatst. Ook hierbij is het weerkaatste licht evenwijdig aan het invallende licht, doch tegengesteld gericht. Aangezien het om een concentrisch optisch systeem gaat, is de reflectie onafhankelijk van de oriëntatie van de lens en de spiegel. Ook hier is dus sprake van "echte" retroreflectie. Om begrijpelijke redenen spreekt men van lensreflectoren. Afzonderlijke lenzen, in tweetallen naast elkaar gemonteerd, worden kattenogen genoemd (in het Engels: cat's eyes). Deze vorm van retroreflectie wordt voor de meeste typen van wegdekreflectoren gebruikt, en ook voor bermreflectoren. Voorts zijn vrijwel alle gebruikelijke foliematerialen van de klassen I en II (engineering grade en high-intensity) feitelijk lensreflectoren, zij het dat de lenzen zeer klein zijn, en dicht opeen zijn gepakt in de folie.

- Het licht wordt door een bolvormige lens gebundeld, en aan de achterzijde door een diffuus (meestal wit) oppervlak verstrooid. Dit oppervlak kan, maar hoeft niet, in het brandpunt van de lens te liggen. De heldere lichtvlek die op het witte oppervlak ontstaat, fungeert als secundaire lichtbron, die door de lens opnieuw wordt gebundeld en wordt uitgestraald in een richting die de richting van het invallende licht nabij komt, maar er niet precies mee hoeft samen te vallen. Hier is dus geen sprake van "echte" retroreflectie, maar eerder van diffuse reflectie met collimatie. Deze inrichting wordt in sommige verouderde typen van foliematerialen gebruikt, en het is de standaard wijze waarop (horizontale) wegmarkeringen zijn uitgevoerd. Daarbij zijn de lenzen (meestal glasparels genoemd) zodanig op de drager (verf of thermoplast) aangebracht dat ze er gedeeltelijk (bijna voor de helft) bovenuit steken.

3.5. Wegmarkeringen in tunnels

3.5.1. Waarneembaarheid van wegmarkeringen

In de meeste landen bestaan traditionele wegmarkeringen uit verfstrepen. In Nederland komen deze ook nog vrij veel voor, met name binnen de bebouwde kom en op tertiaire wegen, maar op hoofdwegen worden in Nederland in

hoofdzaak thermoplasten toegepast. Verfstrepen zijn goedkoop en gemakkelijk aan te brengen, maar ze hebben slechts een zeer beperkte "levensduur" (ten hoogste een jaar). Op een droge weg zijn ze - mits niet te veel afgesleten - uitstekend zichtbaar zowel bij dag als bij duisternis bij openbare verlichting. Mits voorzien van retroreflecterende middelen (glasparels) zijn ze ook bij autoverlichting goed te zien. Bij een nat wegoppervlak zijn ze echter vrijwel onzichtbaar. Niet alleen strekt de waterlaag zich, door de geringe dikte van de verflaag (0,1 mm of minder), gelijkelijk uit over de weg en over de markering; bovendien volgt de verflaag de (macro-)textuur van het wegdek, zodat de "textuur" van de bovenkant van de waterlaag voor de weg en voor de markering dezelfde is. De visuele aspecten van een natte verfstreep en van een nat wegoppervlak zijn dus precies gelijk; de streep is onzichtbaar.

Thermoplasten zijn duurder en minder eenvoudig aan te brengen dan verfstrepen, maar hun "levensduur" is aanzienlijk langer; vaak benadert de levensduur die van het wegoppervlak zelf. In droge toestand zijn ze even goed zichtbaar als verfstrepen. Ze zijn iets dikker; de dikte is meestal drie mm of iets minder - in afhankelijkheid van de slijtage. In natte toestand kan de waterlaag kan zich dus eveneens heel gemakkelijk vrijwel zonder onderbreking over de weg en over de markering uitstrekken. Bij de - infrequent toegepaste - voorgevormde platen kan (tenminste in nieuwe toestand) de textuur afwijken van die van de weg, waardoor een (zij het meestal gering) verschil in reflectiekenmerken, en dus in de visuele aspecten, tussen weg en markering ontstaat. Bij de veel meer toegepaste "gewone" (warm aangebrachte) thermoplasten is het verschil in textuur tussen de markering en de gangbare (grof-dichte) wegdekken gering, zodat ook de waterlaag vrijwel dezelfde "textuur" heeft. Thermoplasten zijn in natte toestand meestal alleen te zien ten gevolge van het waterlaagje (plasje) dat zich "stroomopwaarts" van de markering op de weg vormt. Dit kleine plasje verhoogt de zichtbaarheid, maar het kan gevaarlijk zijn wegens aquaplaning. Daarom worden zelfs thermoplasten gewoonlijk zodanig uitgerust met dwarsgootjes dat dwarsdrainage plaats kan vinden.

Deze factoren komen overdag aan de orde. Bij duisternis dient daar nog aan te worden toegevoegd dat horizontale, als retroreflector uitgevoerde, materialen in natte toestand hun retroreflecterend vermogen vrijwel geheel verliezen (De retroreflectie is hierboven in par. 3.4.1 besproken). De

reden is dat de op het oppervlak aanwezige waterlaag verhindert dat het opvallende licht de optische elementen (meestal glasparels) kan binnendringen; de retroreflecterende werking kan dus ook niet optreden. Er bestaat maar één remedie: zorgen dat het retroreflecterende oppervlak boven de waterlaag blijft uitsteken. Dit verklaart het nut van de geprofileerde wegmarkeringen en van de wegdekreflectoren, die in par. 3.5.2 worden besproken.

Er is veel onderzoek gedaan naar de eisen die aan de waarneembaarheid van wegmarkeringen moeten worden gesteld. Dit onderzoek is samengevat in C.R.O.W. (1987); Schreuder (1978; 1985b); Schreuder & Schoon (1991) en SCW (1982). Overdag zijn de eisen niet kritisch, en evenmin op wegen die van een openbare verlichting zijn voorzien. Voor wegen zonder openbare verlichting heeft de CIE, op basis van het onderzoek, dat in een nauwe onderlinge samenwerking in Frankrijk en in Duitsland is uitgevoerd, aanbevolen dat de retroreflectiewaarde tenminste 50 mcd/m².lux moet bedragen.

In par. 2.2 hebben we reeds aangegeven dat vooral ook in tunnels de waarneembaarheid van wegmarkeringen speciale aandacht verdient. De reden is dat wegmarkeringen een belangrijk hulpmiddel zijn bij het aanduiden van het wegverloop op korte en middellange afstand. Uit onderzoek van Riemersma (1988b, 1989) is gebleken dat aan de ene kant vele ongevallen rechtstreeks in verband kunnen worden gebracht met het verliezen van de koers, maar ook dat wegmarkeringen een belangrijke bijdrage kunnen leveren tot het handhaven van de koers. Maar om te kunnen "werken" is het uiteraard nodig dat de wegmarkeringen kunnen worden waargenomen. Deze waarneembaarheid is in hoofdzaak van visuele aard, maar ook andere wijzen van waarnemen (akoestisch; kinestetisch) kunnen van belang zijn (Schreuder & Schoon, 1991). De grondbeginselen van de visuele waarneming van wegmarkeringen zijn beschreven door Schreuder (1986).

Zoals uit de oudere overzichten (Schreuder, 1978, 1985) blijkt, is ook in het verleden wel aandacht besteed aan de waarneembaarheid van markeringen. Wellicht ten gevolge van het toegenomen inzicht omtrent waarneming in het algemeen (zie par. 3.1.1) is deze aandacht recentelijk sterk toegenomen. Daarbij wordt meer in het bijzonder aandacht besteed aan de waarneembaarheid van wegmarkeringen op natte wegen. Een rol speelt ook het feit dat sinds enige jaren meetapparaten ter beschikking staan waarmee de reflectiefactor van wegmarkeringen en van wegdekreflectoren, ook in natte toestand, kan worden gemeten (zie Schreuder & Schoon, 1991).

Theoretische studies zijn schaars. Te noemen zijn Meseberg (1990) en Schreuder (1985; 1988b). Ook in CIE (1990a) zijn enige theoretische overwegingen opgenomen; deze zijn echter voor het grootste gedeelte afkomstig uit Schreuder (1988b).

Dit alles geldt voor de "open" weg. In tunnels kan de rol van wegmarkeringen nog groter zijn, omdat zowel bij het binnenrijden als bij het binnen zijn, de visuele situatie vaak slechter is dan die bij een open weg bij duisternis. Bij het binnengaan heeft men te maken met het zwarte-gat-effect, waarbij iedere ondersteuning van de geleiding van nut kan zijn; bij het rijden in het interieur van een lange tunnel, waar de visuele geleiding meestal slecht is door de zwakke belijning in het gezichtsveld, is het evenzeer van belang de geleiding zo veel mogelijk te ondersteunen.

Deze overwegingen hebben een rol gespeeld bij de toepassing van de vooral in Oostenrijk veel gebruikte "overmaatse wegdekreflectoren" in tunnels; bij de ingang zijn deze vaak ondersteund door bermplanken die van retro-reflecterende folie zijn voorzien. Daarmee is een oud idee van Waldram (1962) opnieuw tot uitvoering gebracht. Zie ook Anon (1987).

3.5.2. Geprofileerde wegmarkeringen

Er is wel een grote hoeveelheid nieuw onderzoek te rapporteren van meer praktische aard. Overzichten zijn gegeven in Schreuder (1978, 1980a, 1985, 1985b, 1986) en in Schreuder & Schoon (1991). Naast het "klassieke" vergelijkende onderzoek van Tooke & Hurst (1975) zijn soortgelijke studies uitgevoerd in Nederland (SCW, 1982; CROW, 1987), Frankrijk (Krause, 1984), Denemarken (Anon, 1990a) en Duitsland (Paulmann & Neis, 1985). In al deze gevallen is duidelijk naar voren gekomen dat geprofileerde markeringen (wegdekreflectoren daarbij inbegrepen) op natte wegen, en vooral bij regen, zeer aanzienlijke voordelen hebben boven traditionele (vlakke) wegmarkeringen. Het onderzoek dat aan deze rapporten ten grondslag ligt, is over het algemeen apart gepubliceerd. Voor het Nederlandse onderzoek wordt gewezen op Blaauw (1983), en Blaauw & Padmos (1981); voor het Franse onderzoek op Krause (1979), voor het Deense onderzoek op Anon (1987a, 1989, 1989a), en voor het Duitse onderzoek op Neis (1985, 1988, 1990). Zie ook Oldenburger (1990) en Whiteley (1990). Een interessante studie betreffende de onderlinge vergelijking van een aantal typen van wegdek-

reflectoren voor tijdelijke markeringen (o.a. voor wegwerkzaamheden) is gegeven door Davis (1989).

Tenslotte kunnen nog enige metingen vermeld worden waarbij de reflectie in droge en in natte toestand is vergeleken. Volgens Kop (1990) is de reflectie in natte toestand de helft van die in droge toestand. De verhouding in zichtbaarheid (overigens niet precies gedefinieerd) van "gewone" geprofileerde wegmarkeringen tussen natte en droge toestand is volgens Lundkvist (1990) tussen 1:4 en 1:1,5. Voor traditionele thermoplast bedraagt de verhouding 1:20. Zie ook Meseberg (1986, 1990a).

Als conclusie kan uit deze onderzoeken worden getrokken dat geprofileerde markeringen bij natte weg, en vooral bij regen, sterk de voorkeur verdienen ter verhoging van de zichtbaarheid van de markering, en daarmee ook van de wegrand.

3.5.3. Het nut van wegmarkeringen in tunnels

Ofschoon het meeste onderzoek is uitgevoerd voor "open" wegen, en niet voor tunnels, lijken de conclusies toch ook voor tunnels van belang te zijn, met name omdat bij regen het wegdek in tunnelingangen haast even nat wordt als het wegdek op de open weg. We bevelen dan ook aan om in tunnelingangen, speciaal in bochten, geprofileerde wegmarkeringen aan te brengen.

De waarneembaarheid van wegmarkeringen in tunnels, zeker wanneer ze van retroreflecterend materialen zijn voorzien, is zeer gediend met een "meestralende" verlichting. Een dergelijke meestralende verlichting is echter steeds voorhanden: bij de ingang is het meestralende licht afkomstig van het daglicht dat bij de ingang de tunnel binnen valt; in het interieur wordt een belangrijke hoeveelheid licht door de autokoplantaarns geleverd, en dit is al evenzeer meestralend licht.

Wanneer men de metingen van de contrasten bij proefnemingen in tunnels beschouwt (zie daarvoor par. 5.2), dan blijkt ook bij de ingang de tegenstraalverlichting voordelen, en soms aanzienlijke voordelen, op te leveren. Dit lijkt in tegenspraak met de uitspraak dat wegmarkeringen ten zeerste met meestralende verlichting zijn gediend. Deze tegenspraak is echter slechts schijn. Het gaat om de reflectiefactor van de voorwerpen.

Bij de proefnemingen bij tegenstraalverlichting is, zoals reeds enige malen is aangegeven, vrijwel steeds gebruik gemaakt van diffuus reflecterende objecten, terwijl wegmarkeringen in het overgrote deel van de gevallen retroreflecterend zijn. In het tweede geval is de reflectiefactor (wanneer men deze term voor retroreflectoren mag gebruiken) zeer veel hoger. Daarom kan het heel goed gebeuren dat bij een en dezelfde verlichtingsinstallatie waarbij zowel tegenstraallicht, afkomstig van de tunnelverlichting, en meestralend licht, afkomstig van het daglicht en van de autokoplantaarns, tegelijk aanwezig zijn, een diffuus reflecterend obstakel een groot negatief contrast vertoont, maar retroreflectoren een groot positief contrast.

3.5.4. Drainerende wegdekken

In Nederland zijn in de laatste jaren drainerende wegdekken, vooral op autosnelwegen, veelvuldig toegepast. Ten onrechte worden ze met ZOAB, zeer open asfalt beton aangeduid; het gaat niet om de holle ruimten, maar om het drainerende vermogen; bovendien worden ook proeven genomen om drainerende wegdekken in cementbeton uit te voeren. Het belangrijke voordeel wat betreft de verkeersveiligheid is daarbij minder van belang geacht dan een zekere, niet onaanzienlijke, reductie in de geluidproduktie (Anon, 1988a; PIARC, 1991; Schreuder, 1988, 1991h; SCW, 1977).

De voor- en nadelen van ZOAB zijn elders in detail beschreven. Van belang zijn vooral de studies van de SCW (1977), van de TRB (1990) en van de PIARC (1991), waar vergelijkingen zijn gemaakt tussen drainerende wegdekken en traditionele wegdekken. De belangrijkste voordelen zijn:

- betere stroefheid;
- minder kans op aquaplaning;
- minder geluidproduktie;
- minder spat en sproei (door auto's opgeslingerd water);
- minder verschil in reflectie tussen droge en natte toestand;
- sterker diffuus aandeel van de lichtreflectie (kleine P₂;0).

De belangrijkste nadelen zijn:

- gevoeliger voor afwijkingen in de aanleg;
- kortere (effectieve) levensduur;
- soms problemen met wegmarkeringen en gladheidsbestrijding;
- problemen bij reparaties;

- vooral donkere steenslag komt in aanmerking;
- vooralsnog hogere aanlegkosten.

Zie ook Anon (1988d) en Van Toorenburg et al. (1987).

Door de donkere kleur en de diffuse reflectie - lage $P(2;0)$ en lage q_p - is de "luminance yield" vrij laag. Daar staat tegenover dat het verschil in luminantie en luminantiepatroon tussen natte en droge toestand veel minder is dan bij traditionele (grof-dichte) wegdekken. Kort samengevat kan men stellen dat een nat drainerend wegdek er uit ziet als een vochtig traditioneel wegdek (Anon, 1988b; Padmos & Varkevisser, 1977; Schreuder, 1991h; Tromp, 1984).

Het verschil in constructie tussen drainerende wegdekken en traditionele wegdekken is voornamelijk gelegen in de toepassing van vrij grove steenslag (12 - 18 mm, in plaats van 4 - 12 mm) en in het feit dat de meeste vulstof weggelaten wordt (SCW, 1977; PIARC, 1991). Daarmee ontstaan niet alleen de gewenste grote holle ruimten (die debet zijn aan de naam ZOAB) maar ook de verbindingskanaaltjes (die vereist zijn om de drainage te waarborgen). Deze constructie stelt zwaardere eisen aan de hechting van de bitumen (die als bindmiddel fungeert) aan de korrels. Deze hechting is niet voor alle materialen gelijk. Bovendien raken de korrels elkaar veelal op slechts enkele punten; dat levert speciale eisen aan de steenslag wat betreft de weerstand tegen verbrijzelen. Tot nu toe beperkt men zich voor de toepassing in drainerende wegdekken tot slechts enkele soorten steenslag, die vrijwel steeds donker van kleur zijn. Experimenten met lichte steenslag of met lichte toeslagstoffen zijn nauwelijks gedaan (SCW, 1974). De uitkomst ervan is niet ongunstig, maar gewoonlijk neemt men geen risico. Dit betekent dat de drainerende wegdekken in nieuwe toestand steeds zeer donker zijn, en in het gebruik nauwelijks lichter worden.

Overigens is er geen enkele reden om niet ook cementbeton als bindmiddel te gebruiken: er zijn een aantal, veel belovend verlopen, proefnemingen uitgevoerd met "zeer open cementbeton". Zie bijvoorbeeld Swart & Schipper (1988).

In Nederland wordt op wegen waar ZOAB is gebruikt, dit wegdektype ook in de eventueel in deze wegen liggende tunnels gebruikt. Dit lijkt vooral een economische factor te zijn: het is goedkoper om het wegdek "gewoon" door

de tunnel heen door te trekken. Zolang de verlichting in de tunnel traditioneel (symmetrisch) is, zijn de voor- en nadelen van ZOAB gelijk aan die van de open weg.

Bij tegenstraalverlichting ligt de zaak anders. De luminance yield bij tegenstraalverlichting hangt sterk af van de $P(2;0)$. Drainerende wegdekken hebben juist een lage $P(2;0)$, waardoor van het belangrijkste voordeel van tegenstraalverlichting niet veel terecht komt. Het is een zaak van verder onderzoek wat de consequentie hiervan zou moeten zijn. Mogelijk zou men kunnen besluiten om hetzij ZOAB, of tegenstraalverlichting in tunnels te vermijden! Gezien het belang van deze mogelijke consequenties, is nader onderzoek gewenst.

3.6. Theoretische consequenties voor de tegenstraalverlichting in tunnels

3.6.1. Kwaliteitscriteria voor verlichting

In par. 2.2 is een overzicht gegeven van de verschillende voor- en nadelen van de tegenstraalverlichting voor tunnels. In de onderhavige paragraaf zullen we deze opsomming nader concretiseren.

Uitgangspunt daarvoor zijn de bekende kwaliteitscriteria van openbare verlichting. De kwaliteit van "gewone" straatverlichting voor wegen met in hoofdzaak of uitsluitend een verkeersfunctie, wordt uitgedrukt in vier kwaliteitscriteria:

- de gemiddelde wegdekluminantie;
- de ongelijkmatigheid van het luminantiepatroon;
- de verblinding;
- de visuele geleiding.

De keuze van deze criteria is in detail in de literatuur beschreven. Overzichten daarvan zijn te vinden in CIE (1977a); De Boer (ed.) (1967); Schreuder (1967); Van Bommel & De Boer (1980). Voor woonstraten en verbijfsgebieden gelden andere criteria, die hier niet ter zake zijn (NSVV, 1990).

Van de vier genoemde criteria zijn de eerste drie te kwantificeren; dat gebeurt dan ook in de gebruikelijke normen en aanbevelingen. Zie bijvoorbeeld CIE (1977a); NSVV (1957, 1974-75, 1977, 1990). Over de onderlinge

relatie van de criteria is weinig bekend; over een eventuele "trade-off" tussen de criteria vrijwel niets (Schreuder, 1983; 1991e). Onder "trade-off" wordt verstaan de mate waarin de eisen aan de verlichting wat betreft één van de criteria kunnen worden verzwakt wanneer aan een ander criterium in een "overmaat" is voldaan: mag bij voorbeeld de verblinding sterker zijn dat de aanbevolen waarde wanneer de gemiddelde wegdekluminantie hoger is dan het minimum?

Voor tunnels kunnen in beginsel dezelfde vier criteria worden toegepast. De onderlinge relatie ligt echter anders, ofschoon - door het gebrek aan kwantitatieve gegevens over de trade-off tussen de criteria - hierover weinig concrete opmerkingen kunnen worden gemaakt. De bespreking van de theoretische consequenties van tegenstraalverlichting in tunnels zal dan ook voor een belangrijk deel een kwalitatief karakter hebben. Een aantal kwantitatieve aspecten komen in Hoofdstuk 5 aan de orde.

3.6.2. Contrast

In par. 3.2.1 hebben we de contrastwaarneming besproken. Door het tegenstraaleffect wordt de achterkant van eventuele objecten sterker, en de voorkant ervan zwakker verlicht, zodat de luminantie van de objecten lager wordt. Dit gecombineerd met een gelijke, of zelfs eventueel hogere, luminantie van wand of wegdek (zie par. 3.6.1) leidt dit tot een hoger contrast tussen object en wegdek, en dus tot een betere zichtbaarheid. Omdat, zoals in par. 3.2.1 is aangegeven, een hoger drempelcontrast reeds wordt bereikt bij een lagere luminantie, kan voor gelijke zichtbaarheid bij een groter contrast een lager lichtniveau worden geïnstalleerd.

Deze toename in het contrast is gemakkelijk te constateren. De toename kan aanzienlijk zijn, zoals uit de elders besproken onderzoeken blijkt. Zie bijvoorbeeld Adrian (1978); Anon (1978a); Blaser (1990); Dijon (1990). Ook voor wegverlichting zijn onderzoeken te vermelden die tot een duidelijke toename van de contrasten leiden. Zie bijvoorbeeld Hentschell & Stempfle (1975) en Westermann (1975a). Wanneer echter de achtergrond zeer ongelijkmatig is (zoals bij tegenstraalverlichting in tunnels veelal het geval is) kan naast deze toename in het contrast op sommige plaatsen, een vermindering van het contrast op andere plaatsen worden geconstateerd. Dit wordt bij de metingen inderdaad steeds waargenomen. Er zijn vrijwel steeds

gebieden waar de contrasten te gering zijn voor een goede waarnemingen (de zgn. "Tarnzones" of verdwijnzones; zie Hentschell 1969). Tegenstraling verschuift deze verdwijnzones, maar heeft ze niet op.

Deze contrastwinst, zo ze al te vinden is, kan alleen worden gevonden bij kleine, diffuus reflecterende, stationaire obstakels op de weg; we hebben reeds enige malen aangegeven dat deze obstakels niet van belang zijn voor de verkeersveiligheid in tunnels (zie par. 3.1.6). Het punt dat meestal met de meeste nadruk als voordeel van de tegenstraalverlichting wordt aangevoerd, is dus niet algemeen geldig.

Het bestaan van verdwijnzones zijn een belangrijke aansporing geweest om onderzoek te doen naar meestralende verlichting (Adrian, 1988, 1989; IES, 1988; Keck, 1988). Uitgangspunt was dat een combinatie van tegenstralende wegverlichting en meestralende autoverlichting zou leiden tot meer of grotere verdwijnzones, of tot verdwijnzones die "gevaarlijker" zijn. Deze beweringen kunnen allen worden ondersteund door uit te gaan van objecten die niet relevant zijn voor de verkeersveiligheid (zie par. 3.1.6).

3.6.3. De visuele geleiding

Wanneer in de ingang van een tunnel tegenstraalverlichting wordt aangebracht, heeft dit tot resultaat dat de visuele geleiding wordt verbeterd. De reden is dat de lichtbronnen meer licht dicht onder de horizontaal uitzenden. In de tunnel zelf geeft dit meestal aanleiding tot meer verblinding (zie par. 3.6.7), maar voor een automobilist die nog buiten de tunnel is, levert dit een ondersteuning op voor de visuele geleiding. Wegens het hoge adaptatieniveau op de open weg buiten de tunnel, behoeft onder deze omstandigheden niet voor verblinding te worden gevreesd.

3.6.4. Armatuurrendement

Tegenstraalverlichting vereist een lichtverdeling van de verlichtingsarmaturen die een meer uitgesproken bundelvorming vertoont (tegen de rijrichting in tenminste), en tevens een scherpere begrenzing voor richtingen dicht onder de horizontaal. Dit laatste is van belang voor het beperken van de verblinding (zie Schreuder, 1983, 1985d). Deze "scherpere" lichtverdeling heeft een aantal consequenties. Naast het hierna te bespreken

geringer armatuurrendement, leidt een scherpere lichtverdeling voorts meestal tot een grotere ongelijkmatigheid (par. 3.6.6); ook kunnen storende flikkereffecten ontstaan (par. 3.6.8).

Het feit dat een scherpere lichtverdeling meestal tot een geringer armatuurrendement leidt heeft te maken met de wijze waarop in verlichtingsarmaturen de bundelvorming ontstaat. De bundel - en dan vooral de bundelbreedte of de bundelspreiding - wordt bepaald door de verhouding tussen de brandpuntsafstand van de afbeeldende optiek (lenzen of spiegels) en de afmetingen van de lichtbron; de (maximale) lichtsterkte in de bundel wordt bepaald door de "openingshoek" van de optiek, gezien vanuit de lichtbron. Een grotere optiek "vangt" meer licht. Details zijn gegeven in Cohu (1967), Vermeulen (1978; 1982) en Van Bommel & De Boer (1980).

Een scherpere bundel kan bij dezelfde lichtbronafmeting alleen worden bereikt door het armatuur groter te maken. Om de afmetingen binnen de perken te houden (o.a. met het oog op de bouwhoogte; par. 3.6.5), wordt de "opvanghoek" van de optiek kleiner gekozen, hetgeen onherroepelijk leidt tot een kleiner rendement. Opgemerkt moet worden dat het hier gaat om het rendement in de bundel, dus iets dat zou kunnen worden uitgedrukt in "cd per lumen". Het traditionele rendement (de totale fractie van de lamplichtstroom die uit het armatuur te voorschijn komt) is van minder belang.

Uiteraard kan men met een armatuur van redelijke afmetingen een groot rendement handhaven door een kleinere lichtbron te kiezen. Dit is er de reden van dat tegenstraalverlichting, hoewel theoretisch al lang bekend, pas een praktische toepassing kon vinden toen hoge-druk natriumlampen (SON-T) ter beschikking kwamen (Zie Hoofdstuk 4). Men moet echter bedenken dat ook de traditionele (symmetrische) verlichting in tunnelingangen vrijwel uitsluitend met SON-T-lampen wordt uitgevoerd. Het lamptype is dus geen speciaal voordeel voor tegenstraalverlichting, zodat bij de vergelijking tussen de twee verlichtingssystemen het nadeel van het geringere armatuurrendement blijft bestaan.

Het is niet precies bekend hoeveel dit nadeel kwantitatief bedraagt. Soms wordt beweerd dat het mindere armatuurrendement alle voordelen van de hogere luminance yield te niet doet. Dit zou natuurlijk best kunnen, maar

omdat deze bewering afkomstig is van de "tegenstanders" van tegenstraalverlichting, lijkt het wenselijk om de kwestie van het armatuurrendement nog eens zorgvuldig te bestuderen.

3.6.5. Bouwhoogte

De lichtsterkte die door een armatuur in een bepaalde richting wordt geleverd, wordt bepaald door de luminantie van de lichtbron (verminderd met de verliezen die door de optische afbeelding optreden) en de afmetingen van dat deel van de optiek dat, gezien vanuit de betreffende richting, deze luminantie vertoont (het deel van de optiek dat "vol" wordt gezien; zie weer Vermeulen (1978, 1982) en Van Bommel & De Boer (1980).

Bij gelijk lamptype dient het zichtbare gedeelte van het armatuur groter te zijn wanneer een grotere lichtsterkte wordt verlangd. Dit betekent dat de armaturen die bij tegenstraalverlichting worden gebruikt, een aanzienlijk oppervlak moeten hebben, gericht tegen de verkeersrichting in. Armaturen met een vlakke onderkant komen nauwelijks in aanmerking, omdat die zeer groot zouden moeten zijn. De consequentie van een en ander is dat de bouwhoogte van de armaturen die voor tegenstraalverlichting worden gebruikt, vrij groot moet zijn. In tunnels die geboord worden, en dus in hoofdzaak een cirkelvormige doorsnede hebben, is dit geen bezwaar. Midden boven de rijbaan is de hoogte meestal tenminste 5 meter, en vaak nog meer. Bij een doorrijhoogte van 4,30 meter is er geen beperking voor de afmetingen van de armaturen.

Anders is het bij tunnels die uit zinkstukken bestaan, of die met een "cut and cover"-methode worden gebouwd. Hier is de doorsnede vrijwel steeds rechthoekig, en de tunnelhoogte wordt vooral bepaald door de vrije doorrijhoogte onder de verlichtingsarmaturen. In de praktijk betekent dit, dat de tunnel 5 cm hoger (en dus heel veel duurder) moet zijn wanneer een armatuur dat 5 cm hoger is, wordt toegepast. Voor de Nederlandse omstandigheden moet de bouwhoogte van de armaturen zorgvuldig worden bekeken.

3.6.6. Ongelijkmatigheid

Bij "gewone" straatverlichting wordt gewoonlijk veel waarde gehecht aan een goede gelijkmatigheid. De eisen aan die aan de verlichting van ver-

keerswegen worden gesteld wat betreft de gelijkmatigheid zijn dan ook zeer zwaar: met lichtere eisen zouden paalafstanden veel groter kunnen worden gekozen, hetgeen tot aanzienlijke besparingen in kosten en energie zou kunnen leiden (zie CIE, 1976, 1977a) en NSVV (1990).

De eisen wat betreft de gelijkmatigheid van het luminantiepatroon voor het interieur van lange tunnels zijn nog zwaarder. De reden is dat door de besloten ruimte een ritmische storing nog moeilijker is te verdragen dan op de open weg, terwijl de consequenties van zelfs een gering ongeval veel zwaarder zijn. Maar waarschijnlijk is het meest belangrijke probleem gelegen in de frequentie van de verschijnselen. We komen in par 3.6.8 terug op deze "flickereffecten".

Bij de ingang van tunnels gelden geheel andere eisen. Omdat de ingangsverlichting van verkeerstunnels slechts zelden langer is dan enige tientallen meters, is de tijd dat autobestuurders blootgesteld zijn aan eventuele flickereffecten slechts kort: ten hoogste twee a drie seconden. In een dergelijke korte tijd zijn geen ernstige problemen te verwachten, zodat de eisen bij de ingangsverlichting van lange tunnels niet streng behoeven te zijn. Dit geldt zowel voor de gelijkmatigheid als voor de in par. 3.6.7 te bespreken verblinding en de in par. 3.6.8 te bespreken flickereffecten. Van belang is op te merken dat wat dit betreft, korte tunnels kunnen worden gelijkgesteld aan de ingangszone van lange tunnels.

De gelijkmatigheid van het luminantiepatroon is vooral bij tegenstraalverlichting tamelijk kritisch. Dit is het gevolg van de bij tegenstraalverlichting noodzakelijke "scherpe" lichtverdelingen, die weer nodig zijn om het tegenstraaleffect te bereiken (zie par 3.6.4 en 3.6.5). Het eindresultaat is dat het luminantiepatroon op het wegdek en vooral ook op de wanden minder gelijkmatig is dan bij symmetrische verlichting. Ook meestralende verlichting is wat dit betreft ongunstiger dan symmetrische verlichting. De mindere gelijkmatigheid wordt vaak als een belangrijk bezwaar tegen de tegenstraalverlichting aangevoerd. Aangezien het bij de ingangsverlichting van lange tunnels vooral gaat om een esthetische zaak, moet de waarde van dit bezwaar ernstig worden bekeken.

Kwantitatieve uitspraken zijn wat betreft de ongelijkmatigheid moeilijk te geven. Wel mag men verwachten dat de eisen in de ingangszone van lange

tunnels aanzienlijk minder streng zullen zijn dan die, welke gelden voor een "gewone" open weg. In het interieur van lange tunnels zijn de eisen echter, zoals hierboven reeds gesuggereerd, aanzienlijk zwaarder. Tegenstraalverlichting wordt daar echter weinig toegepast, zodat we deze zaak verder onbesproken laten.

3.6.7. Verblindings

Bij de verblindings, en het voorkomen ervan, komen dezelfde aspecten naar voren als bij de hierboven besproken ongelijkmatigheid (par. 3.6.6). In het interieur zijn de eisen strenger dan op de open weg, en bij de ingang zijn ze minder streng. En de "scherpere" lichtverdeling van tegenstraal-armaturen maakt de verblindings aanzienlijk kritischer dan bij symmetrische verlichting. Uiteraard kan de verblindings bij meestralende verlichting zeer gering zijn of zelfs geheel afwezig zijn (NSVV, 1963; Schreuder, 1964, 1967a).

In tegenstelling tot de ongelijkmatigheid, kunnen voor de verblindings enige kwantitatieve richtlijnen worden gegeven. Uitgangspunt is het bekende feit dat verblindings, net als iedere andere stoorkluminantie een lichtsluier oproept, die het drempelcontrast doet toenemen (zie par. 3.2.1 en 3.2.4). Voor de verlichting van verkeerswegen wordt gewoonlijk gesteld dat ten gevolge van de fysiologische verblindings ("disability glare") het drempelcontrast niet meer dan 10% mag toenemen (het "Threshold Increment TI"). Zie hiervoor bijv. CIE (1977a); NSVV (1990). Net als bij de ongelijkmatigheid mag men verwachten dat de eisen in de ingangszone van lange tunnels aanzienlijk minder streng zullen zijn dan die welke gelden voor een "gewone" open weg. De toelaatbare waarde van TI kan echter momenteel niet worden gegeven. Wel kan worden gesteld dat tegenstraal-armaturen gewoonlijk een hogere TI teweeg brengen dan armaturen voor symmetrische verlichting. Nadere studie is nodig. In het interieur van lange tunnels zijn de eisen echter, zoals hierboven reeds gesuggereerd, aanzienlijk zwaarder. Tegenstraalverlichting wordt daar echter weinig toegepast, zodat we ook deze zaak verder onbesproken laten.

3.6.8. Flikkereffecten

In het verleden is veel onderzoek uitgevoerd naar de invloed van perio-

dieke lichtveranderingen op de waarneming, op het gemak van waarnemen, en ook op de gezondheidstoestand van de waarnemers. Gebleken is dat lichtflikkeringen met een frequentie van meer dan 50 à 70 Hz niet meer als zodanig kunnen worden waargenomen. Dit is de zgn. flikker-fusiefrequentie, die vooral afhangt van het adaptatieniveau. Zie bijvoorbeeld Schober (1960); Le Grand (1956). Ook is gebleken dat er een duidelijke hinder optreedt bij frequenties tussen 2 à 4 Hz en 13 à 17 Hz, ook weer afhankelijk van een aantal factoren, waarop we verderop nog terugkomen. Bij frequenties tussen 8 à 10 Hz blijkt de storing het hoogste te zijn. Zie Schreuder (1964). Tenslotte is het bekend dat lijdens aan epilepsie in sommige gevallen epileptische aanvallen kunnen krijgen wanneer ze een lange tijd worden bloot gesteld aan lichtflikkeringen. Schreuder (1981) heeft aangetoond dat dit effect voor het wegverkeer, meer in het bijzonder voor tunnelverlichting, geen problemen kan opleveren. We gaan er hier niet verder op in.

In de verlichting van verkeerswegen spelen flikkereffecten geen belangrijke rol. Immers, zelfs bij lijnverlichting met een afstand tussen de lichtpunten van 15 meter, en een snelheid van 120 km/uur (33 m/s) is de frequentie nauwelijks meer dan 2 Hz; dit ligt buiten (ten hoogste aan de rand van) het gebied waar storing kan optreden. Zie Tabel 5.

Anders is het bij tunnelverlichting. Door de geringe hoogte van de tunnel moeten lichtbronnen met geringe tussenafstanden worden gemonteerd, om zelfs maar bij benadering te kunnen voldoen aan de eisen van de gelijkmatigheid en van de verblinding. De tussenafstand is meestal in de orde van enige meters tot ca 10 meter, in tegenstelling tot de afstanden van 30 tot 50 meter die bij straatverlichting gebruikelijk zijn. Zelfs bij lijnverlichting zijn de afstanden meestal 12 à 25 meter. Bij onderlinge afstanden van enige meters kan storing optreden. In Tabel 5 zijn de "verboden gebieden" voor de onderlinge afstand van lichtpunten aangegeven voor verschillende rijsnelheden. Als gebied waar storingen kunnen optreden is de range van 3 tot 15 Hz genomen, met een maximum bij 9 Hz.

Wanneer met verschillen in rijsnelheid rekening wordt gehouden, blijkt het "verboden gebied" vrij groot te zijn. Het streven om flikkereffecten te vermijden is de belangrijkste reden geweest om tunnelverlichting met continue lichtlijnen uit te voeren (Schreuder, 1972). Een bijkomend voordeel

is dat bij de gebruikelijke afmetingen van verkeerstunnels het "kop aan staart" monteren van gewone fluorescentiebuizen leidt tot een niveau van de orde van grootte van 70 à 100 lux per lichtlijn; een waarde die zeer goed past in de eisen te gewoonlijk worden gesteld aan de verlichting van het interieur van lange tunnels met veel verkeer. Gesloten lijnen van TL-lampen zijn dan ook als de standaardoplossing voor tunnelverlichting te beschouwen. Zie bijvoorbeeld Stiksma (ed.) (1987).

Het onderzoek van Jantzen (1960) en van Schreuder (1964) heeft uitgewezen dat de hinder door periodieke lichtflikkeringen, naast de frequentie, afhangt van een aantal andere karakteristieken van de verlichting:

- de licht-donkerverhouding (gedeelte van de periode waar het licht is);
- de modulatie diepte (verhouding tussen lichtste en donkerste deel van de periode);
- de stijlheid (tijdsafgeleide van het licht).

Gebleken is dat t.l.-lampen, die met aanzienlijke tussenafstanden in de lengte zijn gemonteerd, nauwelijks hinder opleveren, zelfs al valt de onderlinge afstand in het "verboden gebied" van Tabel 5. Tegenstraalverlichting kan echter niet met continue lichtlijnen worden uitgevoerd; ook in het interieur van lange tunnels, waar tegenstraalverlichting nauwelijks wordt toegepast, is de kans op hinder door flikkereffecten vrij groot.

Het zijn daarentegen vooral korte, intense flitsen die plotseling "aanflitsen", die de grootste hinder opleveren. Bij de hoge lichtniveaus die bij de ingangsverlichting van lange tunnels vereist zijn, is toepassing van armaturen, die dergelijke karakteristieken vertonen, nauwelijks te vermijden. Uiteraard wordt de kans op ernstige storing groter wanneer tegenstraalverlichting wordt gebruikt: de vereiste "scherpe" lichtverdeling geeft bij doorrijden van de tunnel extra grote stijlheid van het licht.

In Nederland is een aanzienlijke hoeveelheid onderzoek uitgevoerd naar de invloed van lichtflitsen met grote stijlheid en grote modulatie diepten. Dit onderzoek betrof niet het kunstlicht (tegenstraal of symmetrisch) maar de lichtdoorlating van lichtroosters voor de eigenlijke tunnelingang; meer in het bijzonder ging het om de vraag of dergelijke roosters, zoals in het verleden vaak werd gesteld, onder alle omstandigheden "zondicht" moe-

ten zijn (Schreuder, 1964). Eindresultaat is dat dergelijke lichtflitsen alleen kunnen worden getolereerd wanneer

- de frequentie ten minste 20 Hz bedraagt;
- de periode waarover de autobestuurders met de flitsen worden geconfronteerd, niet meer dan 2 à 3 seconden bedraagt.

Dit onderzoek is beschreven door Tan et al. (1983), Van den Brink (1984) en samengevat door Schreuder & Oud (1988).

Het is niet zonder meer te zeggen of deze eisen onveranderd voor tegenstraalverlichting gelden; wel is te verwachten dat de proeven over de lichtdoorlating van roosters een belangrijke bijdrage kunnen leveren.

3.6.9. Daglicht

Daglicht dat door de ingang de tunnel binnen valt, is in extreme mate "meestralende" verlichting. De bijdrage tot de horizontale verlichtingssterkte op het wegdek, en daarmee tot de wegdekluminantie is verwaarloosbaar klein. Uit een combinatie van berekeningen op basis van de door Higbie (1934) gegeven methode en enige metingen in bestaande tunnels blijkt dat de horizontale verlichtingssterkte na ca. 10 m reeds tot op 0,5% is afgenomen (Schreuder, 1964). Hierbij is de horizontale verlichtingssterkte in het open veld als 100% genomen.

Uit dezelfde berekeningen en metingen blijkt echter dat de bijdrage tot de verticale verlichtingssterkte aanzienlijk groter is. De verticale verlichtingssterkte bedraagt na 10 m nog 30%, en pas na 25 m is deze tot op 0,5% is afgenomen. Hierbij is weer de horizontale verlichtingssterkte in het open veld als 100% genomen. Men moet daarbij echter bedenken dat de verticale verlichtingssterkte in het open veld veel lager is dan de horizontale verlichtingssterkte (afhankelijk van de omstandigheden), zodat het daglicht dat door de ingang de tunnel binnenvalt, op enige tientallen meters nog een merkbare bijdrage tot E_v kan opleveren. Hierop berust het feit dat bij de ingang van (lange) tunnels het aanbrengen van goede retroreflecterende middelen een aanzienlijke bijdrage kan leveren tot de visuele geleiding. Hiervan wordt in een aantal Alpenlanden, met name Oostenrijk, maar ook in Noorwegen, gebruik gemaakt. Over de ervaringen is weinig gepubliceerd. Alleen door de PIARC zijn enige globale richtlijnen gegeven (Anon, 1987).

De invloed van binnenvallend daglicht is van minder belang wanneer het gaat om kleine, diffuus reflecterende obstakels. Wanneer men aanneemt dat het object een reflectiefactor van 0,1 bezit, is de luminantie ervan op 25 m meter niet meer dan 17 cd/m^2 . Dicht bij de tunnelingang kan de bijdrage echter nog aanzienlijk zijn. Op 10 m afstand van het tunnelportaal is de luminantie van het bedoelde object nog ca. 1000 cd/m^2 !

Zoals bekend is het een van de doelstellingen van de tegenstraalverlichting om de verticale verlichtingssterkte op het naar de naderende autobestuurder toegekeerde verticale vlak van het object zo gering mogelijk te houden, om daarmee een groter contrast te kunnen bereiken. Dit streven wordt door het daglicht dat door de ingang de tunnel binnenvalt, tegengewerkt. Het daglicht is derhalve "counterproductive" bij tegenstraalverlichting, maar "productive" bij meestralende verlichting ("pro-beam"). Dit wordt bevestigd door de metingen die in par. 5.2 worden beschreven.

3.6.10. Wegmarkeringen

In par. 3.5.3 is reeds in detail beschreven wat het belang is van wegmarkeringen in tunnels, meer in het bijzonder bij de ingang van lange tunnels. Ook is beschreven in hoeverre de werking van wegmarkeringen wordt beïnvloed door de verlichtingswijze in de tunnel (tegenstraalverlichting, symmetrische verlichting of meestralende verlichting).

4. DE HISTORIE VAN TEGENSTRAALVERLICHTING IN TUNNELS

De oudste vermelding van tegenstraalverlichting in tunnels komt niet uit Zwitserland, maar uit Hilversum. In de jaren vlak na de tweede wereldoorlog is in een spoorwegtunnel in Hilversum een proefinstallatie aangelegd waarbij tegenstraalverlichting is toegepast. De verblinding kon binnen grenzen worden gehouden door de armaturen (uitgerust met gloeilampen) tussen de liggers van het spoorviaduct aan te brengen. Waarschijnlijk is deze proef niet als een succes beschouwd; nadien is er niets meer van gehoord.

Ook in Zwitserland is tegenstraalverlichting niet altijd als de oplossing bij uitstek beschouwd. In de eerste complete "Aanbevelingen" voor tunnelverlichting wordt over deze wijze van verlichting niet gerept (SBK, 1968). Deze aanbevelingen zijn gebaseerd op de "klassieke" onderzoeken van Mäder (Mäder & Fuchs, 1966), die een goede overeenstemming vertoonden met de onderzoeken van Schreuder (1964), die op haar beurt de basis hebben geleverd voor de CIE-aanbevelingen (CIE, 1973). Zie ook Schreuder (1968).

Tegenstraalverlichting is alleen mogelijk wanneer men geconcentreerde lichtbronnen kan gebruiken; alleen daarmee kunnen de noodzakelijke "scherpe" lichtverdelingen worden verwezenlijkt, die nodig zijn om de verblinding binnen de perken te houden. De eerste lichtbron die voor praktische toepassingen in dit gebied in aanmerking kwam, is de Hogedruk Natriumlamp (met heldere ballon), de bekende SON-T. Toch zijn de eerste SON-lampen, ook in Zwitserland, gebruikt in traditionele installaties. Het ging daarbij om een aantal tunnels in de toerit van de Gotthardtunnel (N2) en in de toegang van de St. Bernardintunnel (N25). Een aantal van deze tunnels zijn in de zestiger jaren gereed gekomen. Een overzicht van deze tunnels en hun verlichting is gegeven in Anon (1968, 1969).

Interessant is het, om op te merken dat de aandacht vooral werd gericht op een bepaalde tunnel (Costoni di Fieud) waarbij SON-lampen werden gebruikt om een asymmetrische lichtverdeling te creëren. Deze asymmetrische lichtverdeling werd echter gebruikt om de wand van de tunnel, die in een scherpe bocht ligt, aan te stralen, maar niet om tegenstraalverlichting te realiseren.

In het eind van de jaren zeventig werd symmetrische (traditionele) verlichting toegepast in twee belangrijke Alpentunnels: de Mont-Blanctunnel tussen Frankrijk en Oostenrijk (Anon, 1979) en de Gleinalmtunnel in Oostenrijk (Prochazka, 1979). Ook in een, uit 1970 daterend, overzicht van een aantal belangrijke tunnels in Duitsland, Noorwegen, Argentinië, Zweden en Nederland komt tegenstraalverlichting niet aan de orde (Anon, 1970).

Maar ook worden tegen het eind van de jaren zeventig de eerste studies over de tegenstraalverlichting gepubliceerd. In Schreuder (1981) is een overzicht gegeven van de tot dan toe beschikbare literatuur. Deze opgave wordt hieronder samengevat; uiteraard zijn sommige van de in Schreuder (1981) genoemde publikaties reeds eerder aan de orde gekomen. De zgn. "contrastverlichting" is besproken door Adrian (1978a); Anon (1978b); Baumann (1980); Mäder (1969); Prochazka (1979) en Simkovics (1978, 1979).

In Schreuder (1981) is ook ingegaan op de voor- en nadelen van tegenstraalverlichting. Daarbij hebben de volgende publikaties de revue gepasseerd: Anon (1968a, 1974c, 1975b, 1977, 1979c, 1981a); Blaser (1981); Freiburgerhaus (1975); Herbst (1978); Müller & Riemenschneider (1975a); Riemenschneider & Müller (1975); Schwengler (1978); Van den Bijllaardt (1981); Van Bommel & De Boer (1980); Waldram (1962) en Walthert (1977). De meeste publikaties zijn reeds elders vermeld in dit rapport; de andere geven slechts een herhaling van de gezichtspunten, en leveren niets nieuws. Ze zijn hier slechts volledigheidshalve opgesomd.

Deze publikaties vallen in de tijd samen met de eerste toepassingen van tegenstraalverlichting in tunnels in Zwitserland. De keuze van deze verlichtingswijze is gebaseerd op de theoretische overwegingen van Mäder, Blaser en hun medewerkers; de belangrijkste studies zijn hierboven reeds genoemd. De praktische reden voor de invoering, eerst bescheiden, en later op grote schaal, is het feit dat bij tegenstraalverlichting om twee redenen de te installeren lichtstroom geringer is (of tenminste geringer geacht wordt te kunnen zijn) dan die bij traditionele (symmetrische) verlichting:

- Door gebruik te maken van de spiegelende component van de reflectie van het wegdek kan in een bepaald punt van de weg eenzelfde wegdekkluminantie worden bereikt bij een geringere lichtsterkte gericht naar het betreffende weggedeelte (overigens is het juist een van de discussiepunten of deze

geringere lichtsterkte ook kan worden bereikt met een geringere lichtstroom; hierop komen we nog terug).

- Door de voorzijde van objecten relatief donker te laten, ontstaat bij het zelfde object een groter contrast tussen object en wegdek dan bij overigens gelijke omstandigheden bij een traditionele (symmetrische) verlichting. Voor even goede waarneming (even grote kans op detectie) is bij een groter contrast een lagere adaptatieluminantie nodig, zodat de lichtstroom bij tegenstraalverlichting lager kan zijn dan bij traditionele (symmetrische) verlichting. Overigens hebben we hierboven reeds aangegeven dat de waarneembaarheid (de detectie) van donkere, stationaire objecten niet als het belangrijkste deel van de verkeerstaak dient te worden beschouwd.

De eerste installaties voor tegenstraalverlichting in Zwitserland zijn in de toegangsweg van de Gotthard-autosnelweg aangelegd. Men is begonnen met zeer extreme tegenstraalverlichting toe te passen. Deze installaties bleken niet te voldoen: de verblinding was zeer sterk, de wanden van de tunnel bleven zeer donker, en het wegverloop was niet behoorlijk te zien. In een opeenvolging van tunnels heeft men (door "trial and error") een goed optimum weten te bereiken; dit optimum is nu als de standaardoplossing voor de verlichting van korte tunnels en voor de ingangsverlichting van lange tunnels in Zwitserland, Oostenrijk, en delen van Frankrijk, Italië, Spanje en Joegoslavië te beschouwen.

Deze serie van proeftunnels is nauwelijks beschreven in de literatuur; misschien heeft dit te maken met de slechte ervaringen die men in het begin ermee heeft opgedaan. De verlichting die op grond van deze proefnemingen als "standaard" naar voren is gekomen, is echter geen sterk uitgesproken tegenstraalverlichting. Niet ten onrechte spreekt men vaak van "asymmetrische" verlichting; daarmee wordt bedoeld op het feit dat de verlichting een asymmetrie in de lengterichting van de tunnel vertoont, en dat er van een zekere voorkeursrichting, tegen de verkeersrichting in, kan worden gesproken, zonder dat de term "tegenstraalverlichting" geheel van toepassing is.

De internationale discussie, meer in het bijzonder in CIE en CEN (de Europese normalisatie) heeft ertoe geleid dat ook in Zwitserland bij een aantal aspecten van de tegenstraalverlichting vraagtekens worden gezet.

In de meest recente overzichtspublikatie (Blaser, 1990) is daarvan nog niets te bespeuren, maar de door Blaser (1991) gegeven toelichting bij de CEN-vergadering doet blijken dat een aantal aspecten, ook vanuit het Zwitserse gezichtspunt, nader dienen te worden onderzocht. De door Blaser als belangrijkste betitelde vraagpunten zijn:

- invloed van het daglicht dat de tunnel binnenvalt;
- invloed van de mate waarin de horizon en de lucht boven de horizon zichtbaar is;
- invloed van de verkeersdrukke.

5. ONDERZOEKINGEN

5.1. Berekeningen over de effectiviteit van tegenstraalverlichting

5.1.1. De geldigheid van de fundamentele experimenten

De gangbare aanbevelingen en richtlijnen voor tunnelverlichting zijn gebaseerd op de onderzoeken van Schreuder (1964), waar is gesteld dat de luminantie in de drempelzone van een lange tunnel voor (snel)verkeer niet minder moet bedragen dan 0,1 van de luminantie die overeenkomt met de evenwichtstoestand van de adaptatie op de open weg voor de tunnel. Er is daartoe een punt op de weg naar de tunnel toe gedefinieerd (het "adaptatiepunt") waar de adaptatie aan de donkere tunnel begint. Uitgangspunt van de "0,1-regel" was dat het adaptatiepunt dicht voor de tunnel ligt (ten hoogste enige tientallen meters, maar in ieder geval op een afstand die kort is in vergelijking tot de stopafstand). Wanneer de adaptatie aan de lagere luminantie in de tunnel veel eerder begint (wanneer het adaptatiepunt ver voor de tunnel ligt) heeft dat twee consequenties:

- de verhouding mag groter zijn (de tunnel mag donkerder zijn);
- er is geen sprake van een drempelzone is de strikte zin van het woord.

De aanbevelingen van de CIE (1973) en die van de NSVV (1963) waren gebaseerd op de aanname dat het adaptatiepunt dicht voor de tunnel ligt, de aanbevelingen van Japan (Anon, 1973) daarentegen op de aanname dat het adaptatiepunt ver voor de tunnel ligt - enige honderden meters, maar in ieder geval verder weg dan met de stopafstand overeenkomt. De Japanse aanbevelingen zijn gebaseerd op de onderzoeken van Narisada en zijn medewerkers. Zie voor overzichten hiervan bijvoorbeeld Narisada & Yoshikawa (1974) of Narisada & Yoshimura (1974).

Het is uiteraard van belang om na te gaan of er hier van een fundamenteel verschil sprake is, of dat de verschillen in de aanbevelingen in hun geheel kunnen worden toegeschreven aan de plaats van het adaptatiepunt. Volgens Schreuder (1986, 1971) is het laatste inderdaad het geval. Het blijkt dat de geografische en geomorfologische factoren daarbij overheersen: de aanbevelingen van CIE en NSVV zijn toegespitst op tunnels onder waterwegen, vliegvelden enz. in vlak land, terwijl de Japanse aanbevelingen zijn toegespitst op tunnels door hoge, steile en met bos begroeide

bergen. We komen hierop nog terug; dit is van belang bij de voorkeur van de Alpenlanden voor tegenstraalverlichting. In de praktijk heeft men dezelfde ervaring opgedaan. Bij de praktijk die men wel de "derde generatie van tunnelverlichting" noemt (Schreuder, 1979, 1980) maakt men hiervan gebruik: de omgeving van de tunnel wordt donker uitgevoerd, waardoor het adaptatiepunt op een aanzienlijke afstand voor de tunnel komt te liggen.

De CIE heeft ter voorbereiding van de nieuwe aanbevelingen die momenteel vrijwel gereed zijn (CIE, 1990) een aparte studie gewijd aan een aantal fundamentele aspecten (CIE, 1984). Eén van deze aspecten is de vraag of de oorspronkelijke metingen van Schreuder nog steeds kunnen worden gebruikt bij het ontwerp van tunnelverlichting. Onder aanname dat het relevante object inderdaad een klein, stationair en diffuus reflecterend vlak object is (zie par. 5.1.2), blijkt dit volgens de CIE-studie inderdaad het geval te zijn (CIE, 1984, blz. 9). Deze conclusie is gebaseerd op een hernieuwde studie van de onderzoekingen van Mäder & Fuchs (1966), Nakamichi & Narisada (1967), Narisada & Yoshimura (1974) en Schreuder (1964).

Ook in de Alpenlanden heeft men zich deze vraag gesteld. In een studie die speciaal over tegenstraalverlichting gaat, heeft Blaser (1981) geconstateerd, net als de CIE (1984), dat de resultaten van het onderzoek van Schreuder (1964) kunnen worden gebruikt. De "0,1-regel" wordt echter niet toepasbaar geacht; zoals hierboven reeds is aangegeven, neemt men bij de tegenstraalverlichting aan dat, door de vergroting van het contrast, de luminantie in de drempelzone lager kan zijn dan met de "0,1-regel" overeenkomt. Bovendien doet zich in de tunnels in de Alpenlanden veelal dezelfde situatie voor als in Japan: de meeste tunnels gaan door steile, met dicht bos begroeide bergen, zodat het adaptatiepunt ver voor de tunnel ligt, en er van een drempelzone nauwelijks of in het geheel geen sprake is. Om deze redenen wordt de "0,1-regel" in Alpenlanden niet toegepast. Men doet er goed aan te bedenken het niet toepassen van de "0,1-regel" slechts voor een deel te maken heeft met de eventuele keuze van een installatie voor tegenstraalverlichting in de tunnelingang. Zou men een dergelijke installatie in een vlak land als Nederland gebruiken, dan moet men ermeê rekening blijven houden dat het adaptatiepunt meestal dicht voor het tunnelportaal ligt.

5.1.2. Het "standaardobject" als kenmerk voor de visuele taak

1. De afmetingen van het standaardobject

De aanbevelingen en richtlijnen voor tunnelverlichting zijn gebaseerd op onderzoek. Vrijwel alle onderzoeken die hiervoor zijn gebruikt, hebben als fundamenteel uitgangspunt dat het bij het besturen van een auto uitsluitend of tenminste in de allereerste plaats gaat om de visuele waarneming van objecten, en dat de waarnemingstaak (de rijtaak, of, beter gezegd, de verkeerstaak) afdoende kan worden beschreven door de detectie van kleine, stationaire, diffuus reflecterende, vlakke objecten in rekening te brengen. In par. 3.1.7 hebben we reeds aangegeven dat deze aanname voor de praktijk niet relevant noch realistisch is; voor de berekeningen ten behoeve van de installatie van tunnelverlichting kan ze echter worden gebruikt als vervangend criterium voor de waarneembaarheid. Blijft dan natuurlijk de vraag in hoeverre deze berekeningen belang hebben voor de praktijk!

Het reeds genoemde CIE rapport (CIE, 1984) is volledig gebaseerd op deze premisse. De gedachte dat er ook andere aspecten aan de visuele waarneming kunnen zitten, zoals de waarneembaarheid (detecteerbaarheid, herkenbaarheid) van andere verkeersdeelnemers, en dat de verkeerstaak wel eens in hoofdzaak een beslistaak, en niet in hoofdzaak een visuele taak zou kunnen zijn, komen niet aan de orde. Met deze premisse wordt bekeken of het "standaardobject" inderdaad als zodanig gebruikt kan worden.

Daarbij wordt in de eerste plaats gekeken naar de afmetingen. De experimenten van Schreuder (1964) hebben geleid tot de aanname van een "standaardobject" van 20 bij 20 cm op 100 meter, of, ander gezegd, een object dat een hoek van 7 boogminuten beslaat. Op basis van de experimenten van Blackwell (1946) en van de nadere analyse van Adrian (1969), en van de praktische waarnemingen van Narisada & Inoue (1973; 1982), Narisada & Yoshikawa (1974), Narisada et al. (1977) en Tanabe et al. (1977) wordt geconcludeerd dat voor de situaties zoals die zich bij het overdag binnenrijden van een verkeerstunnel voordoen de afmetingen van het object niet kritisch zijn voor de waarneming, en dat dus het standaardobject van 7' inderdaad tot "standaardobject" kan worden verheven (CIE, 1984, blz. 24).

2. De waarnemingstijd

Iets dergelijks geldt voor de waarnemingstijd. Schreuder (1964) is uitgegaan van 0,1 s. Narisada gebruikte een andere tijd (ca. 0,6 s; zie bijv. Nakamichi et al., 1967), maar de verschillen waren niet al te groot en goed in elkaar om te rekenen (Schreuder, 1971). Mede aan de hand van de experimenten van Menckhaus (1981) besluit de CIE dat de waarnemingstijd van 0,1 s te gebruiken is ter kenschetsing van het "standaardobject" (CIE, 1984, blz. 30).

3. Het contrast van het standaardobject

Een groter probleem ontstaat bij het vaststellen van het contrast van het standaardobject. Schreuder (1964) ging ervan uit dat het niet bekend is welke obstakels in werkelijkheid de verkeersveiligheid in tunnel in gevaar zouden kunnen brengen; verder werd aangenomen dat een contrast van 0,2 ten opzichte van de achtergrond (meestal het wegdek) aan de ene kant wel te verwachten zou zijn, en aan de andere kant een redelijke maat zou zijn voor de waarneembaarheid. Met andere woorden: de waarde van 0,2 is arbitrair gekozen ter kenschetsing van het standaardobject, en heeft geen relatie met realistische obstakels, noch met hun reflectiekenmerken, en al evenmin met de contrasten die in de praktijk voor kunnen komen. Er is omgekeerd gewerkt: de verlichtingsinstallatie in de tunnel dient zodanig te worden ontworpen dat voor alle realistische, in de praktijk te verwachten objecten, het contrast nooit minder dan 0,2 is. Alleen met die aanname kan het contrast van 0,2 als een voorwaarde voor de waarneming worden aangenomen (zie Schreuder, 1964, 1967a).

In CIE (1984) is een berekening opgenomen van de contrasten die in een tunnel kunnen voorkomen. Daarbij is de (diffuse) reflectiefactor en de verticale verlichtingssterkte gevarieerd. Uiteraard vindt men dan dat er omstandigheden zijn dat het voorwerp licht afsteekt tegen de achtergrond (het wegdek). Dit noemt men positief contrast, zie par. 3.2.1. Ook vindt men omstandigheden waarbij het contrast negatief is (donker voorwerp). En ook vindt men uiteraard een overgangsgebied, waarbij de luminantie van voorwerp en wegdek (vrijwel) gelijk zijn: het contrast is (ongeveer) nul, en het voorwerp is onzichtbaar (CIE, 1984, blz. 30-34).

Aangezien het hier, net als bij de aannamen van Schreuder (1964), niet gaat om feitelijke verkeersobstakels, kan het contrast ook hier arbitrair

worden gekozen. Zonder veel nadere toelichting stelt CIE (1984, blz. 33) dat het contrast ten behoeve van het ontwerp van tunnelverlichting tussen de 0,2 en 0,25 moet zijn.

Dit is een zwak punt in het CIE-rapport. Niet alleen blijft de afhankelijkheid van de verticale verlichtingssterkte bestaan, maar ook maakt het een groot verschil of men voor het contrast 0,2 of 0,25 neemt.

Op de afhankelijkheid van de verticale verlichtingssterkte is een van voordelen van de tegenstraalverlichting gebaseerd: door de verticale verlichtingssterkte te reduceren, blijft het contrast steeds negatief, en een contrast van (bijna) nul komt niet voor. Overigens is het interessant op te merken dat sommigen aan de hand van dezelfde redenering de zgn. "pro-beam"-verlichting in tunnels propageren: door het licht met de rijrichting mee te laten schijnen, blijft het contrast altijd positief (zie bijv. Ketvirtis, 1990, zie ook Hoofdstuk 4).

4. Functionele gezichtspunten

In par. 3.3.2 hebben we de "functionele benadering" besproken. Daarbij is ervan uitgegaan dat verlichting (ook tunnelverlichting) een aantal functies heeft. Voor verkeerstunnels zijn de doorstroming en de veiligheid van het gemotoriseerde wegverkeer de meest belangrijke.

Meer concreet gaat het om de bevorderen van de waarneembaarheid van de relevante visuele objecten. In par. 3.1.4 hebben we toegelicht dat het daarbij niet zozeer gaat om het detecteren van kleine, verticale, diffuus reflecterende, stationaire obstakels, maar meer om het herkennen van andere verkeersdeelnemers en het opvallend zijn van lichtbronnen, wegmarkeringen en andere hulpmiddelen die de (optische) geleiding mogelijk maken of ondersteunen.

Het in het eerdere gedeelte van deze paragraaf besproken standaardobject is niet erg geschikt om deze visuele vereisten te kunnen beschrijven. De redenen daarvoor zijn al eerder genoemd: bij de waarneming van (andere) verkeersdeelnemers gaat het vooral om contrasten tussen delen van de voertuigen, waarbij glimplekken, maar vooral ook signaallichten van belang zijn. Deze contrasten zijn van veel groter belang dan het contrast tussen het voertuig en de weg of de wand van de tunnel. Bij de waarneming van de

lichtbronnen (de belangrijkste factor bij de geleiding bij tunnelingangen) gaat het vooral om de luminantie van de lichtbronnen zelf (Narisada et al., 1977) en niet om het contrast tussen de lichtbronnen en de omgeving. Bij wegmarkeringen tenslotte, die van belang zijn bij de ondersteuning van de geleiding, gaat het wel om het contrast tussen het object (de markering) en het wegdek, maar ook die visuele situatie is niet te beschrijven met een diffuus, verticaal object.

Deze overwegingen zijn vooral gebaseerd op theoretische studies, en op een aantal pilot-experimenten, die in par. 3.1.4 zijn besproken. Voor de praktijk van de tunnelverlichting is nog weinig onderzoek verricht. Deze overwegingen zijn, op verkeerstunnels toegespitst, door Padmos (1984) en Schreuder (1984) in grote lijnen aangestipt.

5. Discussie

Uit de bespreking van de mate waarin het "standaardobject" kan gelden als kenmerk (als karakterisering) voor de visuele taak bij de waarneming in verkeerstunnels komt naar voren dat dit slechts zeer ten dele het geval is. Het gaat daarbij niet zozeer om de afmetingen en de waarnemingstijd van het object, en zelfs niet om het te kiezen contrast, maar vooral om het feit dat de visuele aspecten van de verkeerstaak niet in voldoende mate kunnen worden beschreven in termen van de detecteerbaarheid van een klein, verticaal, diffuus reflecterend, stationair obstakel, maar meer om het herkennen van andere verkeersdeelnemers en het opvallend zijn van lichtbronnen, wegmarkeringen en andere hulpmiddelen die de (optische) geleiding mogelijk maken of ondersteunen. Zie par. 3.1.

Dit inzicht is niet algemeen doorgedrongen. Vrijwel zonder een enkele uitzondering wordt bij alle overwegingen die te maken hebben met de voor- en nadelen van verschillen in de lichtinvalsrichting in tunnels uitgegaan van het "standaardobject" of van objecten die er heel veel op lijken. Dit geldt zowel voor de besprekingen van tegenstraalverlichting, van traditionele (symmetrische) verlichting als voor de bespreking van de "pro-beam"-verlichting. De consequenties van deze constatering zijn mogelijk van verstrekende betekenis: de theoretische beschouwingen omtrent de lichtinstraalrichting zijn slechts van beperkte waarde, terwijl de kostenvergelijkingen tussen de systemen mogelijk foutieve uitslagen kunnen opleveren: het is niet uitgesloten dat de voordelen in kosten van tegenstraalverlich-

ting verdwijnen wanneer een meer realistische visuele taak wordt gedefinieerd. Zeker is dat niet, maar de mogelijkheid moet worden onderzocht.

6. Conclusie

Naast een onderzoek betreffende de technische (constructieve) merites van tegenstraalverlichting, is het wellicht een van de belangrijkste oogmerken van het voorgestelde onderzoek in Nederland om iets meer over het relatieve belang van de verschillende visuele objecten in tunnels te weten te komen, en om vervolgens de lichttechnische eisen aan te passen aan die aangevulde kennis, waarbij de vergelijking in kosten (aanleg, onderhoud en energie) en de vergelijking in kosten/baten een onderdeel van het onderzoek dienen uit te maken.

5.1.3. Berekening van de contrastfactor

Uitgaande van het "standaardobject" (zie het commentaar in par 5.1.2, punten 5 en 6!) is door Blaser de contrastfactor ingevoerd ("Kontrastgüteparameter; Blaser, 1981, par. 2.2). Deze is als volgt gedefinieerd:

$$CF = 1 \frac{(\rho)}{(\pi)} * (L_2/E_V)^{-1} \quad [5]$$

Hierin is CF de contrastfactor, (ρ) de diffuse reflectie van het voorwerp, L_2 de wegdekkluminantie ter plekke, en E_V de verticale verlichtingssterkte op het object. Naar mate de verlichting sterker "tegenstralig" wordt, neemt de contrastfactor toe (Blaser, 1981, blz. 5).

Aan de hand van deze factor, en uitgaande van de "0,1-regel" van Schreuder (1964), een aantal berekeningen uitgevoerd voor verschillende typen wegdekken. Zoals te verwachten is, blijkt zowel de tegenstraling als een glad wegdek van belang te zijn voor de grootte van de contrastfactor. De gegevens van Blaser (1981) zijn overgenomen in Tabel 6.

In het bedoelde rapport, dat de "klassieker" van de tegenstraalverlichting is, worden voorts een aantal specifieke gevallen doorgerekend. Deze bieden geen fundamenteel nieuwe gezichtspunten.

Iets dergelijks geldt voor de studie van Stolzenberg (1984). Aan de hand van dezelfde uitgangspunten worden, op overzichtelijke wijze, een aantal

berekeningen uitgevoerd, waarbij bovendien met de verblinding ("disability glare") rekening is gehouden.

Zoals te verwachten bij een dergelijk belangrijk onderwerp, zijn er een vrij groot aantal publikaties te noemen die allen ongeveer dezelfde gegevens bevatten. Steeds wordt uitgegaan van het "standaardobject", en steeds worden een aantal gevallen doorgerekend. Meestal houdt men de "0,1-regel" aan, en vaak wordt rekening gehouden met de verblinding. Geen wonder dat al deze publikaties op hetzelfde neerkomen. We zullen er (volledigheids-halve) een aantal noemen, zoals bij voorbeeld: Adrian (1989); Anon (1979a); Artom et al. (1984); Blaser & Dudli (1982); Müller & Riemen-schneider (1975); Novellas (1982); Vos & Padmos (1983); Westermann (1975).

We hebben reeds opgemerkt, dat zeer vergelijkbare, en vaak dezelfde argu-menten worden gebruikt bij de "verdediging" van de traditionele (symmetri-sche) verlichting. Zie bij voorbeeld: Narisada (1975); Narisada et al. (1984); Sarteel (1986,1986a); Van Bommel (1983); Van den Bijllaardt (1975); Westermann (1975). Maar ook de "verdedigers" van de "pro-beam"-verlichting gebruiken dezelfde argumenten. Zie bijvoorbeeld Anon (1983); Ketvirtis (1986, 1986a, 1990); McCullough & Ketvirtis (1983).

Het behoeft geen betoog dat, gezien eerder (in par 5.1.2, punt 6) is ge-zegd, aan al deze publikaties niet al te veel waarde moet worden gehecht. Zoals reeds is aangegeven is het wellicht één van de belangrijkste oog-merken van het voorgestelde onderzoek in Nederland om iets meer over het relatieve belang van de verschillende visuele objecten in tunnels te weten te komen.

Een factor die in meer recent in de beschouwingen naar voren is gekomen, is de vergelijking tussen de verschillende systemen wat betreft het ener-giegebruik. Algemene gegevens zijn moeilijk te verschaffen, omdat het energiegebruik sterk afhangt van allerlei lokale factoren van bouw, mate-riaalkeuze, verlichtingsontwerp en energiekosten. Een belangrijke studie is die van Meseberg (1990), waar is aangegeven dat met tegenstraalverlich-ting een besparing van 40% in energiekosten tot de mogelijkheden behoort. Ook dit punt dient, zoals reeds is aangegeven, nader te worden onderzocht. Aan de hand van de contrastfactor kan een indeling van tunnelverlichtings-installaties worden gemaakt. Blaser (1981) heeft een voorbeeld hiervan

gegeven; dit voorbeeld is gebaseerd op de berekeningen die in Tabel 6 zijn weergegeven. Ook verschillende aanbevelingen maken hiervan gebruik. Gewoonlijk worden verschillende waarden van de luminantie voor de drempelzone, of verschillende waarden voor de verhouding van de luminanties op de open weg en de drempelwaarden aanbevolen voor verschillende waarden van de contrastfactor (voor verschillende typen verlichting dus). Zie bijvoorbeeld: CIE (1990), NSvV (1990).

5.2. Experimenten

5.2.1. Ervaringen met tegenstraalverlichting

In de loop van de jaren zijn heel wat experimenten over tegenstraalverlichting uitgevoerd, vooral in Zwitserland, maar ook in Frankrijk, Oostenrijk en Italië. In Hoofdstuk 4 hebben we reeds één en ander dienaangaande vermeld. We zullen hier nog enige interessante aspecten die uit de experimenten naar voren kwamen, de revue laten passeren.

Zoals in Hoofdstuk 4 al is beschreven, zijn de eerste SON-lampen, ook in Zwitserland, gebruikt in traditionele installaties. Een overzicht van deze tunnels en hun verlichting is gegeven in Anon (1968, 1969). De belangrijkste proef was die in de tunnel Costoni di Fieud werd een asymmetrische lichtverdeling gebruikt om de wand van de tunnel, die in een scherpe bocht ligt, aan te stralen.

Zoals eveneens in Hoofdstuk 4 is vermeld, zijn de eerste installaties voor tegenstraalverlichting in Zwitserland zijn in de toegangsweg van de Gotthard-autosnelweg aangelegd. Men is begonnen met zeer extreme tegenstraalverlichting toe te passen. Deze installaties bleken niet te voldoen: de verblinding was zeer sterk, de wanden van de tunnel bleven zeer donker, en het wegverloop was niet behoorlijk te zien. Deze proeftunnels is nauwelijks beschreven in de literatuur; misschien heeft dit te maken met de slechte ervaringen die men in het begin ermee heeft opgedaan. Enige gegevens zijn verschaft in Anon (1981, 1981a, 1990).

De betekenis van deze experimenten is vooral historisch. Zoals reeds enige malen is aangegeven, is over de eerste experimenten weinig vastgelegd. Daarom is het moeilijk om na te gaan waarom de experimenten onbevredigend

waren. Voorts is bij de experimenten, waarbij detectieproeven zijn gedaan, steeds uitgegaan van het (stationaire) "standaardobject" zodat deze experimenten weinig zeggen over de situaties zoals die zich in het werkelijke verkeer kunnen voordoen. Ofschoon er enige op zichzelf interessante experimenten zijn uitgevoerd, is het niet mogelijk om met een redelijke mate van zekerheid een uitspraak te doen over de praktische merites van tegenstraalverlichting. Nader onderzoek is dus gewenst.

De tegenstraalverlichting wordt in Zwitserland als de "standaardoplossing" voor tunnelingangen beschouwd (Anon, 1990). Deze gewoonte is meer gebaseerd op de praktijkervaring dan op de uitkomst van de experimenten die daarover zijn uitgevoerd. De praktijkervaring is gunstig; het is echter niet gemakkelijk na te gaan of de gunstige ervaring uitsluitend het resultaat is van de tegenstraalverlichting. De tegenstraalverlichting wordt meestal in nieuwe tunnels toegepast, die ook in andere opzichten (lichtniveau, keuze van bouwmaterialen, "Linienführung") beter zijn dan oude tunnels. Iets dergelijks geldt voor Oostenrijk, waar tegenstraalverlichting ook op grote schaal wordt toegepast.

5.2.2. Experimenten met tegenstraalverlichting

De uit de extreme tegenstraalverlichting ontwikkelde "matige" tegenstraalverlichting (ook wel "asymmetrische verlichting" genoemd) blijkt minder bezwaren te hebben - maar ook minder voordelen te bieden. Zoals hierboven reeds is aangegeven, zijn hierover meer gegevens beschikbaar. We kunnen vermelden: Anon (1974a); McCullough & Ketvirtis (1983); Müller & Riemenschneider (1975); Novellas (1982).

Narisada et al. (1977) hebben een aantal laboratoriumproeven beschreven waarbij is onderzocht welke luminantie de lichtbronnen in een tunnel moeten hebben om van buiten duidelijk genoeg zichtbaar te zijn om als geleidingsmiddel te kunnen fungeren. Deze proeven zijn toegespitst op de gevallen waarbij een "volwaardige" tunnelverlichting uit verkeersoverwegingen niet gerechtvaardigd is, en uit kostenoverwegingen niet kan worden verdedigd. De resultaten zijn ook voor tunnels met tegenstraalverlichting van belang. De resultaten zijn samengevat in Tabel 7.

5.2.3. De proeven in de Schöneegg-tunnel

Op 17 februari 1978 is in de Schöneegg-tunnel in de buurt van Arth-Goldau op de Zwitserse N4 een belangrijke serie waarnemingsproeven uitgevoerd (Anon, 1978a, Walthert, 1978a). Daarbij is de waarneembaarheid van objecten vergeleken bij tegenstraalverlichting en bij symmetrische verlichting. De waarneembaarheid werd subjectief beoordeeld. Een aantal verschillende objecten werd beoordeeld: een "gestileerd" object (een verkeerskegel) alsmede een aantal "realistische" objecten (koffer, gevallen fietser, knalpot, staande persoon). In alle gevallen werd de waarneembaarheid bij tegenstraalverlichting beter beoordeeld dan bij symmetrische verlichting. De resultaten waren echter alleen bij de verkeerskegel statistisch significant. De lichttechnische metingen die bij deze waarnemingen horen, zijn beschreven door Adrian (1978).

Tenslotte zijn ook dynamische zichtbaarheidsmetingen uitgevoerd. Deze zijn beschreven door Mäder (1978). Als object (obstakel) fungeerde een verkeerskegel met een (diffuse) reflectie van 20%. Het obstakel werd op een aantal vaste, van te voren uitgezochte plaatsen neergezet, onbekend aan de waarnemers. Per rit reden vier tot vijf waarnemers mee, die allen tegelijk de waarnemingen deden. Het uitzicht uit de auto was daarbij waarschijnlijk voor alle waarnemers verschillend. In totaal zijn ca. 260 waarnemingen gedaan. De resultaten waren:

- Bij gelijke luminantie was de detectie-afstand bij tegenstraalverlichting voor alle plaatsten van het obstakel "duidelijk significant" groter dan voor de symmetrische verlichting.
- Bij een situatie waarbij de luminantie bij de tegenstraalverlichting ca. 3/4 was van de luminantie van de symmetrische verlichting, was de detectie-afstand bij tegenstraalverlichting voor alle plaatsten van het obstakel "matig significant" groter dan voor de symmetrische verlichting (de termen "duidelijk significant" en "matig significant" zijn niet nader toegelicht).
- In het overgrote deel van de gevallen werd de detectie-afstand - zowel voor de tegenstraalverlichting als voor de symmetrische verlichting - als onvoldoende beschouwd.

Riemenschneider (1978) heeft uit deze metingen geconcludeerd dat "...with asymmetric lighting we can reduce luminance level L_2 to 50% of the level which is necessary with symmetric lighting."

5.2.4. Experimenten in de tunnel bij Wevelgem

De internationale discussies over de voor- en nadelen van tegenstraalverlichting, zoals die vooral binnen de CIE, maar ook binnen de PIARC, plaatsgevonden, hebben aanleiding gegeven tot een experiment in België. In de tunnel van Wevelgem werd daartoe naast de bestaande "traditionele" symmetrische verlichting een tegenstraalverlichting aangebracht. Na een zekere tijd zijn de armaturen van de tegenstraalverlichting omgedraaid, zodat ook de meestralende verlichting kon worden onderzocht. De drie ter discussie staande systemen konden dus direct worden vergeleken: de tegenstraalverlichting, de "traditionele" symmetrische verlichting en de meestralende verlichting. De verlichtingen konden door in- en uitschakelen van lampen worden gewisseld. De tunnel was normaal voor het verkeer opengesteld. In de tunnel werden allerlei metingen verricht; de installatie werd, mede wat betreft de economische aspecten, doorgerekend, terwijl tenslotte ook rijproeven zijn uitgevoerd. De tunnel, en de in de tunnel verrichte experimenten, zijn in detail beschreven door Dijon (1990).

De experimenten werden uiteraard in aanzienlijke mate beperkt door de beperkingen die door de tunnel zelf werden opgelegd. Het gaat om een tunnel in een autosnelweg met gescheiden rijbanen in de buitenwijken van Brussel. De tunnel is 467 m lang en bestaat uit twee, ieder 14,25 m brede buizen met drie rijstroken. Het wegdek is voorzien van een standaard diffuus reflecterende deklaag. De tunnel, die onder een vliegveld ligt, ligt in een vlakke omgeving; boven de tunnel is de hemel vrijwel onbeperkt zichtbaar. Over de ligging, de uitrusting en de installatie van de tunnel is uitgebreid gerapporteerd (Dijon, 1990). In dit rapport zijn ook de uitkomsten van de berekeningen en van de metingen neergelegd.

Binnen de beperkingen van de tunnel is nauwelijks verschil tussen de twee verlichtingssystemen geconstateerd. Volgens een mondelinge toelichting is dat waarschijnlijk vooral het gevolg van het in de tunnel aanwezige wegoppervlak, dat lichtgekleurd is en dat diffuus reflecteert ($S_1 = 0,16$; $q_0 = 0,10$; Dijon, 1991). Ook het daglicht dat de tunnel bij de ingang binnenvalt, blijkt een aanzienlijke invloed te hebben.

5.2.5. Experimenten met meestraling

Walther (1976) vermeldt aan de hand van experimenten dat bij "meestra-

ling" de hinder door verblinding via de autospiegel zeer hinderlijk is; daarom beveelt hij aan om tegenstraal alleen in tunnels met éénrichtingsverkeer toe te passen. Dit punt wordt niet vermeld in de beschrijvingen van de onderzoekingen betreffende de "pro-beam"-verlichting (meestralende verlichting), zoals Anon (1983); Ketvirtis (1986, 1986a, 1990); McCullough & Ketvirtis (1983). Waarschijnlijk heeft dit te maken met het feit dat de experimenten met meestralende verlichting vrijwel uitsluitend statisch zijn uitgevoerd. In een pilot-experiment met meestralende verlichting in de Heinenoord-tunnel in Nederland is overigens hetzelfde geconstateerd.

In McCullough & Ketvirtis (1983) zijn detectieproeven beschreven waarbij tegenstraling, meestraling en symmetrische verlichting zijn vergeleken. De auteurs trekken de conclusie dat meestraling te verkiezen is, vooral omdat daarbij de kans op een zone waarbij het contrast zeer klein (of nul) is, minder groot is. Deze gedachte sluit aan bij de Noord-Amerika vaak gehuldigde gedachte dat het bij de straatverlichting gaat om het waarborgen van de "visibility index"; meer speciaal om het waarborgen van de "small target visibility STV". We hebben reeds enige malen aangegeven dat deze gedachte niet goed aansluit bij de moderne ideeën over de verkeerstaak (de rijtaak) van automobilisten.

Een meer realistische kijk op de te detecteren objecten is recentelijk gegeven door een andere voorstander van meestralende verlichting. (Grothers, 1990). Er wordt op gewezen dat de meest belangrijke rijtaak-elementen niet met stationaire, maar met bewegende objecten te maken hebben. Enige summiere metingen zijn daarbij beschreven. De metingen betreffen echter niet meer dan enige luminantiemetingen van een paar stationaire objecten met verschillende reflectie-factoren die in een tunnel waren geplaatst. De proefnemingen zelf voegen dus niets nieuws toe. Misschien het meest interessante van de publikatie is misschien wel het feit dat Ketvirtis tot de verdedigers van de tegenstraalverlichting wordt gerekend. Daarbij wordt verwezen naar twee recente, in 1990 (nog) niet gepubliceerde rapporten van Ketvirtis (1988, 1989).

Van belang zijn voorts de proefnemingen van Narisada et al. (1984). Uit de daar beschreven experimenten blijkt dat het wenselijk is om de achterzijde van voorrijdende auto's goed te kunnen waarnemen; daarbij is meestraling uiteraard te verkiezen boven tegenstraling.

5.2.6. Overige rijproeven

Er zijn slechts zeer weinig rijproeven uitgevoerd in tunnels. De enige proeven waarbij tegenstraalverlichting is vergeleken met symmetrische verlichting, zijn de proeven die zijn samengevat door Riemenschneider (1978), en die eerder zijn beschreven. Alle andere dynamische proeven betreffen tunnels met symmetrische verlichting. We vermelden daarvan de proeven uitgevoerd door Bonomo (1980); door Schreuder (1989, 1990, 1990a, 1991, 1991a) en door Yoshikawa (1991). Bonomo heeft de detectie-afstand bepaald van kleine, stationaire objecten. Het resultaat was dat de waarneembaarheid in de meeste gevallen (net als bij de Zwitserse proeven) als onvoldoende moest worden gekwalificeerd. Anders is het bij de resultaten van de proeven van Schreuder en van Yoshikawa. Daar werd het minimale contrast, nodig voor waarneming van cijfers met verschillend contrast, bepaald. Het resultaat is dat voor de moderne, aan de aanbevelingen voldoende, verlichting, de waarneembaarheid redelijk lijkt te worden gewaarborgd. Een voorzichtige conclusie zou kunnen zijn dat het inderdaad niet juist is om de kwaliteit van de tunnelverlichting af te meten aan de waarneembaarheid van kleine stationaire objecten.

5.2.7. Conclusie

Uit de hier opgesomde resultaten van proefneming in tunnels blijkt opnieuw dat de keuze van het object van groot belang is. Wanneer men de resultaten van Narisada et al. (1984) vergelijkt met de resultaten van Mäder (1978) en Walthert (1978), dan kan men de voorzichtige conclusie trekken dat de tegenstraalverlichting voordelen biedt in tunnels met weinig verkeer, maar dat in drukke tunnels deze voordelen wel eens gering zouden kunnen blijken te zijn. Nadere studie is dus gewenst.

6. PROEFNEMINGEN IN NEDERLAND

6.1. Oogmerk van de proefnemingen

In Nederland worden momenteel proefnemingen op het gebied van de tegenstraalverlichting overwogen. Het belangrijkste oogmerk van deze proefnemingen is om na te gaan of tegenstraalverlichting onder de in Nederland prevalerende omstandigheden een besparing (in kosten en/of in energie) kan opleveren in vergelijking tot de "traditionele" verlichting. Traditioneel kan zijn: toepassing van lichtroosters, of toepassing van symmetrische verlichting.

Een tweede oogmerk is om na te gaan of de uitgebreide ervaring die in de Alpenlanden is opgedaan, ook voor Nederland kan worden gebruikt. Het gaat daarbij om kwesties van meting en projectering van de installaties, maar ook om de toepasbaarheid van de in Zwitserland in gebruik zijnde verlichtingssystemen. Van belang is daarbij de vervuiling, die in de (drukke) Nederlandse tunnels ernstiger kan zijn dan in de Alpentunnels.

In de Alpenlanden, vooral Zwitserland is immers ruime ervaring met tegenstraalverlichting opgedaan, die in de praktijk over het algemeen als gunstig wordt beschouwd. Wetenschappelijk gefundeerde afwegingen tussen de voor- en nadelen zijn echter, zoals uit Hoofdstuk 4 en 5 blijkt, ook daar nog niet systematisch uitgevoerd. Gezien de grote verschillen in geografische en geologische omstandigheden, in bebouwing en verkeer, en in de praktijk van de bouw en uitmonstering van tunnels is het onzeker in hoeverre de gunstige ervaringen van Zwitserland op de Nederlandse situatie van toepassing zijn. De in par. 5.2.4 beschreven experimenten die in de buitenwijken van Brussel (Wevelgem) zijn uitgevoerd, hebben geen duidelijk beeld gegeven wat van tegenstraalverlichting in een vlak land als Nederland te verwachten is. Tenslotte bestaat in Nederland geen praktische ervaring met dit systeem.

Om te onderzoeken of voor Nederlandse tunnels het tegenstraalverlichtingssysteem voordelen biedt, zal in de tunnel te Velsen een onderzoek worden gedaan ter plaatse van het noordelijke zonwerende rooster. Voor deze oplossing is gekozen omdat aldaar problemen zijn geconstateerd met de overgang van buiten naar binnen.

Het opzetten en de uitvoering van de proefnemingen vormen een apart project. Het onderhavige rapport dient in eerste instantie als een verzameling van het ten behoeve van dit project beschikbare kennis (gepubliceerd en niet-gepubliceerd). De opzet en uitvoering van de onderzoeken worden hier niet in detail besproken. Wel is het nodig om enige beginselen van de proefnemingen aan te geven, met name om te kunnen nagaan of de resultaten van de proefnemingen ook inderdaad een antwoord kunnen geven op de gestelde vragen.

6.2. Opzet van de proefnemingen

Doel van het onderzoek is in de eerste plaats om vast te stellen of het in Zwitserland veelvuldig toegepaste systeem ook in Nederland toepasbaar is. Maar tegelijkertijd kan onderzocht worden of de nieuw ontwikkelde methode voor het bepalen van de verlichting voor de ingangszone's van tunnels tot bruikbare resultaten leidt.

Het onderzoek zal uit een aantal fasen bestaan.

Fase 1. Verzamelen van de gegevens.

Fase 2. Ontwerpen en uitvoeren van de installatie voor tegenstraalverlichting in de tunnel te Velsen.

Fase 3. Beoordelen van het nut van tegenstraalverlichting voor de Nederlandse situatie (evaluatie).

Fase 4. Rapportage.

6.3. Uitvoering van de proefnemingen

In de Velsertunnel zullen een aantal armaturen worden aangebracht waarmee een tegenstraalverlichting kan worden gerealiseerd. Het verdient aanbeveling om de voorhandene traditionele verlichting (lichtroosters en armaturen) niet te verwijderen, zodat een directe vergelijking tussen de twee systemen kan worden gemaakt. Voor de keuze van de armaturen zal gebruik worden gemaakt van de door de Zwitserse wegbeheerders beschikbaar gestelde gegevens.

De proefnemingen omvatten de volgende delen:

- fotometrische metingen in de tunnel van de installaties (luminanties; verlichtingssterkten; verblinding);

- lichttechnische metingen bij de tunnelingang ter bepaling van de L_{seq} ;
- waarnemingsproeven (dynamische contrastmetingen) in de tunnel ter bepaling van de waarneembaarheid van "standaardobjecten" en van realistische objecten.

Deze onderdelen zijn nodig om na te gaan of de twee te vergelijken systemen (tegenstraal en traditioneel) wat betreft de waarneembaarheid gelijkwaardig zijn; immers alleen dan heeft een vergelijking van de kosten die met de systemen zijn gemoeid (daarbij behorend de gebruikte energie) enige waarde.

Overwogen wordt om ten behoeve van het uitvoeren van lichttechnische metingen en van waarnemingen een volledig meetsysteem te creëren. Dit meet-systeem vormt een apart project, waarvoor de eerste voorbereidingen zijn getroffen. Wat betreft de drie hierboven genoemde onderdelen kan reeds nu het volgende worden opgemerkt:

- Voor de meeste fotometrische metingen van de installaties zijn meetmethoden beschikbaar (luminanties; verlichtingssterkten; verblinding; reflectie van de wanden); voor de bepaling van de reflectie-eigenschappen van het wegdek is een systeem in verregaande staat van voorbereiding (Schreuder, 1991j). Een integratie van deze onderdelen dient echter nog te worden uitgevoerd. Ook voor de lichttechnische metingen bij de tunnelingang ter bepaling van de L_{seq} , zijn methoden uitgewerkt; het is momenteel niet duidelijk wie dergelijke metingen (in Nederland) kan uitvoeren.
- De waarnemingsproeven (dynamische contrastmetingen) in de tunnel kunnen worden gebaseerd op de eerder uitgevoerde metingen ten behoeve van de bepaling van de veldfactor (Schreuder, 1990a, 1991a). De methode dient echter aan de gewijzigde experimentele vraag te worden aangepast. Ook hiervoor wordt momenteel een voorstel uitgewerkt. Het vormt een onderdeel van het hierboven genoemde meetsysteem.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1. Conclusies

De belangrijkste conclusies die uit deze literatuurstudie kunnen worden getrokken, zijn:

1. Tegenstraalverlichting heeft belangrijke voordelen, maar die zijn nog niet onder Nederlandse omstandigheden vastgesteld.
2. Tegenstraalverlichting komt alleen voor de ingang van lange tunnels en mogelijk voor korte tunnels in aanmerking en niet voor het interieur van tunnels.
3. Tegenstraalverlichting levert bij gelijke horizontale verlichtingssterkte een hogere wegdeklluminantie op. Het is niet bekend of ook bij gelijke geïnstalleerde lichtstroom een voordeel overblijft.
4. Bij tegenstraalverlichting wordt bij gelijke lichtstroom het contrast tussen kleine, stationaire, diffuus reflecterende, voorwerpen en hun directe achtergrond groter.
5. Voor bewegende objecten (auto's) en voor objecten met glimmende onderdelen is dit voordeel niet relevant.
6. Door een extreme tegenstraling te vermijden, zijn storingen door ongelijkmatige luminantieverdeling op wegdek en wanden, door verblinding en door flikkereffecten te vermijden.
7. Tegenstraalverlichting heeft vooral voordelen in tunnels met betrekkelijk weinig verkeer. In zeer drukke tunnels heeft een symmetrische verlichting of zelfs een meestralende verlichting bepaalde voordelen. Nader onderzoek is dien aangaande gewenst.
8. De in Nederland gebruikelijke constructie van de tunnel, en de hoofdafmetingen ervan (vooral de hoogte) maken nadere studie nodig om na te gaan of tegenstraalverlichting ook in Nederland met succes is toe te passen.
9. De toepassing van retroreflecterende wegmarkeringen kan, zowel bij tegenstraalverlichting als bij andere verlichtingswijzen, een bijdrage leveren tot de visuele geleiding bij tunnelingangen.
10. Er zijn aanwijzingen dat de toepassing van drainerende wegdekken (ZOAB) de eventuele voordelen van tegenstraalverlichting ten dele te niet kan doen.

7.2. Aanbevelingen

1. Het wordt aanbevolen in Nederland een aantal proefnemingen uit te voeren ter bepaling van de voor- en nadelen voordelen van tegenstraalverlichting voor de in Nederland relevante omstandigheden van landschap, weer, klimaat en verkeer;
2. Het wordt aanbevolen een meetsysteem te creëren waarmee de kwaliteit van verschillende systemen kan worden vastgesteld.

LITERATUUR

- 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. (1988). Roadway visibility; Various approaches. In: TRB (1988).
- Adrian, W. (1989). Visibility of targets: Model for calculation. Lighting Res. Technol. 21(1989)181-188.
- Anon. (1968). Bemerkenswerte Beleuchtungsanlagen in neuen Tunnels des schweizerischen Nationalstrassennetzes. Elektrizitätsverwertung 43(1968)-354-362.
- Anon. (1968a). Leitsätze für öffentliche Beleuchtung. 2. Teil. Strassentunnel und -Unterführungen. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Zürich, 1968.
- Anon (1969). Tunnel lightings by Novelectric. Novelectric Inc., Buchs ZH, 1969 (Jaartal geschat).
- Anon. (1969a). Fourth annual NASA-University Conference on Manual control, University of Michigan, Ann Arbor, March 21-23, 1968. NASA SP-192. NASA, Washington, DC., 1969.
- Anon. (1970). Die Beleuchtung von Strassentunneln. Aktuelle Lichttechnik Beispiel No 2. AEG, 1970.
- Anon. (1972). Intertraffic '72. RAI, Amsterdam, 1972.
- Anon. (1973). Recommendations for the lighting of vehicular traffic tunnels (partial translation). Japan Highway Public Corporation, 1973.
- Anon. (1973a). Wegverlichting en oppervlaktetextuur. Wegen 47(1973) 320-334.
- Anon. (1974). Das Prinzip der Gegenstrahlbeleuchtung für Strassentunnels. Alumagazin, Zürich, April 1974.
- Anon. (1974a). Als Beispiel die Beleuchtung des Leimerntunnels. Alumagazin, Zürich, April 1974.
- Anon. (1974c). Das Prinzip der Gegenstrahlung für Strassentunnels Alumagazin, Zürich, April 1974.
- Anon. (1975). Symposium on tunnel lighting. Lighting Res. Technol. 7(1975)85-105.
- Anon. (1975a). Proceedings of the First international Congress on Vision and road safety. Paris, 1975.
- Anon. (1975b). Report of the technical committee on road tunnels. PIARC, Mexico, 1975.
- Anon. (1977). Thorold tunnel visibility study. Final edition. Ministry of Transport and Communication & Fenco Ltd. Ontario, 1977.
- Anon. (1978). Tunneltagung Innsbruck. 12. Oktober 1978. Österreichische Lichttechnische Arbeitsgemeinschaft, 1978.
- Anon. (1978a). Bericht über die Messung des Schöneegg-Tunnels vom 17-2-1978. (Niet gepubliceerd).
- Anon. (1979). Mont-Blanc-Tunnel. ILR 30(1979)78-79.
- Anon. (1979a). Leuchtdichten von Einfahrzonen. Notitie SLG FG 52 (Niet gepubliceerd). Zürich, SLG, 1979 (Bijlagen).
- Anon. (1979c) Report of the technical committee on road tunnels. PIARC, Vienna, 1979.
- Anon. (1981). Schrägstrahl-Gegenstrahl-Tunnelbeleuchtungsprinzip. Dokumentation in Bildern (Niet gepubliceerd). Bernische Kraftwerke AG Bern, Büro für Beratungs- und Kundendienst. Bern, 1981 (Jaartal geschat).
- Anon. (1981a). Documentation sur l'éclairage des tunnels courts en Suisse avec solution spécial. Service Fédéral des Routes, Berne, 1981 (Niet gepubliceerd).

- Anon (1983). Programmable lighting systems; Their effect on drivers performance, traffic safety and energy management. Part I (Executive summary). Ministry of Transportation and Communications, Ontario, 1983 (jaar-tal geschat). In: CIE (1984a).
- Anon. (1987). Technical Report: Tunnel Lighting. PIARC Congress Brus-sels September 1987. PIARC, Paris, 1987.
- Anon. (1987a). Metingen op weg 141 van september 1986 tot juni 1987 (In het Deens). Vejdirektoratet, 1987.
- Anon. (1988). Strassen und Verkerhr 2000 - Internationale Strassen- und Verkehrskonferenz Berlin 6-9 September 1988. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 1988.
- Anon. (1988a). Les enrobés drainants. Demi-journée d'études, le 25 Octobre 1988. Centre de Recherches Routiers, Bruxelles, 1988.
- Anon. (1988b). Zeer open asfaltbeton: Zichtbaar beter. 3M-Reflex, no 7, mei 1988, blz.5-6.
- Anon. (1988c). Vision in vehicles II. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988.
- Anon. (1988d). Enrobés drainants. Note d'information No 40. Rev. Gén. Routes Aérodr. No 654 (1988), juillet-aout, pp.37-44.
- Anon. (1989). Metingen op weg 141 van september 1987 tot september 1988. (In het Deens). Vejdirektoratet, april 1989.
- Anon. (1989a). Metingen op weg 141 van september 1986 tot september 1988 (In het Deens). Vejdirektoratet, juni 1989.
- Anon. (1990). Schweizerische Nationalstrassen; Informationen. Stand 1.1.91. Bundesamt für Strassenbau, Bern, 1990 (jaar-tal geschat).
- Anon. (1990a). Notes on retroreflection properties of road markings. Light & Optics, Lyngby, Danmark, 1990.
- Artom, M.; Bonomo, M. & Soardo, P. (1984). Optimizing of tunnel lighting. Paper prepared for V Lux Europa, 1984 (Jaartal geschat).
- Armour, M.; Carter, R. E.; Cinquegrana, C.; Griffith, J. R. (1989). Study of single vehicle rural accidents (Volume 1). Accident data report. (GR/89/4). Road Traffic Authority, 1989.
- Asmussen, E.(1972). Transportation research in general and travellers decision making in particular as a tool for transportation management. In: OECD, 1972.
- Asmussen, E. (1972a). Mogelijkheden en beperkingen van de verkeersdeel-nemer als uitgangspunten voor het gebruik van hulpmiddelen in het verkeer. In: Anon (1972).
- Baumann, E. (1980). NZ Beckenried - Flüelen: Strecke frei. Automobil-revue 75(1980)51;1-3.
- BGC (1990). Verlichting op niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom; Effecten en niveaus. RWE/917/09/Mn. Bureau Goudappel Coffeng, Deventer, 1990.
- Blaauw, G.J. (1983). Requirements for markings and raised pavement markers. In: CIE (1983a).
- Blaauw, G.J. & Padmos, P. (1981). De zichtbaarheid 's nachts van weg-markeringen op droge en natte wegen. IZF 1981 C-20. IZF-TNO, Soesterberg, 1981.
- Blaauw, G.J. & Riemersma, J.B.J. (1975). Interpretation of roadway design by an analysis of drivers' visual scanning and driver behaviour on straight and curved roadway sections. Report IZF 1975-C5. IZF-TNO, Soes-terberg, 1975.
- Blackwell, H.R. (1946). Contrast thresholds of the human eye. J. Opt. Soc. Amer. 36(1946)624-643 (Ref. CIE, 1984).
- Blaser, P. (1981). Die Gegenstrahlbeleuchtung in der Einfahrzone von Strassentunneln. Bull. SEV 72(1981)991-996.

- 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.
- Blaser, P. (1991). Mondelinge toelichting op Blaser (1990). In: CEN, (1991).
- Blaser, P. & Dudli, H. (1982). Die Sichtverhältnisse in der Einfahrzone von Strassentunneln mit Gegenstrahlbeleuchtung. In: *SLG* (1982), pp. 417-421.
- 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.
- Broadbent, D. (1958). *Perception and communication*. Pergamon Press, London, 1958.
- BSI (1986). Road lighting. Part 7. Code of practice for the lighting of tunnels and underpasses. Draft Revision. BS 5489. BSI, London, 1986.
- Burghout, F. (1971). Reflection properties of road surfaces for motor-car lighting. CIE, Barcelona, 1971.
- Burghout, F. (1977). Kenngrößen der Reflexionseigenschaften von trockner Fahrbahndecken. *Lichttechnik* 29(1977)23.
- Burghout, F. (1977a). Simple parameters significant of the reflection properties of dry road surfaces. In: CIE 1977.
- Buijn, H.R. (1991). Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA); Richtlijnen Ontwerp Niet-Autosnelwegen (RONA) In: CROW (1991).
- Cavallo, V. et al. (1988). Perception and anticipation in negotiating curves: the role of driving experience. In: Anon, (1988c), pp. 365-347.
- CBS (1989). Statistiek van de verkeersongevallen op de openbareweg 1988. SDU, 's-Gravenhage.
- CEN (1991). Vergadering Madrid, oktober 1991. Werkgroep 6 TC 169 Centre Europeene de Normalisation CEN (Niet gepubliceerd).
- CIE (1973). International recommendations for tunnel lighting. Publ. No. 26. CIE, Paris, 1973.
- CIE (1976). Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting. Publ. No. 30. CIE, Paris, 1976.
- CIE (1976a). Compte rendue 18 session, Londres 1975. Publ. No. 36. CIE, Paris, 1976.
- CIE (1977). Measures of road lighting effectiveness. Symposium, July 5-6, 1977, Karlsruhe. CIE, Karlsruhe, 1977.
- CIE (1977a). Recommendations for the lighting of roads for motorized traffic. Publ. No. 12/2. CIE, Paris, 1977.
- CIE (1980). Proceedings 19th Session, Kyoto 1979. Publ. No. 50. CIE, Paris, 1980.
- CIE (1981). An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance (two volumes). Publ. No. 19/2. CIE, Paris, 1981.
- CIE (1983a). International symposium Visual aspects of road markings. Paris, 2-3 May. 1983. Reports and papers, CIE, Paris, 1983.
- CIE (1984). Tunnel entrance lighting. Publ. No. 61. CIE, Paris 1984.
- CIE (1984a). Minutes of CIE TC4-08 "Tunnel lighting", Brussels, May 14, 1984 (Niet gepubliceerd).
- CIE (1984b). Road surfaces and lighting. Joint Report from CIE and PIARC. Publ. No. 66. CIE, Paris, 1984.
- CIE (1986). Werkdocument CIE TC4-08 "Tunnel lighting". Brussel, 1986 (Niet gepubliceerd).
- CIE (1987). Properties and uses of retroreflectors at night. Publ. No.72. CIE, Vienna, 1987.
- CIE (1988). Visual aspects of road markings. Publication No. 73. CIE, Vienna, 1988.

- CIE (1990). Guide for the lighting of road tunnels and underpasses (Draft March 1990). Publ. No. 26/2. CIE, Vienna, 1990.
- CIE (1990a). Fundamentals of the visual task of night driving. (Draft). CIE, Vienna, 1990.
- Cohen, A. (1985). Visuelle Informationsaufnahme während der Fahrzeugsteuerung in Abhängigkeit der Umweltmerkmale und der Fahrpraxis. Schweizerische Zeitschrift für Psychologie 44(1985)249-288.
- CIE (1991). Luminance criteria and visibility measures for road lighting design. In: CIE (1991a).
- CIE (1991a). Proceedings 22nd Session CIE. Melbourne, 1991.
- Cohen, A. S. & Zwahlen, H. T. (1989). Blicktechnik in Kurven. Wissenschaftliches Gutachten. (BFu-Report 13). BFU;BPA;UPI, Bern, 1989.
- Cohu, M. (1967). Floodlighting. Chapter 11. In: De Boer (ed.), 1967.
- Crothers, R.P. (1990). Pro-beam - A viable alternative to lighting tunnel entrances. Paper prepared for Visibility Symposium, TRB, Washington DC, July 25, 1990.
- CROW (1987). Zicht op wegmarkeringen. Publicatie No. 2. Stichting CROW, Ede, 1987.
- CROW (1991). Cursus ontwerpen openbare verlichtingsinstallaties. CROW, Ede, 1991.
- Davis, T.D. (1989). Evaluation of temporary day-night visible raised pavement marker adequacy. Final report. New Jersey Dept. of Transportation, Trenton N.J., 1989.
- De Boer, J.B. (1951). Fundamental experiments of visibility and admissible glare in road lighting. CIE, Stockholm, 1951.
- De Boer, J.B.; Burghout, F. & Van Heemskerck Veeckens, J.F.T. (1959). Appraisal of the quality of public lighting based on road surface luminance and glare. CIE, Brussels, 1959.
- De Boer, J.B. & Knudsen, B. (1963). The pattern of road luminance in public lighting. CIE, Vienna, 1963.
- De Boer, J.B. (ed.) (1967). Public lighting. Centrex, Eindhoven, 1967.
- Dijon, J-M. (1990). Symmetrical - counter beam - pro beam systems; Comparison and test, Wevelgem Tunnel. Liege, Schreder, 1990 (Jaartal geschat).
- Dijon, J-M. (1991). Mondelinge toelichting op Dijon (1990). In: CEN (1991).
- Dunbar, C. (1938). Necessary values of brightness contrast in artificially lighted streets. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) 3(1938)21.
- Dutruit, M. (1974). Die Retro-Reflexion. Regionale Strassen Konferenz. IRF. Budapest, 1974.
- Frederiksen, E. (1972). The quality of street lighting installations under changing weather conditions. Electrotechniek 50(1972)506-514.
- Frederiksen, E. & Gudum, J. (1972). The quality of street lighting installations under changing weather conditions. Lighting Res. Technol. 4(1972)90.
- Freedman, M. (1988). Directional reflectance characteristics of roadway pavements. In: TRB (1988).
- Freiburghaus, E. (1975). Neuzeitliche Lösungen in der Strassenbeleuchtungstechnik. In: Anon (1975b), pp 317-325.
- Gallagher, V.P. & Freedman, M. (1979). Visibility requirements for entering highway tunnels (Draft). Franklin Research Center, Philadelphia, Penn, 1979.
- Gallagher, V.P.; Freedman, M. & Schwab, R. (1979). Visibility requirements for highway tunnels. P-79-66. In: CIE (1980).
- Graham, C.H. (ed.) (1965). Vision and visual perception. John Wiley & Sons, New York, 1965.

- Gregory, R.L. (1970). The intelligent eye. Weidenfeld & Nicholson, London, 1970.
- Griep, D.J. (1968). Traffic accidents, visual performance and driving behaviour. In: Henkes (ed.) 1968.
- Griep, D.J. (1971). Analyse van de rijtaak 1-4. Verkeerstechniek 22(1971)303-306;370-378;423-427;539-542.
- Haber, R.N. & Hershenson, M. (1973). Visual perception. Holt, Rinehart and Winston, London, 1973.
- Hagenzieker, M.H. (1989). Visuele selectie in het verkeer; Een interim-rapport. R-89-60. SWOV, Leidschendam, 1989.
- Hagenzieker, M.P. (1990). Time courses in visual information processing: The influence of luminance on localisation and identification performance. Paper presented at the Second International Conference on Visual Search, September 3-6, 1990. University of Durham, Durham, 1990.
- Hagenzieker, M.P. & Van der Heijden, A.H.C. (1990). Time courses in visual-information processing: Some theoretical considerations. Psychol. Res. (1990) 52: 5-21.
- Hagenzieker, M.P. & Van der Heijden, A.H.C. (1990a). Time courses in visual-information processing: Some empirical evidence for inhibition. Psychol. Res. (1990) 52: 13-21.
- Henkes, H.E., (ed.) (1968). Perspectives in ophthalmology. Exerpta Medica Foundation, Amsterdam, 1968.
- Hentschel, H.J. (1969). Zur Frage der Unterschiedsschwelle und einer allgemeinen Bewertung des Kontrastes grosser, zusammengesetzter Objekte im Strassenverkehr. Lichttechnik 21(1969)25A-28A.
- Hentschel, H.J. & Stempfle, H. (1975). Asymmetrische Einstrahlung, Kontraste und Blendung bei trockner und nasser Strassendecke. P-75-56, in: CIE (1976a).
- Herbst, C.H. (1978). Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit der Tunnelbeleuchtung; ein Systemvergleich. In: LITG (1978).
- Higbie, H.H. (1934). Lighting calculations. John Wiley, New York, 1934.
- IES (1988). Annual Conference of The Illuminating Engineering Society of North America. August 7-11, 1988. Minneapolis, MN., 1988.
- Janoff, M.S. (1988). Subjective rating of visibility and alternative measures of roadway lighting. In: IES (1988).
- Janssen, S.T.M.C. (1988). De verkeersonveiligheid van wegtypen in 1986 en 2010. R-88-3. SWOV, Leidschendam, 1988.
- Janssen, W.H. (1986). Modellen van de verkeerstaak: De "state-of-the-art" in 1986. Rapport IZF 1986 C-7. IZF-TNO. Soesterberg, 1986.
- Jantzen, R. (1960). Flimmerwirkung der Verkehrsbelichtung. Lichttechnik 13 (1960) 211.
- Kayser, H.J. & Pasderski, U. (1990). Einfluss der Lichtverhältnisse auf das Fahrverhalten bei der Einfahrt in Strassentunnel. In: NSVV (1990) 124-136.
- Kebschull, W. (1968). Die Reflexion trockner und feuchter Strassenbeläge. Diss TU Berlin, Berlin, 1968.
- Keck, M.E. (1988). The effect of roadway luminaire arrangement on object visibility. In: TRB (1988).
- Ketvirtis, A. (1986). Counterbeam and vertical illuminance in tunnel lighting design. Note, 2 April 1986. Fenco, Toronto, Canada, 1986. (Not published).
- Ketvirtis, A. (1986a). Counterbeam and vertical illuminance in tunnel lighting design. Contribution CIE (1986).
- Ketvirtis, A. (1988). Recent developments in tunnel lighting (Zonder nadere aanduiding aangehaald door Crothers, 1990).
- 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).

- Knudsen, B. (1967). Lamps and lanterns. Chapter 6 in: De Boer (ed.) (1967).
- Knudsen, B. (1968). De mørke punkter in vejbelysning (Dangerous points in street lighting). Dansk Vejtidskrift (1968)8:153-164.
- Kop, W. (1990). Nachtsichtbarkeit bei Nässe, Lösungsansätze und Erfahrungen beim Einsatz profilierter Markierungen in Europa (Dänemark). In: Meseberg (ed.) (1990). p.13.
- Krause, D. (1979). Visibilité de nuit des marquages routiers par temps de pluie. PV 79.568. Lab. Regional de Saint-Quentin, 1979.
- Krause, D. (1984). Etude de la signalisation horizontale; Visibilité de nuit par temps de pluie de marquages expérimentaux appliqués en rive sur chaussée circulée. PV 84 -194. Lab. Regional de Saint-Quentin, 1984.
- Krendel, E.S. & McRuer, D.T. (1960). A servomechanism approach to skill development. J. Franklin Institute 269(1960)1:24-42 (Ref. Krendel & McRuer, 1969).
- Krendel, E.S. & McRuer, D.T. (1969). Psychological and physiological skill development - A control engineering model. Ch. 15 in: Anon (1969a).
- Le Grand, Y. (1956). Optique physiologique, Tome III. Ed. Revue Optique, Paris, 1956.
- Levelt, P. (1987). Onderzoek naar bogen. Inventarisatie ten behoeve van boog-onderzoekers. SWOV, Leidschendam, 1987. (Niet gepubliceerd).
- Licht84 (1984). Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschland, Niederlande, Oesterreich, Schweiz. Mannheim 5-7 Juni, 1984.
- LITG (1976). Lichttechnische Tagung '76. München 31/5-3/6 1976.
- LITG (1978). Lichttechnische Gemeinschaftstagung, 13-16 Juni 1978, Amsterdam, 1978.
- LITG (1980). Lichttechnische Gemeinschaftstagung, Berlin, Oktober 1980. LITG, Berlin, 1980.
- Lundkvist, S.-O. (1990). Nachtsichtbarkeit bei Nässe, Lösungsansätze und Erfahrungen beim Einsatz profilierter Markierungen in Europa (Schweden). In: Meseberg (ed.) (1990) p.15.
- Lundkvist, S.-O. & Nilsson, B. (1984). The functional properties of marker posts (in Swedish). VTI Medd. No 403. VTI, Linköping, 1984.
- Mäder, F. (1969). Verwendung von besonderen asymmetrischen Leuchten (Schrägstrahler) zur Beleuchtung von Tunneln. Bull. SEV. 60(1069)1177.
- Mäder, F. (1978). Fahrversuche im Schöneegg-Tunnel (N4). Eidgenössisches Amt für Messwesen, Bern, 1978 (Niet gepubliceerd; Bijlage bij Riemenschneider, 1978).
- Mäder, F.; Fuchs, O. (1966). Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln. Bull. SEV. 57(1966)359-366.
- Matanzo, F. & Rockwell, T.P.H. (1967). Driving performance under night time conditions of visual degradation. Human Factors 9(1967)427-432.
- McCullough, L.A. & Ketvirtis, A. (1983). Vertical illuminance as a criterion for energy-effective tunnel lighting design. Journal of IES, October 1983, 230-242. In: CIE (1984a).
- Meseberg, H.-H. (1986). Die Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen. Internationales Verkehrswesen 38 (1986)52-61.
- Meseberg, H.-H. (1990). Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen. In: Meseberg (ed.) (1990).
- Meseberg, H.-H. (1990a). Lichttechnische Eigenschaften van Markierungen. In: Meseberg (ed.) 1990. S. 49-55.
- Meseberg, H.-H. (1990b). Erläuterungen zu den "Hinweisen für die Anwendung von Fahrbahnmarkierungen mit erhöhten Nachtsichtbarkeit bei Nässe". In: Meseberg (ed.) (1990) S. 73-81.
- Meseberg, H.-H. (1990c). Untersuchungen an Strassentunneln mit symmetrischer und Gegenstrahlbeleuchtung. In: NSVV (1990a) S. 116-123.
- Meseberg, H.-H. (ed.) (1990). Fahrbahnmarkierungen '90. Heft 9. DSGM. Kirschbaum Verlag, Bonn, 1990.

- Menkhaus, T. (1981). Zur Frage der subjektiven Beurteilung von Leuchtdichten in Tunnelleinfahrten und ihre Korrelation zum sichtbaren Objekt-contrast. Thesis Technische Hochschule Karlsruhe, 1981. (Ref. CIE, 1984).
- Michon, J.A.; Eijkman, E.G.J. & De Klerk, L.F.W. (eds.) (1979). Handbook of psychonomics (2 volumes). North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1979.
- Moon, P. (1961). The scientific basis of illuminating engineering (Revised edition). Dover, New York, 1961.
- Moon, P. & Gette, M.S. (1938). On the reflection factor of clothing. Journ. Opt. Soc. Amer. 28(1938)277-279.
- Müller, E. & Riemenschneider, W. (1975). Tunnel lighting in Switzerland. In: Anon (1975) S. 99-101.
- Müller, E. & Riemenschneider, W. (1975a). Tunnel lighting in Switzerland. Lighting Res. Technol. 7(1975)99-101.
- Nakamichi, F.; Narisada, K. & Yoshikawa, K. (1967). Journal IES Japan 51 (1967) 566-581 (Japanese with English summary). (Ref. CIE, 1984).
- Narisada, K. (1975). Applied research on tunnel lighting entrance lighting in Japan. In: Anon (1975) p.87-90.
- Narisada, K. & Inoue, T. (1973). Uniformity in road lighting installations. In: LITG (1973).
- Narisada, K. & Inoue, T. (1982). Journal of Light & Visual Environment 5(1982) 2. (Ref. CIE, 1984).
- 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. L. Res. Technol. 6(1974) 9-11.
- Narisada, K. & Yoshimura, Y. (1974). National Technical Report. (Japanese with English summary). 1974. (Ref. CIE, 1984).
- Narisada, K.; Yoshimura, Y. & Sakamoto, S. (1984). Brightness variations of a preceding car passing through the threshold zone of a tunnel in daytime. In: CIE (1984a).
- Neis, H. (1985). Zur Problem der Erfassung und Beurteilung von profilierten Fahrbahnmarkierungen im trockenen und nassen Zustand. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1985.
- Neis, H. (1988). Profilierte Markierungen - Einsatz und Praxis. In: Anon: (1988). S.253-258.
- Neis, H. (1990). Profilierte Markierungen - Versuchsstrecken und Einsatz in der Praxis. In: Meseberg (ed.) (1990) S. 56-60.
- Norman, D.A. (1976). Memory and attention. Second edition. John Wiley and Sons, New York, 1976.
- Novellas, F. (1982). Eclairage des tunnels routies; Intérêt des systèmes à mobilisation de contraste. Rev. Routes Aérodr., 1982 (Jaartal geschat)
- NSVV (1957). Aanbevelingen voor openbare verlichting. Moormans Periodieke Pers, Den Haag, 1957 (Jaartal geschat).
- NSVV (1963). Aanbevelingen voor tunnelverlichting. Electrotechniek 41 (1963), 23; 46.
- NSVV (1974/1975). Richtlijnen en aanbevelingen voor openbare verlichting. Electrotechniek 52(1974) 15; 53(1975) 2 en 5.
- NSVV (1977). Het lichtniveau van de openbare verlichting in de bebouwde kom. Electrotechniek 55(1977) 90-91.
- NSVV (1990). Licht90. Tagungsberichte Gemeinschaftstagung Rotterdam 21.5-23.5, 1990. NSVV, Arnhem, 1990.
- NSVV (1990a). Aanbevelingen voor openbare verlichting, Deel I. NSVV, Arnhem, 1990.

- NSVV (1991). Aanbevelingen voor de verlichting van lange tunnels voor het gemotoriseerde verkeer. NSVV, Arnhem, 1991.
- OECD (1972). Symposium on road user perception and decision making. OECD, Rome, 1972.
- OECD (1976). Adverse weather, reduced visibility and road safety. OECD, Paris, 1976.
- Odle, H.A. (1988). The effect of asymmetrical light distribution on roadway luminance. In: TBR (1988).
- Oldenburger, R. (1990). Nachtsichtbarkeit bei Nässe, Lösungsansätze und Erfahrungen beim Einsatz profilierter Markierungen in Europa (Niederlande). In: Meseberg (ed.) (1990) S. 14-15.
- Padmos, P. (1982). Discussiebijdrage. In: SLG, (1982), p. 442.
- Padmos, P. (1984). Visually critical elements in night driving, in relation to public lighting. In: TRB (1984).
- Padmos, P. & Alferdinck, J.W.A.M. (1983) Verblindings bij tunnelingangen II: De invloed van atmosferisch strooilicht. IZF 1983 C-9. IZF-TNO, Soesterberg, 1983.
- Padmos, P. & Alferdinck, J.W.A.M. (1983a) Verblindings bij tunnelingangen III: De invloed van strooilicht van de autovoorraad. IZF 1983 C-10, IZF-TNO, Soesterberg, 1983
- Padmos, P. & Varkevisser, J. (1977). De invloed van open bitumineuze wegdekken op het zicht van de automobilist bij regen. IZF 1977-C17. IZF-TNO, Soesterberg, 1977.
- PAO (1991a). Cursus: Openbare Verlichting. 22-24 jan. 1991. PAO-VV, Rijswijk (ZH), 1991.
- PAO (1991). Cursus: Verkeer en Milieu, april 1991. PAO-VV, Delft, 1991.
- 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, 1985.
- PIARC (1991). Working group on Pervious coated macadam. Final report (Draft). PIARC, Marrakesh, 1991.
- Prochazka, H. (1979). Gleinalmtunnel. ILR 30(1979)80-83.
- RATB (1985). Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, 1985.
- Rea, M.S. (1988). Visibility criteria and application techniques for roadway lighting. In: TRB (1988).
- Riemenschneider, W. (1978). Influence of asymmetric lighting to visibility. Novelectric, Buchs, 9th October 1978 (Niet gepubliceerd).
- Riemenschneider, W. & Müller, E. (1975). Vergleich der nach den CIE-Verfahren gemessenen und bestimmten Adaptationsleuchtdichten verschiedener Tunnels während ihrer Bauzeit und nach der Fertigstellung der Anlagen. In: CIE (1976a). Papers 75-51.
- Riemersma, J.B.J. (1979). The perception of deviation from a straight course. IZF-1979-C-6. IZF-TNO, Soesterberg, 1979.
- Riemersma, J.B.J. (1985). Koershouden op de rechte weg. Verkeerskunde 36(1985)367-372.
- Riemersma, J.B.J. (1988). Zonering en herkenbaarheid; Een experiment. IZF 1988 C-2. IZF-TNO, Soesterberg, 1988.
- Riemersma, J.B.J. (1988a). Enkelbaans/dubbelbaans autowegen; Beleving van de weggebruiker. IZF 1988 C-4. IZF-TNO, Soesterberg, 1988.
- Riemersma, J.B.J. (1988b). Waarnemen van boogkenmerken. IZF. 1988 C-8. IZF-TNO, Soesterberg, 1988.
- Riemersma, J.B.J. (1989). Waarnemen van weg en omgeving en rijtaak. Handboek Sociale Verkeerskunde. Van Gorcum, Assen/Maastricht, 1989.
- Riemersma, J.B.J. (1989a). The effects of transition curves and superelevation on the perception of road-curve characteristics. IZF 1989 C-18. IZF-TNO, Soesterberg, 1989.

- Riemersma, J.B.J. (1989b). Vergelijking VSC snelheidsgegevens en IZF beoordelingen bogen. Memo IZF 1989-M25. IZF-TNO, Soesterberg, 1989.
- Rockwell, T.H.; Ernst, R.L. & Rulon, M.J. (1967). Research on visual requirements in night driving. Final Report EES 254-1. NCHRP. Ohio State University. Columbus, Ohio, 1967.
- Sarteel, F. (1986). CIE - Division 4 - TC 4.08 (Note 8 July 1986; Not published). Ministère des Travaux Publics, 155.02/CIE. Brussels, 1986.
- Sarteel, F. (1986a). Bijdrage voor CIE (1986).
- SBK (1968). Leitsätze für öffentliche Beleuchtung. 2. Teil: Strassentunnel und -unterführungen. SEV 4024.1968. SBK, Zürich, 1968.
- Schober, H. (1960). Das Sehen (2 Bände). Fachbuchverlag, Leipzig, 1958-1960.
- Schreuder, D.A. (1964). The lighting of vehicular traffic tunnels. Centrex, Eindhoven, 1964.
- Schreuder, D.A. (1964a). De luminantietechniek in de straatverlichting. De Ingenieur 76(1964)E89-E99.
- Schreuder, D.A. (1965). Reflectie-eigenschappen van wegmarkeringmaterialen. Wegen, 39(1965)186-191.
- Schreuder, D.A. (1967). Theoretical basis of road lighting design. Chapter III in : De Boer (ed.) 1967.
- Schreuder, D.A. (1967a). Tunnel lighting. Chapter IV in : De Boer (ed.) (1967).
- Schreuder, D.A. (1968). Ein Vergleich von Empfehlungen für Tunneleinfahrt-Beleuchtung. Lichttechnik, 20(1968)20A-21A.
- Schreuder, D.A. (1970). A functional approach to lighting research. In: Tenth International Study Week in Traffic and Safety Engineering. OTA, Rotterdam, 1970.
- Schreuder, D.A. (1970a). Road lighting and traffic safety; A functional approach. Lux (1970)No.57:146-147;256-263.
- Schreuder, D.A. (1971). Tunnel entrance lighting; A comparison of recommended practice. Lighting Res. Technol. 3(1971)274-278.
- Schreuder, D.A. (1972). Tunnel lighting in Europe (abridged). Highway Research Circular (1972) 137: 28-32.
- Schreuder, D.A. (1974). De rol van functionele eisen bij de wegverlichting. In: Het Nederlands Wegcongres, Utrecht, 1974.
- Schreuder, D.A. (1975). Fundamentals on tunnel lighting. In: Anon, 1975, p. 85-87.
- Schreuder, D.A. (1975a). Functional requirements of road lighting. R-75-3. SWOV, Voorburg, 1975.
- Schreuder, D.A. (1977). The relation between lighting parameters and driving performance. In: CIE, 1977.
- Schreuder, D.A. (1978). Zichtbaarheid van wegmarkeringen op natte wegen. SCW, Arnhem, 1978.
- Schreuder, D.A. (1979). Tunnel lighting engineering; The third generation. Contributed to CIE TC 4.6, SC 3. SWOV, Voorburg, 1979 (zie ook Schreuder, 1980).
- Schreuder, D.A. (1980). Tunneleinfahrtbeleuchtung: Die dritte Generation. R-80-27. SWOV, Voorburg, 1980. In: LITG, 1980. Zie ook: Schreuder, 1981a.
- Schreuder, D.A. (1980a). Geprofileerde wegmarkeringen. R-80-51. SWOV, Voorburg, 1980.
- 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, 1981.
- Schreuder, D.A. (1981a). De verlichting van tunnelingangen: de derde generatie. Wegen 55(1981)242-245.

- Schreuder, D.A. (1983). Glare in street lighting. CIE Journal 2(1983)53-57.
- Schreuder, D.A. (1984). Visibility aspects of road lighting. In: TRB (1984).
- Schreuder, D.A. (1985). Toepassing en gebruiksmogelijkheden van retro-reflecterende materialen in het wegverkeer; Een overzicht van de stand van zaken. R-85-62. SWOV, Leidschendam, 1985.
- Schreuder, D.A. (1985a). Regelen, beheersen en sturen ... bijvoorbeeld in het wegverkeer! Wegen 59(1985)217-220.
- Schreuder, D.A. (1985b). De zichtbaarheid van wegmarkeringen op natte wegen; Een aanvullende literatuurstudie. R-85-23. SWOV, Leidschendam, 1985.
- Schreuder, D.A. (1985c). Fundamentele overwegingen omtrent visuele en verlichtingskundige aspecten van de verkeersveiligheid. R-85-61. SWOV, Leidschendam, 1985.
- Schreuder, D.A. (1985d). The visual cut-off angle of vehicle windscreens. Lighting Res. Technol. 17(1985)192-193.
- Schreuder, D.A. (1986). The function of road markings in relation to drivers' visual needs. R-86-29. SWOV, Leidschendam, 1986.
- Schreuder, D.A. (1988). Zeer open asfaltbeton en de verkeersveiligheid. Verkeerskundige werkdagen, CROW, Ede, 1988.
- Schreuder, D.A. (1988a). Road lighting and priorities for observation. Illum. Engn. Yougoslavia, Zagreb, 1988.
- Schreuder, D.A. (1988b). Visual aspects of the driving task on lighted roads. CIE Journal 7 (1988)1:15-20.
- Schreuder, D.A. (1989). The field factor for the determination of tunnel entrance luminance levels. Paper presented at the SLG/CIE Symposium on: New developments in tunnel lighting Lugano, Switzerland, 12 October 1989.
- Schreuder, D.A. (1990a). De veldfactor bij de bepaling van de verlichtingsniveaus bij tunnelingangen; ontwerp (The field factor for determining of the luminance levels in tunnels). R-90-10. SWOV, Leidschendam, 1990.
- Schreuder, D.A. (1990b). De relatie tussen het niveau van de openbare verlichting en de verkeersveiligheid op niet-autosnelwegen buiten de bebouwde kom. R-90-45. SWOV, Leidschendam, 1990.
- Schreuder, D.A. (1991). Visibility aspects of the driving task: Foresight in driving; A theoretical note. R-91-71. SWOV, Leidschendam, 1991.
- Schreuder, D.A. (1991a). De veldfactor bij de bepaling van de verlichtingsniveaus bij tunnelingangen; Verslag van een nadere analyse van het experimentele onderzoek. R-91-65. SWOV, Leidschendam, 1991.
- Schreuder, D.A. (1991b). Practical determination of tunnel entrance lighting needs. Paper presented at the TRB Annual Meeting. January 15, 1991, Washington DC.
- Schreuder, D.A. (1991c). 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. (1991d). Inleiding. Hoofdstuk I.1. in PAO, 1991a.
- Schreuder, D.A. (1991e). Verkeersveiligheid en burgerlijke veiligheid. In: CROW, 1991.
- Schreuder, D.A. (1991f). Kosten/baten analyses. Hoofdstuk II.1. in PAO, 1991a.
- Schreuder, D. A. (1991h). Criteria for the selection of pervious coated macadam. Chapter 3 in: PIARC, 1991 (draft).
- Schreuder, D.A. (1991j). A device te measure road reflection in situ. In: CIE, 1991a.

- Schreuder, D.A. & Lindeijer, J.E. (1987). Verlichting en markering van motorvoertuigen. R-87-7. SWOV, Leidschendam, 1987.
- Schreuder, D.A. & Oud, H.J.C. (1988) The predetermination of the luminance in tunnel entrances at day. R-88-13. SWOV, Leidschendam, 1988
- 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, 1991.
- Schwengler, S. (1978). Eine neue Beleuchtungskonzeption für Tunnelanlagen. In: Anon 1978a.
- SCW (1974). Wegverlichting en oppervlaktetextuur. Mededeling No. 34. SCW, Arnhem, 1974.
- SCW (1977). Proceedings International Symposium on Porous asphalt. Amsterdam, 1976. Record No. 2. SCW, Arnhem, 1977.
- SCW (1982). Zichtbaarheid 's nachts van wegmarkeringen op droge en natte wegdekken. SCW-Mededeling 52 / SVT-Mededeling 17. SCW, Arnhem, 1982
- Sheridan, T.B. & Ferrell, W.R. (1974). Man-machine systems. The MIT Press, Cambridge, Mass., 1974.
- Simkovics, W. (1978). Die Beleuchtung des Wiltener-Tunnel. In: Anon (1978).
- Simkovics, W. (1979). Die Beleuchtungsanlage des Wiltener-Tunnel. ÖZE 26(1979)4:1-2.
- SLG (1982). Bericht Lichttechnische Gemeinschaftstagung "Licht82. Dok.No.500/82. SLG, Zürich, 1982.
- Sorensen, K. (1975). Road surface reflection data. Report No. 10. Lystekniksk Laboratorium, Lyngby, 1975.
- Sørensen, K. & Nielsen, B. (1974). Road surfaces in traffic lighting. Report No. 9. Danish Illuminating Engineering Laboratory, Lyngby, 1974.
- Stiksmá, K. (ed.) (1987). Tunnels in the Netherlands. Rijkswaterstaat, Illustra, Den Haag, 1987.
- Stolzenberg, K. (1984). Konzepte und Empfehlungen für Tunnelbeleuchtung. In: Licht84 (1984) no 16.
- Swart, L. (1991). Plan van aanpak tegenstraalverlichting. Bouwdienst RWS, Utrecht, 1991.
- Swart, J.J. & Schipper, J.E. (1988). Uitgewassen beton met fijne textuur. Betonwegen-nieuws (1988) no.74, blz.3-4.
- Tan, T.H.; Van den Brink, T.J.D. & Swart, L. (1983). Tunnelingangsverlichting. Electrotechniek 61 (1983) 669-675.
- Tanabe, Y. et al. (1977). Paper presented at the annual conference of IES Japan (1977) (In Japanese). 1977. (Ref. CIE 1984).
- Theewes, J. (1989). Visual selection: Endogenous and exogenous control; A review of the literature. IZF 1989 C-3. IZF-TNO, Soesterberg, 1989.
- Theewes, J. (1990). Exogenous and endogenous control of visual attention. IZF 1990 C-3. IZF-TNO, Soesterberg, 1990.
- Tooke, W.R. & Hurst, D.R. (1975). Wet night visibility study. GDOT Research Project No. 6701. Dept. of Transportation, Georgia, 1975.
- TRB (1984). Providing visibility and visual guidance to the road user. Symposium, July 30- August 1, 1984. Transportation Research Board, Washington, DC., 1984.
- TRB (1988). Symposium on visibility criteria for signs, signals and roadway lighting. August 3-5, 1988. Minneapolis, MN. Transportation Research Board, Committee on Visibility, 1988.
- TRB (1990). Porous asphalt pavements. Transportation Research Board Annual Meeting, Session 202, 214; January 9, 1990. Washington, DC., 1990.
- Tromp, J.P.M. (1984). Spat- en sproeiwater bij vrachtwagens. R-84-9. SWOV, Leidschendam, 1984.
- Van Bommel, W.J.M. (1978). Optimization of road lighting installations by the use of performance sheets. L. Res. Technol. 10(1978)189.

- Van Bommel, W.J.M. (1983). Practical remarks regarding the counterbeam system for tunnel entrance lighting (niet gepubliceerd). In: CIE (1984).
- Van Bommel, W.J.M. & De Boer, J.B. (1980). Road lighting. Kluwer, Deventer, 1980.
- Van den Bijllaardt, D. (1975). Tunnel lighting practice in the Netherlands. In: Anon (1975), p.95-98.
- Van den Bijllaardt, D. (1981). Basic points of tunnel lighting. Philips, Eindhoven, 1981.
- Van den Brink, T.J.D. (1984). Experimenten met daglichtroosters. Rijkswaterstaat, Dienst Verkeerskunde, 1984 (Niet gepubliceerd).
- Van Toorenburg, J.A.C.; Oldenburger, R.H. & Swart, J.H. (1987). Zeer open asfaltbeton, verkeersveiligheid en verkeersafwikkeling. Verkeerskunde 38(1987)71-74.
- Vermeulen, J. (1966). Influence of reflection properties and types of fitting on roadsurface luminance and on installation efficiency. Electrotechniek 44(1966)517-519.
- Vermeulen, J. (1978). Middelen voor weg-en straatverlichting. Cursus weg- en straatverlichting. PAO, Delft, 1978.
- Vermeulen, J. (1982). Optisch ontwerp. Hoofdstuk 3. Postacademiale Cursus Verlichting, PAO, Delft, 1982.
- Vermeulen, J. & Knudsen, B. (1968). Het ontwerpen van een verlichting van voorgeschreven luminantie en gelijkmatigheid. Philips Tech. Tijdschr. (168)29.
- Vos, J.J. (1983) Verblinding bij tunnelingangen I: De invloed van strooilicht in het oog. IZF 1983 C-8. IZF-TNO, Soesterberg, 1983.
- Vos, J.J. & Padmos, P. (1983). Straylight, contrast sensitivity and the critical object in relation to tunnel entrance lighting. CIE, Amsterdam, 1983.
- Waldram, J.M. (1938). The revealing power of street lighting installations. Trans. Illum. Engn. Soc. (London). 3(1938)173-196.
- Waldram, J.M. (1962). Lighting and visibility in the approaches to underpasses. GEC Journal 29(1962) 119-129.
- Walraven, J. (1980). Visueel critische elementen bij nachtrijden; een veldstudie. IZF 1980 C-22. IZF-TNO, Soesterberg, 1980.
- Walthert, R. (1976). Verschiedene Systeme der Tunnelbeleuchtung. In: LITG, (1976).
- Walthert, R. (1977). Tunnel lighting systems. Int. Lighting Rev. (1977)112.
- Walthert, R. (1978). Sehverhältnisse im Bereich von Tunneln. Strasse und Verkehr 64(1978)235-239.
- Walthert, R. (1978a). Bericht über die statischen Versuche zur Ermittlung der Sichtbarkeit von Hindernissen in Tunnel-Einfahrzonen bei verschiedenen Beleuchtungssystemen. Turgi, BAG-Turgi, 1978. (Niet gepubliceerd, Bijlage bij Riemenschneider, 1978).
- Wertheim, A.H. (1986). Over het meten van visuele opvallendheid van objecten in het verkeer. IZF 1986 C-25. IZF-TNO, Soesterberg, 1986.
- Westermann, H.-O. (1963). Reflexionskennwerte von Strassenbelägen. Lichttechnik 15(1963)507-510.
- Westermann, H.-O. (1964). Das Reflexionsverhalten bituminöser Strassen-decknen im Zusammenhang mit der Griffigkeit. Strasse u. Tiefbau 18(1964)290-295.
- Westermann, H.-O. (1967). Het ontwerpen van de openbare verlichting van de stad. Pol. Techn. Tijdschr.(1967)854-859.
- Westermann, H.-O. (1975). Engineering aspects of tunnel lighting. In: Anon (1975), p. 90-94.
- Westermann, H.-O. (1975a). Vergelijking van de lichttechnische eigenschappen van lijnverlichting en conventionele verlichting. Electrotechniek 53(1975)889.

- Whiteley, A. (1990). Nachtsichtbarkeit bei Nässe, Lösungsansätze und Erfahrungen beim Einsatz profilierter Markierungen in Europa (England). In: Meseberg (ed.) 1990, p.14.
- Zwahlen, H.T. (1979). Driver eye scanning behaviour at tunnel approaches. Rep. Franklin Inst. Res. Lab., Vol 1. Philadelphia, PA, 1979.
- Zwahlen, H.T. (1980). Driver eye scanning behaviour in rain and during an unexpected windshield wiper failure. Z.f.Verkehrssicherheit 26(1980)148-155.
- Zijl, H. (1958). Motor tunnel at Velsen. Int. Lighting Rev. (1958)26-29.

a	v = 10 m/s (36 km/uur)					v = 15 m/s (54 km/uur)				
	t=1	2	3	6	10	1	2	3	6	10
1 m/s ²	60	70	80	110	150	127	142	157	202	162
2 m/s ²	35	45	55	85	125	71	86	101	146	206
3 m/s ²	26	36	46	76	116	52	67	82	127	187
5 m/s ²	20	30	40	70	110	37	52	67	112	172
8 m/s ²	16	26	36	66	106	29	44	59	104	164

a	v = 20 m/s (72 km/uur)					v = 30 m/s (108 km/uur)				
	t=1	2	3	6	10	1	2	3	6	10
1 m/s ²	220	240	260	320	400	480	510	540	630	750
2 m/s ²	120	140	160	220	300	255	285	315	405	525
3 m/s ²	87	107	127	187	267	180	210	240	330	450
5 m/s ²	60	80	100	160	240	120	150	180	270	390
8 m/s ²	45	65	85	145	225	86	116	146	236	256

Tabel 1. Stopafstanden (in meters) bij verschillende snelheden (v) en verschillende remvertragingen (a).

Manoeuvre	Zichtruimte (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, voorwaarschuwingstekens, verkeers-tekens, waarschuwingslichten, verkeerslichten
Noodmanoeuvres		
.. uitwijken	125	obstakels (ander verkeer)
.. noodstop	140	obstakels (ander verkeer)

Tabel 2. Minimaal vereiste waarden van de zichtruimte.

1. Botsingen tussen voertuigen op dezelfde weg in dezelfde richting, zonder afslaan, totaal	5201	
111 in vol verkeer	1474	
121 met remmend voertuig	1205	
122 met stilstaand of voorgesorteerd voertuig	748	
141, 142 bij veranderen van rijstrook	282	
2. Botsingen tussen voertuigen op dezelfde weg in tegengestelde richting, zonder afslaan, totaal	3104	
211 zonder rijstrookverandering	2403	
212, 213 met rijstrookverandering	242	
3. Botsingen tussen voertuigen op dezelfde weg in dezelfde richting, met afslaan, totaal	4066	
4. Botsingen tussen voertuigen op dezelfde weg in tegengestelde richting, met afslaan, totaal	4177	
5. en 6. Botsingen tussen voertuigen op kruisende wegen, totaal	12036	
7. Botsingen met een geparkeerd voertuig, totaal	1307	
8. Botsingen met een voetganger, totaal	4054	
9. Botsingen met een voorwerp of een dier, totaal	5097	
911 met een boom enz.	2529	
912 met een lichtmast enz.	751	
913, 921, 931 met verkeersbord, zuil, vangrail enz.	948	
951 met los voorwerp op of langs de weg	240	
0 Eenzijdige verkeersongevallen, totaal	2817	
Totaal botsingen tussen voertuigen (1,2,3,4,5,6)	28584	68,3%
Totaal botsingen met voorwerpen enz (7,9,0)	9221	22,0%
Totaal botsingen met een voetganger (8)	4054	9,8%
Botsingen met los voorwerp op of langs de weg	240	0,6%
Totaal letselongevallen	41859	100,0%

Tabel 3. Letselongevallen in Nederland in 1988 (CBS, 1989).

1. Botsingen tussen voertuigen op dezelfde weg in dezelfde richting, zonder afslaan totaal (wat over blijft)	3709	75,7%
111 in vol verkeer	1474	
121 met remmend voertuig	1205	
122 met stilstaand of voorgesorteerd voertuig	748	
141, 142 bij veranderen van rijstrook	282	
9 Botsingen met een voorwerp of een dier		
913, 921, 931 met verkeersbord, zuil, vangrail enz.	948	19,4%
951 met los voorwerp op of langs de weg	240	4,9%
Totaal (wat over blijft)	4897	100,0%
Totaal botsingen tussen voertuigen (1)	28584	68,3%
Totaal botsingen met voorwerpen enz (7,9,0)	9221	22,0%
Totaal botsingen met een voetganger (8)	4054	9,7%
Botsingen met los voorwerp op of langs de weg	240	0,6%
Totaal letselongevallen	41859	100,0%

Tabel 4. Relevante letselongevallen in Nederland in 1988 (CBS, 1989)

Snelheid		Hart-op-hart-afstand tussen armaturen (m)		
m/s	km/uur (afgerond)	onderwaarde 3 Hz	maximum 9 Hz	bovenwaarde 15 Hz
10	35	4,3	1,1	0,7
15	55	5,0	1,7	1,0
20	70	6,7	2,2	1,3
25	90	8,3	2,8	1,7
30	110	10,0	3,3	2,0

Tabel 5. Flikkereffecten; het "verboden gebied" van de armatuurafstanden.

Lichtverdeling	I	II	III
E_h (lux)	1450	1350	1200
E_v (lux)	600	250	40
L (cd/m^2 ; voor R1)	85	90	90
L (cd/m^2 ; voor R3)	80	195	130
CF (voor R1)	0,13	0,30	1,1
CF (voor R3)	0,12	0,33	1,2

Hierin zijn: I: symmetrische armaturen; II asymmetrische armaturen; III: tegenstraalverlichting. R1 en R3: aanduidingen van de reflectie van het wegdek (R1 een diffuus wegdek; R3 een spiegelend wegdek). De lichtverdelingen zijn steeds een gemiddelde van drie armaturen per type.

Tabel 6. Berekende waarden voor de contrastfactor (volgens Blaser, 1981).

Luminanties toegangszone (cd/m^2)	Afstand tot portaal		
	60 m	80 m	100 m
4000	850	1000	1200
6000	1400	1700	2000
8000	2100	2500	3000

Tabel 7. Aanbevolen waarden van lichtsterkten van armaturen (in cd) (naar Narisada et al., 1977).

