

DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN

Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels

Deel I: Studie van de literatuur

R-81-26 I

Dr.ir. D.A. Schreuder

Voorburg, 1981

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Voorwoord

Samenvatting

1.	<u>Tunnels voor het wegverkeer</u>	1
1.1.	Inleiding	1
1.2.	Verkeersvoorzieningen	4
2.	<u>De verlichting van tunnels</u>	13
3.	<u>Probleemstelling</u>	18
4.	<u>Historisch overzicht</u>	20
4.1.	De eerste generatie van tunnelverlichting	20
4.2.	De tweede generatie	21
4.3.	De derde generatie	25
5.	<u>De probleemanalyse</u>	27
5.1.	De algemene beschrijving	27
5.1.1.	Inleiding	27
5.1.2.	Relevante objecten	27
5.1.3.	De remweg	35
5.2.	De buitenluminantie	38
5.2.1.	De bouw van het oog	38
5.2.2.	Verblindings als contrastverminderende factor	38
5.2.3.	De adaptatietoestand	46
5.2.4.	De bepaling van de buitenluminantie	47
5.3.	Niet-evenwichtstoestanden	59
5.3.1.	Inleiding	59
5.3.2.	Adaptatie	59
5.3.3.	Het adaptatiedefect	61
6.	<u>Probleemuitwerking: De luminantie in het begin van de tunnel</u>	73
6.1.	Inleiding	73

6.2.	De luminantie in de drempelzone	75
6.3.	Bepaling van de luminantie in het begin van de tunnel	78
6.3.1.	Methode Schreuder	82
6.3.2.	Methode Mäder	83
6.3.3.	Methode CETU	83
6.3.4.	Methode Narisada	84
6.3.5.	Methode Schröter	87
6.3.6.	Methode Adrian	88
6.3.7.	Methode PIARC	90
6.3.8.	Discussie	91
7.	<u>Overige aspecten</u>	94
7.1.	Inleiding	94
7.2.	Daglicht in tunnels	94
7.3.	Lichtroosters	97
7.4.	Tegenstraalverlichting	100
7.5.	De overgangszone	101
7.6.	Het interieur	102
7.7.	Korte tunnels	105
8.	<u>Onbeantwoorde vragen</u>	106
8.1.	Inleiding	106
8.2.	Psychologische gezichtspunten	106
8.2.1.	Comfort	106
8.2.2.	Rijtaak	107
8.3.	Fysiologische gezichtspunten	107
8.3.1.	De adaptatie	107
8.3.2.	Verblindingsverschijnselen	108
8.4.	Verkeerskundige gezichtspunten	108
8.4.1.	Standaardobject	108
8.4.2.	Indeling van tunnels	108
8.4.3.	Lichtverstrooiing	109
8.5.	Praktische gezichtspunten	109
8.5.1.	Algemene punten	109
8.5.2.	Lichttechnische punten	109

VOORWOORD

Enige decennia lang hebben de Aanbevelingen van de Commission Internationale de l'Eclairage CIE gediend als uitgangspunt bij het ontwerpen van verlichtingsinstallaties voor verkeerstunnels. Deze aanbevelingen zijn gebaseerd op de meest ongunstige verlichtingsomstandigheden die in de praktijk nog van belang zijn. Voorts zijn ze gericht op het verschaffen van een aanzienlijke mate van rijcomfort. De eisen die op basis van deze aanbevelingen aan de verlichtingsinstallatie moeten worden gesteld, zijn hoog, hoger dan in vele gevallen in de praktijk noodzakelijk bleek.

Niet alleen deze praktijkervaring, maar eveneens overwegingen van kostenbesparing en van beperking van het gebruik van energie, en veranderde inzichten betreffende het rijcomfort hebben een herbezinning nodig gemaakt over de eisen te stellen aan installaties voor de verlichting van tunnels, en meer in het bijzonder voor tunnelingangen.

In 1980 heeft de Rijkswaterstaat aan de SWOV een opdracht verleend om hiertoe een probleemanalyse op te stellen. Aangezien deze probleemanalyse met een aantal uiteenlopende onderwerpen verbonden is, bleek het nodig te zijn om een uitgebreide literatuurstudie te maken. Mede daardoor kreeg de studie tot zekere hoogte het karakter van een naslagwerk, iets waaraan in de praktijk reeds lang behoefte bestond. Niet alleen in Nederland overigens; het ligt in de bedoeling dit rapport ook internationaal - bijvoorbeeld binnen de PIARC en de CIE - bekendheid te geven.

Het resultaat van deze studie wordt hierbij gepresenteerd. De studie is uitgevoerd door dr.ir. D.A. Schreuder. Er is dankbaar gebruik gemaakt van vele suggesties, gedaan in de Begeleidingsgroep Verlichtingsonderzoeken, in het bijzonder door dr. P. Padmos van IZF/TNO en ing. L.H. Swart van de Directie Sluizen en Stuwens van de Rijkswaterstaat. In haar vergadering van 7 oktober 1981 heeft de Begeleidingsgroep verklaard zich te kunnen verenigen met de inhoud van dit rapport.

SAMENVATTING

1. Inleiding

Om het probleem van de verlichting van tunnelingangen goed te kunnen bestuderen, is het wenselijk om eerst in het algemeen na te gaan waar, en waarom verkeerstunnels worden gebouwd. We zullen ons hier beperken tot tunnels die worden gebouwd voor het wegverkeer. Zij ontleen hun speciale plaats binnen het gebied van de tunnelbouw aan hun specifieke functie, namelijk die van schakel in een netwerk van wegen ten behoeve van het wegverkeer. We zullen bij de beschouwingen omtrent het wegverkeer in de eerste plaats de aandacht richten op het gemotoriseerde wegverkeer. Het doel van een tunnel is het overwinnen van een of andere hindernis. Uiteraard moet de tunnel dan niet zelf weer een hindernis vormen. Daarom stelt men meestal: de verkeersafwikkeling in een tunnel en de direct erbij behorende toeritten moet tenminste even goed zijn als die in de rest van het wegtracé.

Over de opzet van het rapport nog het volgende. Het gaat hier om een probleemanalyse, dat wil zeggen dat dit rapport een bijdrage dient te leveren tot het aangeven welke onderwerpen nog voor nadere studie in aanmerking komen. Een dergelijke studie zal als regel dienen te bestaan uit een meer gedetailleerde literatuurstudie, terwijl in een aantal gevallen een experimentele ondersteuning nuttig lijkt. De feitelijke, gedetailleerde opzet van dergelijke studies valt buiten het kader van dit rapport.

Tenslotte nog een opmerking over de prioriteitenstelling binnen de in dit rapport naar voren gebrachte onderwerpen van studie. Daarbij spelen vele zaken een rol die in het onderhavige rapport niet aan de orde kunnen komen. Derhalve wordt in dit rapport alleen een aanzet gegeven voor een prioriteitenstelling, maar het aangeven van de prioriteiten zelf behoort elders plaats te vinden.

Tunnels zijn, net als wegen te beschouwen als voorzieningen die worden getroffen ten behoeve van het adequaat verlopen van het verkeer. Het zijn dus verkeersvoorzieningen.

Het is de functie van verkeersvoorzieningen, de verkeersdeelnemer de mogelijkheden te bieden het einddoel van zijn tocht te bereiken op een veilige, vlotte en comfortabele manier, en dit tegen zo laag mogelijke kosten.

Bij de beschrijving van de verkeersveiligheid drukt men zich meestal uit in termen van verkeersonveiligheid. Hiervoor wordt dan weer vaak het aantal verkeersongevallen, aantal slachtoffers enz. per afgelegde afstand als maat genomen.

De tweede eis die, wat betreft de functie, aan verkeersvoorzieningen kan worden gesteld, is de vlotheid. Twee aspecten moeten daarbij worden onderscheiden: de individuele reistijd en de totale prestatie. De eerste wordt gewoonlijk bij het comfort gerekend (niet geheel terecht overigens); de tweede is vooral een economische factor. Er is sprake van een verband tussen de gemiddelde snelheid en de bij de snelheid behorende bereikbare verkeersintensiteit. Er bestaat een snelheid waarbij deze bereikbare verkeersintensiteit maximaal is. Deze intensiteit wordt beschouwd als de "capaciteit" van de weg. Hiermee hangt samen het zogenaamde afwikkelingsniveau.

Als derde criterium is aangegeven het comfort. In het verleden werd dit vaak als een soort "restterm" van momenteel onbekende veiligheids- en vlotheidsaspecten beschouwd, gerelateerd aan de individuele rijnsnelheid en aan de inspanning nodig voor het besturen van het voertuig. Dit standpunt is door de moderne inzichten achterhaald. Men neemt meestal aan dat het idee "comfort" in relatie kan worden gebracht met de mate waarin aan behoefte is voldaan. Niet behoeftebevredigend als zodanig, maar het handhaven van een optimaal niveau van activatie wordt vaak als belangrijkste menselijke drijfveer beschouwd. Welbevinden is een gevolg van het feit dat het organisme zich op dat optimale niveau van activatie bevindt. Welbevinden (comfort in de algemene zin) en genoegen blijken twee zeer fundamentele, in de menselijke fysiologie verankerde factoren te zijn.

Maar ook in een ander opzicht kan er een relatie worden gelegd tussen comfort enerzijds en de bestuurdersprestaties anderzijds. Het is bekend dat bij vrij zoekgedrag het aftasten van het relevante gezichtsveld meer frequent gebeurt wanneer de taak als moeilijker wordt ervaren.

Tenslotte de kosten. Deze omvatten alle uitgaven ten laste van de overheid en de individuen om het verkeerssysteem operationeel te maken/te houden. Bij de kosten horen dus: kosten van ongevallen, kosten van tijdverlies door congestie, aanleg- en onderhoudskosten van het wegennet, belasting en slijtagekosten, maar ook "kosten" betreffende andere schaarse goederen zoals frisse lucht, stilte, ruimte enz., en ook de "kosten" van menselijk leed tengevolge van ongevallen.

2. De verlichting van tunnels

Tunnels vormen een categorie apart binnen de objecten die van een openbare verlichting worden voorzien. Immers, gewoonlijk is alleen 's nachts verlichting nodig, maar bij tunnels doen zich vooral de problemen overdag voor. Het blijkt technisch en economisch niet mogelijk te zijn een tunnel met kunstlicht even helder te verlichten als de door de zon beschenen open weg. Er is dus altijd sprake van een groot verschil in lichtniveau tussen de tunnel enerzijds en de aansluitende open wegen anderzijds. Het is nu het onderwerp van deze studie na te gaan aan welke voorwaarden de verlichting van tunnels moet voldoen om te voorkomen dat het bedoelde verschil tot ernstige problemen aanleiding geeft.

Tunnels kunnen in een aantal categorieën worden onderverdeeld. De eerste onderverdeling die van belang is, betreft de lengte. In feite gaat het daarbij niet in de eerste plaats om de lengte zelf, maar om de mate waarin de omgeving achter de uitgang zichtbaar is van een punt op enige afstand vóór de ingang: het gaat om de mate waarin men door de tunnel heen kan kijken. Uiteraard wordt dit in belangrijke mate bepaald door de lengte van de tunnel, maar ook

door de breedte ervan, en van de aanwezigheid van verticale en/of horizontale bogen.

Ook in andere opzichten kan men tunnels in categorieën indelen:

1. De functie met betrekking tot het verkeer. Meestal kan men volstaan met de andere gangbare categorieën van wegen ook voor tunnels te volgen. Dus: binnen/buiten de bebouwde kom, autosnelweg/autoweg/weg voor gemengd verkeer; al dan niet vrijliggende fietspaden enz.
2. De ligging van de tunnel ten opzichte van de zonnestanden. Het blijkt van groot belang te zijn voor het ontwerp en de uitvoering van de verlichtingsmiddelen of de tunnel bijvoorbeeld Noord-Zuid of Oost-West verloopt.
3. De "gevarenklassen" van tunnels.

3. Probleemstelling

Het onderwerp van deze studie is: aan welke eisen moet de verlichting overdag van tunnels voldoen? Daarbij gaat het in hoofdzaak om de verlichting van de ingangen van lange tunnels.

Daaruit kan daaromtrent een tweevoudige probleemstelling worden afgeleid:

1. Op welke wijze hangen de eisen te stellen aan tunnelverlichting af van de visuele omstandigheden buiten (kort voor) de tunnelingang?
2. Aan welke eisen moet de verlichting van het eerste stuk van de tunnel voldoen?

Voorts kunnen nog twee daarmee samenhangende problemen worden vermeld:

3. Hoe moet de verlichting van het overgangsgebied tussen dit eerste stuk en het interieur van de tunnel worden uitgevoerd?
4. Aan welke eisen moet de verlichting in het interieur van de tunnel voldoen?

Het doel van dit rapport is nu, nader in te gaan op deze probleemstelling. Meer in het bijzonder zal onze aandacht zich richten op het nagaan of er nog nader (wetenschappelijk, fundamenteel) onderzoek nodig is om de gestelde vragen te kunnen beantwoorden.

4. Historisch overzicht

De eerste generatie

De eerste, speciaal voor het gemotoriseerde wegverkeer ontworpen tunnels, zijn in de twintiger jaren gebouwd. De nog oudere tunnels waren bedoeld voor langzaam verkeer, zodat er van zichtproblemen geen sprake was. In de eerste tijd werd daarbij vooral gelet op een behoorlijke verlichting in het interieur van de tunnel. Maar toch werd reeds enige aandacht besteed aan de ingang: men installeerde over enige tientallen meters een "drempelverlichting", waarmee men een verlichtingssterkte van ca. 1000 lux probeerde te bereiken. Ook zijn in enkele gevallen lichtroosters voor de tunnel aangebracht.

Algemeen toepasbaar wetenschappelijk onderzoek werd niet uitgevoerd. Men leerde vooral van de praktijk. Deze praktijk werd met enkele studies aangevuld die gericht waren op de speciale problemen zoals die zich bij een enkele tunnel voordeden.

De verlichtingsinstallaties van tunnelingangen uit de eerste generatie waren gebaseerd op de overweging dat er een zekere tijd nodig is voor de gevoeligheidsaanpassing van het oog van het heldere daglicht naar de donkere tunnel, en dat daarbij de verandering in de diameter van de oogpupil maatgevend is. Dit type verlichtingsinstallatie, zoals bijvoorbeeld geïnstalleerd in de tunnels te Hamburg, New York (Holland-tunnel en Lincoln-tunnel), Antwerpen en Rotterdam, bleek bij hogere verkeersbelasting niet meer zo goed te voldoen. Daarom heeft men voor het ontwerp van de tunnel te Velsen, in de vijftiger jaren, gekozen voor een veel langere drempelzone (ongeveer 150 m), met een veel hoger lichtniveau.

De tweede generatie

De massamotorisering die in de meeste geïndustrialiseerde landen in de zestiger jaren zijn beslag kreeg, deed de noodzaak ontstaan voor vele tunnels in drukke wegen. Er ontstond in deze jaren een nieuwe aanpak van de techniek van het verlichten van tunnelingangen, die zo sterk van het voorafgaande afweek dat men rustig

van een tweedegeneratie kan spreken. Deze tweede generatie wordt gekenmerkt door het volgende:

- het grote aantal tunnels dat gebouwd werd, deed de noodzaak gevoelen van een betere wetenschappelijk gebaseerde theorie;
- ten gevolge van de hoge snelheid en de grote dichtheid van het verkeer kwam de nadruk veel meer op de ingang van de tunnel te liggen, en relatief minder op het interieur;
- de zeer gunstige economische toestand in de meeste landen leidde ertoe dat grote aandacht werd besteed aan het rijcomfort.

Deze periode werd gekenmerkt door een grote opbloei van het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de tunnelverlichting. Dit onderzoek heeft een belangrijke bijdrage geleverd bij het opzetten en uitwerken van de Aanbevelingen voor Tunnelverlichting.

Een aantal tegelijk optredende, maar onderling niet samenhangende, factoren heeft een herbezinning omtrent de CIE-aanbevelingen nodig gemaakt. Ten eerste bleken de meeste moderne tunnels, ook al voldeden ze niet in alle opzichten geheel aan de CIE-aanbevelingen, toch bevredigend verlicht te zijn. Maar belangrijker is dat men, sinds het opstellen van de CIE-aanbevelingen, op een geheel andere manier over het gebruik van elektrische energie is gaan denken, en dat de economische situatie vrijwel overal zeer veel slechter is geworden. Deze herbezinning heeft zodanig belangrijke consequenties opgeleverd dat zich een geheel nieuwe techniek voor het verlichten van tunnelingangen schijnt aan te dienen - de derde generatie.

De derde generatie

Het bleek mogelijk door middel van op zich zelf vrij eenvoudige en goedkope maatregelen te bereiken dat de luminantie vrij dicht voor de tunnelingang veel lager was dan die in het vrije veld. Het vroegtijdig afschermen van de vrije hemel (bijvoorbeeld door hoog naar boven toe doorgetrokken daglichtroosters) speelt hierbij een belangrijke rol. Maar ook bleek al spoedig dat niet alleen de praktische uitvoering, maar ook (en zelfs vooral) de theoretische onderbouwing bij de derde generatie anders is dan bij de tweede generatie. Die theoretische onderbouwing bleek nog

aanzienlijke lacunes te vertonen. Het doel van dit rapport is nu deze lacunes op te sporen en - zo ver mogelijk - aan te geven hoe die lacunes door onderzoek kunnen worden opgevuld.

5. Probleemanalyse

1. Het is momenteel gebruikelijk als uitgangspunt te nemen de aanname dat de rijtaak voldoende kan worden gekenschetst door de noodzaak om voor een bepaald object nog te kunnen stoppen. Als relevant object wordt gekozen een object van $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Dit object wordt beschouwd als enerzijds een maat voor de visueel kritische aspecten van de rijtaak, anderzijds als representant van obstakels die het verkeer eventueel in gevaar kunnen brengen. Deze aannamen zijn tot op zeer grote hoogte arbitrair, en er bestaat twijfel over hun juistheid, met name betreffende de vraag of de visueel kritische aspecten van de rijtaak in feite wel het beste beschreven kunnen worden aan de hand van de waarneembaarheid van kleine objecten.

Een verdere vraag omtrent dit standaardobject die nog niet bevredigend beantwoord is, betreft het contrast. Het vermoeden bestaat dat de taak redelijk kan worden beschreven in termen van een contrastwaarde die dan 20 à 30% moet bedragen. Ook hier is nader onderzoek gewenst.

2. Als relevante waarneembaarheidsafstand van objecten (gebaseerd op de aanname dat voor het betreffende object nog gestopt kan worden), wordt vaak genomen 100 m. In combinatie met de hiervoor vermelde aannamen blijkt deze afstand een bruikbaar compromis te geven, waarbij rekening is gehouden met de remweg bij vrij lage rijsnelheid en korte reactietijd enerzijds en een ruime veiligheidsmarge en comfort voor andere manoeuvres anderzijds.

3. Voor een automobilist die een tunnel nadert, kan de adaptatietoestand L_a op ieder moment beschreven worden door:

$$L_a = L_f + L_{seq} + L_v$$

Hierin is: L_f de luminantie van het gezichtsveldgedeelte dat op de fovea wordt afgebeeld; L_{seq} de equivalente sluierluminantie die het gevolg is van "verblindings" door buiten de fovea liggende gebieden en L_v de sluierluminantie die ontstaat door lichtverstrooiing in de atmosfeer en aan voorruit, enz.

Deze formule kan worden gebruikt wanneer de adaptatietoestand constant is of langzaam verandert. De adaptatietoestand heeft daarbij betrekking op het foveale netvliesgedeelte.

4. De term L_{seq} kan in eerste benadering worden bepaald op basis van Stiles-Holladay formule, hetzij door berekening of door meting met behulp van de "glare-lens". Nader onderzoek is nodig betreffende de bepaling van L_{seq} voor kleine hoeken buiten het geldigheidsbereik van de Stiles-Holladay formule.

5. Nader onderzoek aangaande L_v is noodzakelijk.

6. De buitenluminantie kan in eerste aanleg worden benaderd met 1,5 maal de gemiddelde luminantie binnen een kegel met een tophoek van 2×10^0 en de as evenwijdig aan de rijrichting, van een punt op 100 m van de tunnel. Deze benaderingsmethode vereist nog wel nadere toetsing.

7. Voor de situaties die zich overdag in de buurt van tunnelingangen voordoen, is het voldoende om het fotopisch zien in rekening te brengen.

8. Bij veranderingen in het lichtniveau kan het voorkomen dat de adaptatie achterblijft bij deze verandering. Er ontstaat dan een zgn. adaptatiedefect. Het blijkt dat dit adaptatiedefect een zeer grote rol kan spelen bij de bepaling van de optimale verlichting bij tunnelingangen.

9. Er bestaat een zekere discrepantie tussen de resultaten van oogfysiologisch onderzoek enerzijds en de praktijkervaring anderzijds. Uit de praktijk blijkt dat wanneer de uitgangsluminantie onder ca. $3000 \text{ à } 4000 \text{ cd/m}^2$ er bij plotselinge verlaging van de gezichtsveldluminantie van een adaptatiedefect nauwelijks iets te merken is, terwijl, wanneer het uitgangsniveau slechts betrekkelijk weinig hoger ligt ($6000 \text{ à } 8000 \text{ cd/m}^2$) het adaptatiedefect van doorslaggevende betekenis wordt. Aan de andere kant wordt in de laboratoriumproeven een dergelijke vrij plotselinge overgang niet gevonden.

6. Probleemuitwerking

1. In die gevallen waarin het adaptatiedefect een grote rol speelt, is het nodig in het eerste deel van de tunnel een "drempelzone" te hebben waarin de luminantie constant is. De luminantiewaarde in die drempelzone kan bepaald worden aan de hand van de resultaten van de proeven van Schreuder. Daartoe is het nodig een aantal keuzen te doen omtrent het object waarvan men vindt dat het nog moet kunnen worden waargenomen. Een groot adaptatiedefect zal als regel optreden bij zeer hoge waarden van de buitenluminantie. Dergelijke zeer hoge waarden komen inderdaad in de praktijk zo nu en dan voor; het is echter nog niet geheel duidelijk in hoeverre men met hoge waarden rekening moet houden.

2. Bij wat lagere waarden van de buitenluminantie (zgn. beneden $3000 \text{ à } 4000 \text{ cd/m}^2$) behoeft men in de praktijk geen rekening te houden met het optreden van een adaptatiedefect. De vereiste minimale luminantie in het begin van de tunnel wordt dan allereerst bepaald door de equivalente sluiertluminantie die het gevolg is van de verblinding.

3. Er zijn op dit moment zeven bepalingmethoden voor de luminantie in het begin van de tunnel; geen van alle is echter geheel bevredigend. Het is gewenst een eenvoudig toe te passen, algemeen geldige methode op te stellen die gebaseerd is op goed controleerbare, realistische aannamen. De zeven methoden worden hieronder in het kort beschreven.

- De methode Schreuder geldt alleen voor zeer hoge buitenluminanties; er wordt vanuit gegaan dat het adaptatiedefect van groot belang is; de bepaling van de buitenluminantie is gebaseerd op een zeer ruwe benaderingsmethode, er is een grote plaats ingeruimd aan het comfort (zowel rijcomfort als visueel comfort). Een voordeel is de eenvoud.

- De methode Mäder is gebaseerd op betrekkelijk simplistische experimenten; de buitenluminantie wordt vervangen door de wegdekluminantie, hetgeen een ruwe benadering is; de wegdekluminantie daarentegen wordt zeer nauwkeurig bepaald (in theorie tenminste). Een voordeel is het feit dat de methode direct aan de praktijk aansluit.

- De methode van de CETU is gebaseerd op de nogal sterk aangevochten relaties zoals deze door Blackwell zijn uitgewerkt; het is een geheel analytische methode, iets dat tegenwoordig geen voordeel meer is; het feit dat de methode van Fry voor de bepaling van de verblinding is gebruikt, houdt in dat geen rekening kan worden gehouden met oogbewegingen; het is een bezwaar dat de zichtbaarheid is uitgedrukt in termen van zichtbaarheidsafstanden van objecten omdat bekend is dat deze berekingswijze weinig nauwkeurig is onder de hier geldende omstandigheden. Een voordeel is het feit dat gemakkelijk rekening kan worden gehouden met lichtverstrooiing in de atmosfeer en aan de autoruiten.

- De methode Narisada is de meest gecompliceerde van alle. Een voordeel is dat op de juiste wijze rekening wordt gehouden met de lichtverstrooiing en de verblinding; een bezwaar is dat een niet-verdedigbare omrekeningsfactor gebruikt moet worden om het mogelijk te maken dat de resultaten van de experimenten van Schreuder in de methode kunnen worden opgenomen. Tenslotte wordt wel met het adaptatiedefect rekening gehouden, maar door het invoeren en gebruiken van het fixatiepunt is het niet duidelijk hoe ver dit "rekening houden" eigenlijk gaat.

- De methode Schröter heeft het aantrekkelijke dat ervan wordt uitgegaan dat de zichtbaarheid "goed genoeg" moet zijn, zonder naar perfectie te streven. Het bezwaar is dat dit "goed genoeg" niet op overtuigende wijze wordt gekozen. Ook wordt geen rekening gehouden met oogbewegingen. Anderzijds heeft deze methode, net als die van Mäder, het aantrekkelijke dat gemakkelijk aansluiting wordt gevonden met de praktijk.

- De methode Adrian is theoretisch het beste onderbouwd. Om echte aansluiting te vinden met de praktijk, is een zeer grote omrekeningsfactor nodig, die de geloofwaardigheid van de methode ernstig aantast. Een tweede bezwaar is dat de methode geheel gebaseerd is (nog sterker dan de methoden van Schreuder en CETU) op de waarneembaarheid van een "kritisch" object, een object dat tamelijk willekeurig wordt gekozen. Een vrij geringe verandering in de parameters van dit object kan een aanzienlijke invloed hebben op de resultaten.

- De methode van de PIARC tenslotte is een typisch praktijkgeval. Er is gekozen voor een zeer simpele, direct uit de praktijk af te lezen bepalingsmethode voor L_1 . Rekening houdend met het feit dat de methode Schreuder nogal duur uit kan komen is gekozen voor een kleinere waarde voor L_2/L_1 . Het nadeel is dat er grote afwijkingen kunnen optreden, en dat er geen mogelijkheid is na te gaan of dit het geval is of niet. Het is in feite weinig meer dan een vuistregel - met alle voor- en nadelen daarvan.

7. Overige problemen

In de hierboven gegeven probleemstelling zijn behalve de twee hoofdpunten waarover in de voorafgaande paragrafen in detail is gesproken, nog twee "ermee samenhangende" problemen aangegeven, die echter niet rechtstreeks met de ingang van de tunnel samenhangen. Deze betreffen de eisen te stellen aan de verlichting van de overgangszone en het interieur van tunnels. Voorts zijn op verschillende plaatsen in het voorafgaande problemen aangesneden die met de invloed van daglicht te maken hebben. Hierboven zijn we er van uitgegaan dat objecten meestal als een donker silhouet afsteken tegen de lichtere achtergrond, en zo een "negatief" contrast vormen. Dit blijkt als regel wel op te gaan. Een uitzondering vormt de situatie zoals die zich vlak bij het begin van de tunnel kan voordoen. Tengevolge van het daglicht dat de tunnel binnenvalt kan de verticale verlichtingssterkte op het voorvlak van zulke objecten zo hoog worden dat ze als een licht voorwerp afsteken tegen de donkere (donkerder) achtergrond in de tunnel. Mede gezien de toename van het aantal gevallen waarin tunnels of tunnelachtige constructies worden toegepast ten behoeve van het bestrijden van lawaaioverlast lijkt een nadere studie over de daglichtaspecten gewenst.

Wanneer men de nadruk legt op energiebesparing dan heeft de toepassing van getemperd daglicht uiteraard belangrijke voordelen. Als nadeel is vaak naar voren gebracht dat de lichtdoorlating van dergelijke constructies niet voldoende is om de hoge luminantie-

waarden die in het eerste gedeelte van de tunnel nodig zijn, te kunnen bereiken. De lichtdoorlating van een open rooster blijkt vooral te worden bepaald door de geometrie van de roosterelementen en ook in aanzienlijke mate door de reflectie-eigenschappen van het materiaal waarvan de roosters zijn gemaakt. In Nederland zijn, behalve bij de Velser tunnel, steeds roosters van onbewerkt aluminium toegepast. Het is gebleken dat de aantasting van het oppervlak van de roosters een zeer grote invloed heeft op de doorlating.

Steeds wordt bij de opzet van het ontwerp van roosters die het licht temperen geëist dat nooit de zon er doorheen het wegdek kan treffen (de roosters moeten "zondicht" zijn). Dit blijkt in de praktijk een zeer strenge voorwaarde te zijn. Voor een rooster met verticale wanden blijken de openingen slechts smal te mogen zijn. Het is echter de vraag of het nodig is inderdaad aan deze eis van zondichtheid vast te houden. Wanneer deze eis wordt losgelaten dan is men natuurlijk bijna onbeperkt vrij om iedere doorlating te kiezen die men wil. Dan behoeft een rooster ook geen hoge wanden te hebben, zodat de interreflectie geen rol meer speelt. Dit heeft dan weer tot gevolg dat vervuiling, corrosie of meer in het algemeen de reflectie van het oppervlak van deze wanden, geen invloed meer heeft.

In de Beneluxtunnel zijn momenteel proeven in uitvoering waarbij verschillende methoden worden vergeleken waarop niet-zondichte roosters kunnen worden uitgevoerd. De resultaten daarvan en de herbezinning op de mogelijkheden van energiebesparing, doen de belangstelling voor lichtdoorlatende roosters voor tunnelingangsverlichting weer herleven.

De verlichting van korte tunnels valt eigenlijk buiten het bestek van dit rapport. Hier is echter niet alleen sprake van een geheel aparte verzameling problemen, maar ook is bekend dat deze problemen, vooral voor zover het de zichtbaarheid van objecten in de tunnel betreft, van zeer aanzienlijke aard zijn. En tenslotte komen korte tunnels veel voor, zowel binnen als buiten de bebouwde kom.

8. Onbeantwoorde vragen

In deze studie is een groot aantal vragen naar voren gekomen, waarvan een gedeelte beantwoord kon worden. Andere vragen zijn echter onbeantwoord gebleven. Uit deze vragen zal een onderzoekprogramma afgeleid moeten worden aan de hand van een prioriteitstelling. Deze prioriteitstelling is deels gebaseerd op de overwegingen zoals ze in deze studie zijn gegeven, maar ook voor een belangrijk gedeelte op geheel andere overwegingen (voor onderzoek beschikbare financiële en personele middelen enz.). Deze overwegingen liggen buiten het bereik van deze studie, en daarom zullen we er niet verder op ingaan, maar volstaan met te herhalen dat eigenlijk een goede prioriteitstelling alleen geleverd kan worden aan de hand van kosten/batenanalyse.

In dit rapport wordt volstaan met een opsomming te geven van de problemen die in de behandeling naar voren zijn gekomen, en die niet in de behandeling zelf beantwoord kunnen worden. Een aanduiding van het relatieve belang van de vragen blijft achterwege; dit zou eigenlijk al een soort van prioriteitstelling zijn. We geven dus alleen een inventarisatie, die, voor de overzichtelijkheid is gerubriceerd naar gezichtspunten die met het eventueel te ondernemen onderzoek samenhangen. Deze gezichtspunten zijn: psychologie, fysiologie, verkeerskundige en praktische.

1. TUNNELS VOOR HET WEGVERKEER

1.1 Inleiding

Dit rapport betreft de verlichting van tunnelingangen. Om dit probleem goed te kunnen bestuderen, is het wenselijk eerst in het algemeen in te gaan op de vragen waar, en waarom verkeerstunnels worden gebouwd. We zullen ons hier beperken tot tunnels die worden gebouwd voor het wegverkeer, en de tunnels voor andere doeleinden buiten beschouwing laten. Wel kan worden opgemerkt dat in het geheel van de ondergrondse bouwwerken ("le monde sousterrain") de tunnels voor het wegverkeer weliswaar een belangrijke plaats innemen, maar dat er ook veel tunnels (en analoge bouwsels) bestaan voor andere doeleinden. De belangrijkste daarbij zijn tunnels voor het railverkeer en leidingen ten behoeve van waterkrachtwerken. Wat betreft de civieltechnische aspecten bestaat er een aanzienlijke overeenkomst tussen dergelijke bouwsels en de tunnels voor het wegverkeer (Anon, 1981; Harries, 1981; Perotti, 1981; Wettlegren, 1981).

De tunnels voor het wegverkeer ontleen hun speciale plaats binnen het gebied van de tunnelbouw aan hun specifieke functie, namelijk die van schakel in een netwerk van wegen ten behoeve van het wegverkeer. We zullen bij de beschouwingen omtrent het wegverkeer in de eerste plaats de aandacht richten op het gemotoriseerde wegverkeer. Deze beperking wordt gerechtvaardigd door het feit dat vooral voor het gemotoriseerde verkeer tunnels, en dan in het bijzonder de ingang ervan, problemen van visuele aard opleveren - uiteraard naast andere problemen -, waarvoor dan weer verlichtingskundige oplossingen worden gezocht. Deze beperking houdt echter niet in dat er geen aandacht dient te worden besteed aan tunnels ten behoeve van andere groepen van verkeersdeelnemers; het zal blijken dat in het bijzonder aan tunnels voor fietsers en bromfietzers veel te weinig aandacht is besteed. Maar toch zal in de rest van dit rapport vrijwel steeds over het gemotoriseerde snelverkeer worden gesproken. Dit, naast de genoemde probleemconcentratie, ook

ter verbetering van de overzichtelijkheid van het rapport. In de meeste gevallen is het mogelijk de resultaten van de beschouwingen, gegeven voor autoverkeer, uiteraard na verandering van wat veranderd moet worden, toe te passen op andere groepen van verkeersdeelnemers.

Om na te gaan waar, en waarom tunnels worden gebouwd, kan men beginnen met de constatering dat er niet alleen wegen en wegennetten bestaan, maar ook hindernissen voor het verkeer - zoals bijvoorbeeld rivieren of kanalen, maar ook vliegvelden en bergen, terwijl niet zelden woongebieden, natuurgebieden of parken de wegeaanleg verhinderen. Voorts kan men constateren dat de bouw van een tunnel tot de mogelijkheden behoort om dergelijke hindernissen of obstakels te vermijden. Uiteraard zijn er ook andere middelen om deze hindernissen te vermijden; de keuze tussen de alternatieven waarvan de tunnel er één is, wordt voor een aanzienlijk deel gebaseerd op economische en ecologische overwegingen. Zie hiervoor de studies gemaakt door de PIARC (bijv. Anon, 1979b) en de IRF (Anon, 1981). Een moderne ontwikkeling is gegeven in de zogenaamde drijvende onderwaterbruggen, zie Flaate & Janbu (1981) en ook Arild (1975), Brandtzaeg (1972).

Het doel van een tunnel is dus: het overwinnen van een of andere hindernis. Uiteraard moet de tunnel dan niet zelf weer een hindernis vormen. Daarom stelt men meestal: de verkeersafwikkeling in een tunnel en de direct erbij horende toeritten moet tenminste even goed zijn als die in de rest van het wegtracé. Daarbij wordt het veelal wenselijk geacht met enige extra marge rekening te houden om er zeker van te zijn dat de tunnel zelf niet weer een hindernis wordt. Tevens houdt men daarbij rekening met het feit dat eventuele ongevallen in tunnels juist door de geringe, afgesloten ruimte ernstiger consequenties kunnen hebben dan overigens even "ernstige" ongevallen op de open weg (Werkman, 1959; Vreugdenhil, 1952).

Ook wanneer de verderweg liggende toeritten overbelast worden, kan het voorkomen dat het tunnelcomplex als geheel een hindernis wordt. Eventuele files kunnen dan op de toegangswegen voorkomen

en daarmee de totale tunnelverbinding in een kwaad daglicht stellen, ofschoon de capaciteit van de tunnel zelf voldoende is. Men moet daarbij overigens niet vergeten dat de file beter op de open weg kan staan dan in de tunnel zelf (De Wit & De Jong, 1980; zie ook Baerwald (ed), 1965; Edie & Foote, 1958; Feuchtinger, 1956; Forbes et al., 1958).

Voor de problematiek van de verlichting van tunnelingangen is dit alles echter van ondergeschikt belang; we zullen er dan ook in het volgende weinig aandacht aan besteden.

Over de opzet van het rapport nog het volgende. Het gaat hier om een probleemanalyse, dat wil dus zeggen dat dit rapport een bijdrage dient te leveren tot het aangeven welke onderwerpen nog voor nadere studie in aanmerking komen, waarbij het einddoel uiteraard is het kunnen realiseren van betere (goedkopere, meer effectieve) verlichtingsinstallaties voor tunnelingangen.

Uit de behandeling van de materie komen een aantal problemen naar voren die voor nadere studie in aanmerking komen. Deze studie zal als regel dienen te bestaan uit een meer gedetailleerde literatuurstudie, terwijl in een aantal gevallen een experimentele ondersteuning nuttig lijkt. De feitelijke, gedetailleerde opzet van dergelijke studies valt buiten het kader van dit rapport. Tenslotte nog een opmerking over de prioriteitenstelling binnen de in dit rapport naar voren gebrachte onderwerpen van studie. In beginsel zouden maatregelen, dus ook beslissingen omtrent het al-dan-niet ondernemen van onderzoek of studie, gebaseerd moeten zijn op doelmatigheidsoverwegingen (cost-effectiveness); zie bijv. Schreuder (1976). In de praktijk wordt door beperkingen buiten het eigenlijke onderzoekgebied vaak een afwijking van een optimale prioriteitenstelling veroorzaakt. En voorts spelen uiteraard bij het opstellen van dergelijke prioriteiten vele zaken een rol die in het onderhavige rapport niet aan de orde kunnen komen; zie bijv. Asmussen (1972). Derhalve wordt in dit rapport alleen een aanzet gegeven voor een prioriteitenstelling, maar het aangeven van de prioriteiten zelf behoort elders plaats te vinden.

1.2. Verkeersvoorzieningen

Tunnels zijn, net als wegen, te beschouwen als voorzieningen die worden getroffen ten behoeve van het adequaat verlopen van het verkeer. Het zijn dus verkeersvoorzieningen.

Het is de functie van verkeersvoorzieningen de verkeersdeelnemer de mogelijkheden te bieden het einddoel van zijn tocht te bereiken op een veilige, vlotte en comfortabele manier, en dit tegen zo laag mogelijke kosten (Schreuder, 1966, 1970, 1970a, 1974a, 1977, 1977a, 1978).

De eerste eis omtrent de functie van verkeersvoorzieningen betreft dus de veiligheid. Bij de beschrijving van de verkeersveiligheid drukt men zich meestal uit in termen van verkeersonveiligheid. Hiervoor wordt dan weer vaak het aantal verkeersongevallen, het aantal slachtoffers enz. per afgelegde afstand als maat genomen. Maatregelen om ongevallen te voorkomen zijn veelal verkeersmaatregelen. Het accent hierbij valt op het lichter maken van de taken van de verkeersdeelnemers. Dit kan o.a. worden bereikt door het verhogen van de voorspelbaarheid van de optredende situaties en wel de cognitieve voorspelbaarheid en de perceptieve voorspelbaarheid. De cognitieve voorspelbaarheid vereist uniformiteit in wegontwerp, gedragsregels en voertuigontwerp en het elimineren van situaties die voor de verkeersdeelnemers zeer moeilijk voorspelbaar zijn. De perceptieve voorspelbaarheid is gebaat bij het verbeteren van de waarneembaarheid van de situatie en het toepassen van speciale waarschuwingssystemen voor de nog niet geëlimineerde, moeilijk voorspelbare situaties.

Naast deze maatregelen, die dus gericht zijn op een verlaging van de kans op ongevallen, kunnen worden genoemd de maatregelen die de kans op letsel of dodelijke afloop verlagen bij een gegeven kans op ongevallen. En tenslotte zijn er de maatregelen die vermindering van de kans op blijvend letsel nastreven bij een gegeven kans op letsel (naar Janssen & Schreuder, 1974; zie ook Anon, 1980; Asmussen, 1972, 1972a, 1974, 1976, 1979, 1980; Janssen, 1974; Michon, 1979; SWOV, 1972, 1976).

De tweede eis die, wat betreft de functie, aan verkeersvoorzieningen kan worden gesteld, is de vlotheid. Twee aspecten moeten daarbij worden onderscheiden: de individuele reistijd en de totale prestatie. De eerste wordt gewoonlijk bij het comfort gerekend (niet geheel terecht overigens); de tweede is vooral een economische factor. Er is sprake van een verband tussen de gemiddelde snelheid en de bij de snelheid horende bereikbare verkeersintensiteit. Er bestaat een snelheid waarbij deze bereikbare verkeersintensiteit maximaal is. Deze intensiteit wordt beschouwd als de "capaciteit" van de weg. Hiermee hangt samen het zogenaamde afwikkelingsniveau (zie o.a. Baker et al., 1960; Botma, 1976).

Uiteraard bestaat er een nauwe relatie tussen de veiligheid en de vlotheid. Het zou te ver voeren hier in detail in te gaan op deze samenhang, maar in het algemeen kan men wel stellen dat de onveiligheid bij zeer hoge en bij zeer lage verkeersintensiteit hoger is dan bij middelmatig hoge verkeersintensiteit (Anon, 1965; Pfunzt, 1969).

Het bestaan van een relatie tussen verkeersonveiligheid en snelheid wordt zelden in twijfel getrokken. Het feit dat bij hogere snelheid de afstand waarbinnen kan worden gestopt zeer aanzienlijk toeneemt, zodat eventuele obstakels op grote afstand ontwaard moeten worden, gevoegd bij het feit dat de meeste auto's bij hoge snelheid moeilijk bestuurd kunnen worden, en dat de ernst van de afloop van botsingen sterk afhangt van de snelheid op het moment van botsing, lijkt een voldoende duidelijke aanwijzing te geven, zie bijv. Asmussen (1980).

Een geheel andere vraag is het of het instellen van snelheidslimieten, in het bijzonder van algemeen geldige maximum snelheden, een duidelijk aanwijsbaar positief effect heeft op de verkeersveiligheid, en vooral dan of dit leidt tot een positieve uitslag wanneer men de kosten en de baten van dergelijke maatregelen tegen elkaar afweegt. Over deze vraag is reeds jaren een discussie aan de gang die nog steeds niet heeft geleid tot een voor alle betrokkenen bevredigend antwoord. Als regel neemt men aan dat een zeer algemeen voor het gehele wegennet geldige (bijvoorbeeld lan-

delijke) snelheidslimiet minder effect oplevert dan één die meer is toegespitst op speciale situaties en/of bepaalde groepen van weggebruikers, mits op een adequate wijze aangeduid en gehandhaafd. Dit geldt dan zowel voor minimum als maximum snelheid (Kraay, 1973; Kraay & Mattie, 1973; SWOV, 1971a).

Deze constatering kan van belang zijn voor verkeerstunnels; het is immers te overwegen voor tunnels speciale snelheidslimieten in te stellen? Wel is van belang te constateren dat het effect van snelheidslimieten op de verkeersveiligheid in hoge mate wordt beïnvloed door de mate van controle. En aangezien controle duur is, heeft dit weer repercussies op de kosten/batenrelatie van de maatregel; zie Anon (1970).

Een overzicht van de resultaten van een verandering in maximum snelheid van 110 naar 90 km is gegeven in Nillson (1980) en Öberg & Carlsson (1980).

Verder blijkt het vooral van belang extreem grote snelheidsverschillen te vermijden. En tenslotte dient er, om tot optimale resultaten te komen, kennelijk een relatie te bestaan tussen de wettelijk ingestelde maximum snelheid en de snelheid die wat betreft verkeer en wegontwerp goed gereden kan worden, zie OECD (1972a).

De meeste aspecten van snelheidsbeperkingen en snelheidslimieten komen aan de orde bij het speciaal daaraan gewijde OECD-symposium (OECD, 1981a).

We hebben reeds vermeld dat er een duidelijke relatie bestaat tussen de gemiddelde snelheid - en dus ook de snelheid van de individuele voertuigen - en de verkeersintensiteit (Botma, 1976; 1977/1978; OECD, 1976).

Voor de snelheid die in de beschouwingen voorkomt, kiest men vaak de ontwerpsnelheid. Tegen het op deze manier gebruiken van het idee ontwerpsnelheid is wel het één en ander in te brengen, vooral wanneer men met meer speciale gevallen te maken heeft. Voor normale stukken weg (in het bijzonder stukken autosnelweg) bestaat er wel een zekere samenhang tussen de ontwerpsnelheid enerzijds en de gereden snelheid anderzijds, wanneer tenminste de daar

geldige snelheidslimiet niet aan de lage kant is. Maar het is natuurlijk op theoretische gronden als niet correct te beschouwen om als ontwerpsnelheid van een wegvak de gereden snelheid (bijvoorbeeld de 85-percentiel waarde) te nemen.

Dit alles betekent dat het niet steeds even duidelijk is of het zinvol is een ontwerpsnelheid van een tunnel op te geven, of een dergelijke ontwerpsnelheid voor een tunnel te vergelijken met die van de aangrenzende toegangswegen. Al deze overwegingen kunnen weer van belang zijn bij het beoordelen van filevorming bij tunnels, alsmede van de maatregelen die men tegen filevorming zou kunnen bedenken.

Als derde criterium is aangegeven het comfort. In het verleden werd dit vaak als een soort "restterm" van momenteel onbekende veiligheids- en vlotheidsaspecten beschouwd, deels gerelateerd aan de individuele rijnsnelheid, en deels aan de inspanning nodig voor het besturen van het voertuig. We zullen hier enige aandacht besteden aan de meer moderne opvattingen, mede omdat traditioneel de overwegingen van comfort steeds een grote rol hebben gespeeld bij het ontwerp van tunnelverlichtingsinstallaties.

Zo kan men aannemen dat het idee "comfort" in relatie kan worden gebracht met de mate waarin aan behoeften is voldaan. Nu is er nog lang geen overeenstemming onder de onderzoekers die zich met de vraag van menselijke behoeften en hun bevrediging bezighouden. Men mag zelfs wel van scholen daarin spreken, scholen die men vooral ook kan aantreffen in de aan deze ideeën ten grondslag liggende motivatietheorieën. Zeer globaal kan men spreken van drie scholen, die men zou kunnen aanduiden met "materialistisch", "biologisch" en "spiritueel".

De materialistische school gaat er vanuit dat de mens volledig kan worden beschreven in termen van voorwaardelijke reflexen, en dat motivatie tot welke activiteit dan ook in laatste instantie kan worden teruggebracht tot een streven naar (o.a. biofysische) homeostase. De beweegredenen van levende wezens inclusief de mens is volledig te beschrijven als het zoeken naar (materiële) bevre-

diging van simpel te beschrijven behoeften; het vermijden van honger, dorst, kou, voortplantingsverlangens, enz. Deze school vindt zijn meest extreme aanhangers onder de behavioristen (zie bijv. Cofer & Appley, 1964; Hebb, 1958; Sanders, 1972; Skinner, 1965, 1972). Aangezien deze theorieën nauwelijks meer kunnen voorspellen dan de pogingen van mensen om zoveel mogelijk alle activiteiten achterwege te laten, vinden ze niet veel mogelijkheid om een psychologische verklaring te geven van het verschijnsel "comfort" zoals hier bedoeld. Wel zou op basis hiervan een relatie gelegd kunnen worden (via het begrip "pijn"; zie Melzack, 1973) met het gevoel van discomfort zoals dat niet zelden bij verblinding voorkomt (zie hiervoor bijv. Adrian, 1964; Adrian & Schreuder, 1968, 1970, 1971; Benz, 1966; De Boer (ed), 1967; De Boer & Schreuder, 1967; Haubner, 1969; Hopkinson, 1940; Schreuder, 1972, 1972a, 1974).

De tweede school is die welke op bepaalde biologische beweegredenen teruggaat. Motivatie tot menselijke activiteit wordt in de eerste plaats gezien als een bevrediging van bepaalde lusten (zie bijv. Barnett, 1970; Fletcher, 1968; Von Hebenstreit, 1961; Lorenz, 1968; Parry, 1968; overzichten zijn gegeven door Krech et al., 1969; Schreuder, 1973; Vernon, 1971).

Deze beginselen, die men wel Freudiaans of psychoanalytisch zou kunnen noemen (Alexander & Selesnik, 1966; Brown, 1967) brengen ons nog niet veel verder bij een poging om het begrip "comfort" psychologisch aan te duiden.

Meer mogelijkheden lijken te bestaan bij de humanistische psychologie; (Giorgi, 1970; Maslov, 1954, 1968; zie ook Krech et al., 1969 en Schreuder, 1973). Hier gaat men uit van de gedachte dat een mens optimaal functioneert bij een bepaald activatieniveau. "Ieder levend wezen bevindt zich in een bepaalde toestand van activatie: het kan slapen of slaperig zijn, waakzaam, opgewonden of overspannen. Wisselingen in de activatietoestand stellen ons organisme in staat zo goed mogelijk afgestemd te blijven op de eisen die de omgeving stelt, en handhaving van het optimale niveau hangt ten nauwste samen met onze gevoelens van welbevinden. Activatie is te beschouwen als een soort bron waaruit we de door de omstandigheden verlangde mentale inspanning bekostigen. Een te

laag niveau van activatie beïnvloedt de prestatie nadelig doordat men slaperig en sloom reageert, maar ook een te hoog niveau is niet goed omdat men dan snel afgeleid en geïrriteerd raakt. Onze bron van mentale energie is niet onbeperkt: inspanning moet verdeeld worden over de verschillende onderdelen van een taak en dat gebeurt gewoonlijk op grond van de specifieke eisen die de taak stelt. Soms zal bijvoorbeeld snel reageren een eerste vereiste zijn, terwijl op andere momenten de precisie van een handeling belangrijker is dan de snelheid. Iemand die zijn hoofd bij zijn werk houdt zal zijn inspanning en zijn activatieniveau zo goed mogelijk aanpassen bij de omstandigheden waarin hij moet functioneren en bij storende invloeden steeds trachten het evenwichtsniveau te herstellen. De activatietheorie speelt in de hedendaagse experimentele psychologie een gewichtige en door veel empirisch onderzoek bevestigde rol (Brunia, 1976; Kahneman, 1973). Toepassing op sociale fenomenen zoals het verplaatsingsgedrag, impliceert een belangrijke verschuiving in de wijze waarop men dergelijke fenomenen denkt te kunnen sturen. Met name kan deze aanpak belangrijke consequenties hebben voor het economisch denken (Scitovsky, 1976). Niet behoeftebevredigend als zodanig, maar het handhaven van een optimaal niveau van activatie (ook wel arousal genoemd) is in deze opvatting "man's primary motivational principle". Welbevinden is een gevolg van het feit dat het organisme zich op dat optimale niveau van activatie (arousal) bevindt. Daarentegen is plezier of genoegen het gevolg van de variaties die zich in dat activatieniveau voordoen, en gedrag wordt dikwijls meer bepaald door gewoonten die gevormd zijn door vroegere plezierige ervaringen dan door een rationele afweging van alle beschikbare keuzemogelijkheden waarover de persoon beschikt (Lea, 1978). Welbevinden (comfort in de algemene zin) en genoegen komen hieruit naar voren als twee zeer fundamentele, in de menselijke fysiologie verankerde factoren."

Dit lange citaat uit Michon (1980) geeft precies aan hoe de relatie tussen comfort en andere psychologische en fysiologische verschijnselen kan worden gezien.

Maar ook in een ander opzicht kan er een relatie worden gelegd tussen comfort enerzijds en de bestuurdersprestatie anderzijds. Het is bekend dat bij vrij zoekgedrag het aftasten van het relevante gezichtsveld meer frequent gebeurt wanneer de taak als moeilijker wordt ervaren, zie bijv. Engel (1976). In verband met het voorafgaande zou men een taak (of een situatie) waarbij een grotere inspanning wordt vereist, als minder comfortabel kunnen beschouwen, vooral natuurlijk wanneer er van een uitgesproken zware belasting sprake is. Omgekeerd zou men zich ook kunnen voorstellen dat bij een situatie die als comfortabel wordt ervaren het zoekgedrag zodanig wordt gewijzigd dat de "scanning" minder frequent plaatsvindt. En hier ontstaat dan een mogelijke relatie met de verkeersveiligheid: het behoort tot de mogelijkheden dat de situatie die als comfortabel wordt ervaren en waarin de scanning dus weinig frequent is, in feite een zeer secure visuele waarneming vereist - een hoge frequentie van scanning dus. Hier zou dan ten onrechte een hoge mate aan ervaren (subjectieve) veiligheid bestaan.

Op het gebied van visueel zoekgedrag bestaat een uitgebreide literatuur (overzichten zijn gegeven door bijv. Blaauw & Riemersma, 1975; Cohen, 1978; Overington, 1976, hoofdstuk 8; Sanders, 1979). De relatie met comfort is echter meestal niet gelegd, en daarom is het gewenst een nadere studie te ondernemen over de relatie tussen waarnemingszekerheid, visueel zoekgedrag en comfort. Daarbij dient rekening te worden gehouden met het feit dat het visueel zoekgedrag afhangt van de graad van oefening, dus van de ervaring die de waarnemer heeft als automobilist (zie bijv. Bhise et al., 1975; Rockwell et al., 1970). Deze wens wordt nog versterkt door de andere aspecten die hierboven zijn genoemd, met name de motivationele aspecten. Gezien de vrij uitgebreide literatuur - zij het nogal verspreid - die er over deze onderwerpen bestaat, lijkt het wenselijk met een literatuurstudie te beginnen (zie par. 8.2.1.a).

Tenslotte kunnen we, in relatie tot wat men veelal onder "comfort" verstaat, ook wijzen op de subjectieve ervaringen betreffende

veiligheid, zowel openbare veiligheid als verkeersveiligheid. Dit punt is vooral van belang bij tunnels voor voetgangers en fietsers. Een aanzet voor een studie op dit gebied is beschreven door Van der Noort & Van Wegen (1980, 1980a), maar hierbij is weinig aandacht besteed aan de verlichting. Uit studies op ander gebied - met name wat betreft de verlichting van woonstraten en woonerven - is bekend dat er een relatie bestaat tussen verlichting en de gevoelens van welbevinden en subjectieve veiligheid (Anon, 1975; ANWB, 1976; Caminada & Van Bommel, 1980; Hendriks, 1978; NSVV, 1974/75, 1977; Schreuder, 1978b; Tan, 1978). Het lijkt daarom wenselijk de relatie tussen comfort, subjectieve veiligheid, openbare veiligheid en verlichting, ook voor tunnels nog eens nader te bestuderen (zie par. 8.2.1.b).

Tenslotte de kosten. Deze omvatten alle uitgaven ten laste van de overheid en de individuen om het verkeerssysteem operationeel te maken/te houden. Bij de kosten horen dus: de kosten van ongevallen, kosten van tijdverlies door congestie, aanleg- en onderhoudskosten van het wegennet, belasting- en slijtagekosten, maar ook "kosten" betreffende andere schaarse goederen zoals frisse lucht, stilte, ruimte enz., en ook de "kosten" van menselijk leed ten gevolge van ongevallen. De algemene beschouwingen over kosten hebben meestal een relatie tot de overwegingen betreffende kosten en baten, of ook tot de analyse van de doelmatigheid van maatregelen ter bevordering van het verkeer of van specifieke aspecten daarvan (bijvoorbeeld de veiligheid). Op dit gebied vindt veel onderzoek plaats (zie bijv. Asmussen & Schreuder, 1977; Flury, 1976, 1977, 1977a, 1978; Flury & Schreuder, 1977; Joachimi, 1975; Mainwaring, 1974; Marburger, 1977; OECD, 1980, 1981; Schreuder, 1976), maar tot een algemeen aanvaarde methode om de doelmatigheid van maatregelen te evalueren is men nog niet gekomen, laat staan dat men dit op ruime schaal al standaard kan toepassen. In het onderhavige rapport zullen de aspecten van doelmatigheid (of cost/effectiveness) dan ook slechts zijdelings aan de orde komen.

Hierboven is al een en ander gezegd over de functionele aanpak van de verkeersverlichting (Schreuder, 1970a, 1974, 1977).

We zullen dit hier niet herhalen, maar volstaan met samenvattend te constateren dat de (functionele) eisen die aan de verzamelde verlichtingsmiddelen dienen te worden gesteld een gevolg zijn van (en kunnen worden afgeleid uit) de eisen die kunnen worden gesteld ten behoeve van de minimaal noodzakelijke visuele informatie; eisen die op hun beurt weer volgen uit de functie die, gezien de verlangens van verplaatsing, worden gesteld aan de verkeersvoorzieningen in het algemeen.

Anderzijds kunnen uit de functionele eisen op hun beurt weer visuele vereisten worden afgeleid.

2. DE VERLICHTING VAN TUNNELS

Tunnels vormen een categorie apart binnen de objecten die van openbare verlichting worden voorzien. Immers, gewoonlijk is alleen 's nachts verlichting nodig, maar bij tunnels doen zich vooral de problemen overdag voor. Overdag is het lichtniveau onder de vrije hemel vaak zeer hoog. Wanneer er zich in een verkeerstraject een tunnel bevindt zal dit - wanneer er geen, of geringe, verlichting aanwezig is - leiden tot een relatief zeer donker weggedeelte. Aan de andere kant blijkt het technisch en economisch niet mogelijk te zijn een tunnel met kunstlicht even helder te verlichten als de door de zon beschenen open weg. Er is dus altijd sprake van een groot verschil in lichtniveau tussen de tunnel enerzijds en de aansluitende open wegen anderzijds. Het is nu het onderwerp van deze studie na te gaan aan welke voorwaarden de verlichting van tunnels moet voldoen om te voorkomen dat het bedoelde verschil tot ernstige problemen aanleiding geeft.

Tunnels kunnen in een aantal categorieën worden onderverdeeld. De eerste onderverdeling die van belang is, betreft de lengte. In feite gaat het daarbij niet in de eerste plaats om de lengte zelf, maar om de mate waarin de omgeving achter de uitgang zichtbaar is van een punt op enige afstand vóór de ingang: het gaat dus om de mate waarin men door de tunnel heen kan kijken. Uiteraard wordt dit in belangrijke mate bepaald door de lengte van de tunnel, maar ook door de breedte ervan, en van de aanwezigheid van verticale en/of horizontale bogen. Een tunnel waar men doorheen kan kijken doet zich voor als een donkere lijst in het gezichtsveld; de breedte van deze lijst - in hoekmaat gezien - maakt uit of er sprake is van problemen de zichtbaarheid betreffende in die tunnel. In Figuur 1 en 2 zijn een paar voorbeelden gegeven. Overigens is het een vraag die nog nader onderzoek verdient (zie ook par. 8.5.1.). Dit onderzoek zal vooral over twee punten moeten gaan:

1. Gaat het in de praktijk inderdaad in de eerste plaats over de breedte van dit "zwarte raam" of gaat het toch meer om de lengte zelf, of zijn het nog andere factoren die uiteindelijk bepalend zijn?

2. Hoe groot - of hoe breed - is dit "zwarte raam" in de praktijk nu eigenlijk, dit in afhankelijkheid van de geometrie van de tunnel, en rekeninghoudend met het daglicht dat van buiten af de tunnel binnenkomt (zie ook Schreuder, 1978a; en zie par. 8.5.2.). Over de terminologie van de lengte-indeling van tunnels bestaat overigens geen eenstemmigheid (zie ook Anon, 1979c) en zie par. 8.4.2.a).

Voor zover het de verlichtingsaspecten betreft, zullen we in dit rapport de volgende terminologie gebruiken:

- Tunnel: de verzamelnaam voor de constructies waar het hier om gaat.
- Een tunnel wordt onderdoorgang genoemd wanneer de donkere lijst zo smal is dat het zicht niet merkbaar wordt beïnvloed. Dit geldt met name voor tunnels die niet langer zijn dan ongeveer 30 à 40 meter. Deze categorie is niet alleen van belang omdat tunnels van deze lengte zeer veel voorkomen, maar ook omdat, zoals direct uit de definitie volgt, er geen merkbare invloed is op het zicht. Dat de lengte inderdaad bij ca. 30 à 40 meter uitkomt volgt niet alleen uit een eenvoudige geometrische beschouwing (zie Figuur 3), maar ook uit een aantal observaties uitgevoerd in het kader van de Werkgroep Tunnelverlichting van de Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde (Anon, 1978a; Holten & Meulders, 1979). Het bleek dat - onafhankelijk van de geometrie, de situering of het verkeer - tunnels van dergelijke lengten geen enkel visueel probleem opleverden. Dit geldt voor tunnels van de gebruikelijke soort; het is natuurlijk mogelijk dat in meer speciale gevallen ook een tunnel van ca 40 meter reeds zichtproblemen oplevert. Voorbeelden zijn daarvan gegeven door Schreuder (1964; 1965b); zie ook Figuur 4.
- Een tunnel wordt kort genoemd wanneer men van een punt gelegen op enige afstand voor de ingang, de uitgang en de omgeving voorbij de uitgang duidelijk kan waarnemen, maar wanneer tevens de donkere lijst zo breed is, dat een flink object onzichtbaar kan worden. Men kan daarbij denken aan tunnels waarvan de lengte tussen de 30 à 40 meter en de 80 meter ligt. Algemeen is dit niet te zeggen, omdat het uiteraard van belang is welke objecten kunnen verdwijnen, en waar die objecten zich dan op de weg bevinden. Met

andere woorden, de breedte van de tunnel, de eventuele aanwezigheid van vluchtstroken of parallelwegen, en de voor die tunnel normale verkeerssamenstelling zijn van belang; zie Figuur 5.

- Een tunnel wordt lang genoemd wanneer de uitgang, ook al is die zichtbaar van een punt vóór de tunnelingang, geen invloed van betekenis meer heeft op de zichtbaarheid van objecten in de tunnel. Dit kan reeds het geval zijn bij tunnels met een lengte van 80 à 100 meter; zie Figuur 6.

De hier gebruikte terminologie staat overigens nog ter discussie.

Ook in andere opzichten kan men tunnels in categorieën indelen:

1. De functie van de tunnel met betrekking tot het verkeer. Meestal kan men (tenminste voor de omstandigheden waaronder in Nederland de aanleg van tunnels wordt overwogen) volstaan met de andere gangbare categorieën van wegen ook voor de tunnels te volgen. Dus: binnen/-buiten de bebouwde kom, autosnelweg/autoweg/weg voor gemengd verkeer; al dan niet vrijliggende fietspaden enz.

2. De ligging van de tunnel ten opzichte van de kompasroos - of de windrichting zo men wil. Het blijkt van groot belang te zijn voor het ontwerp en de uitvoering van de verlichtingsmiddelen of de tunnel bijvoorbeeld Noord-Zuid of Oost-West verloopt. Dit in verband met de positie van de zon: bij de Oost-West verlopende tunnels heeft men een aanzienlijk deel van de tijd te maken met een inval van de zonnestrallen bijna recht tegen het verkeer in. Dit blijkt een van de grootste praktische problemen op te leveren.

3. De geografische ligging: tunnels die door bergen heen gaan vereisen een geheel andere aanpak voor de verlichting als tunnels die, naar beneden toe, in het vlakke land onder rivieren of kanalen doorgaan. Uiteraard is dit voor Nederland een gezichtspunt van ondergeschikt belang. Wel van belang is de constatering dat voor tunnels in steden, met hoge bebouwing vlakbij, weer andere eisen worden gesteld.

Er zijn voorstellen gedaan (Anon, 1979b; Tan, 1978c) om op basis van deze indelingscriteria te komen tot een aantal wel-omschreven klassen van tunnels. Het PIARC-voorstel betreft vooral visuele

omstandigheden van de tunnelingangen, het voorstel van Tan betreft, behalve dit, ook de "gevarenklasse" van de tunnel. Dergelijke voorstellen zijn erg nuttig en verdienen nadere uitwerking. Zie voor het PIARC-voorstel par. 6.3.7. Zie verder par. 8.4.2.b.

We gebruiken hier dus de volgende termen:

- Onderdoorgangen zijn zo kort dat ze geen invloed van belang hebben op het zicht.
- Korte tunnels zijn zo kort dat men er nog goed doorheen kan kijken; vrij grote objecten kunnen echter onzichtbaar worden doordat ze "verdwijnen" in de donkere lijst.
- Lange tunnels vormen de rest.

Wat betreft de verlichting kan hieraan het volgende (in zeer algemene termen) worden toegevoegd:

- Onderdoorgangen behoeven kennelijk overdag niet van een verlichtingsinstallatie te worden voorzien, omdat ze nu eenmaal nauwelijks het zicht beïnvloeden.
- Korte tunnels moeten wel worden verlicht, tenzij men accepteert dat bepaalde objecten onzichtbaar blijven. In zeer speciale omstandigheden kan dit gerechtvaardigd zijn, bijvoorbeeld bij brede, rechte tunnels in autosnelwegen, wanneer de vluchtstroken in de tunnel zijn doorgetrokken, of in tunnels die een geringe verkeersbelasting hebben waarbij bovendien slechts langzaam kan worden gereden. Wanneer de tunnel ingericht is voor gemengd verkeer, zal echter in vele gevallen een verlichting nodig zijn. Als echter korte tunnels van een verlichting moeten worden voorzien, dan worden zeer hoge eisen aan die verlichting gesteld. Immers, een dergelijke verlichting heeft de functie het zichtbaar maken van de objecten die anders onzichtbaar blijven; het zal verderop blijken dat daartoe zeer hoge lichtniveaus vereist zijn. Aangezien echter in andere opzichten het verlichten van korte tunnels een zaak is die nogal sterk afwijkt van het verlichten van lange tunnels, zal er in deze studie maar weinig aandacht aan worden besteed. Niet dat korte tunnels onbelangrijk zijn; integendeel. Uitgebreide studie over hun verlichting wordt ondernomen door de NSVV.

- Lange tunnels moeten steeds van een verlichting worden voorzien. Zoals gezegd doen de grootste problemen zich voor bij de verlichting van de ingang, en dan overdag. De verlichting omvat dus alleen de tunnel zelf. Aandacht wordt besteed aan de visuele omstandigheden op het weggedeelte van de eigenlijke tunnelingang. De onderhavige studie is in hoofdzaak beperkt tot de verlichting overdag van lange tunnels.

3. PROBLEEMSTELLING

Het onderwerp van deze studie is dus: aan welke eisen moet de verlichting overdag van tunnels voldoen? Daarbij gaat het in hoofdzaak om de verlichting van de ingangen van lange tunnels.

Uit het voorgaande kan daaromtrent een tweevoudige probleemstelling worden afgeleid:

1. Op welke wijze hangen de minimale functionele eisen te stellen aan de tunnelverlichting af van de visuele omstandigheden buiten en vooral die kort voor de tunnelingang?
2. Aan welke eisen moet de verlichting van het eerste stuk van de tunnel voldoen?

Volledigheidshalve vermelden we nog twee ermee samenhangende problemen:

3. Hoe moet de verlichting van het overgangsgebied tussen dit eerste stuk en het interieur van de tunnel worden uitgevoerd?
4. Aan welke eisen moet de verlichting in het interieur van de tunnel voldoen?

Deze vereisten hangen uiteraard samen met de functie van de tunnel. Zoals gezegd zijn daarbij drie gezichtspunten (afgezien van de kosten) te onderscheiden: veiligheid, vlotheid en comfort.

Op basis van wat bekend is over het gedrag, kan worden gesteld dat met betrekking tot de veiligheid allereerst gedacht dient te worden aan wat meestal wordt genoemd de "elementaire manoeuvre stoppen". Met andere woorden, de visuele vereisten en daarmee de lichttechnische vereisten zijn erop gebaseerd dat men de objecten waarvoor men moet stoppen (bijvoorbeeld een op de rijweg stilstaande auto) ook inderdaad kan zien op een zodanig vroeg tijdstip dat er nog werkelijk gestopt kan worden. Daarom neemt de waarneembaarheidsafstand van objecten een centrale plaats in bij de hierna volgende beschouwingen. Over de opzet van de bedoelde "analyse van de rijtaak" is elders reeds één en ander beschreven. (Zie bijv. Blaauw, 1979, 1980, 1980a; Blaauw & Riemersma, 1975; Griep, 1970, 1971; Schreuder, 1973, 1974a, 1977, 1980b, 1980d; Van der Colk & Schreuder, 1981). Hier zij vermeld dat de eis "stoppen wanneer nodig" bij de open weg niet in alle gevallen wordt gesteld (Schreuder, 1980d).

Het is moeilijk de vlotheid in algemene termen te beschrijven. Men volstaat er meestal mee om de vlotheid als een onderdeel van het comfort te beschouwen. Dit is, mede gezien hetgeen eerder (par. 1.2.) over comfort is gezegd, een niet erg bevredigende situatie.

Hoewel momenteel nog niet precies gezegd kan worden hoe men comfort kan kwantificeren, is het te verwachten dat ook de vereisten omtrent comfort kunnen worden uitgedrukt (tenminste in hoofdzaak) in termen van de waarneembaarheid van objecten (zie par. 1.2.). Men kan dan rekening houden met het feit dat voor comfortabel (hier dus synoniem met ontspannen) rijden een langere tijd voor herkennen van objecten, en ook een geringere toe te laten remvertraging nodig is (zie par. 5.1.3.). Tenslotte dient men rekening te houden met de in par. 1.2. aangegeven relatie tussen de graad van het comfort en de zoekfrequentie. Dit resulteert ook in een eis omtrent de waarneembaarheidsafstand van objecten waarvoor moet worden gestopt; alleen wordt de vereiste minimale afstand om aan eisen van comfort te voldoen, groter dan die behorende bij eisen van zichtbaarheid (of veiligheid). Deze extra eis van een grotere waarneembaarheidsafstand kan natuurlijk ook worden geïnterpreteerd als een extra veiligheidsmarge; immers men heeft te maken met een onderling zeer heterogene populatie van waarnemers c.q. bestuurders. Op die manier wordt een verbinding gelegd tussen eisen voor veiligheid en die voor rijcomfort (zie ook Schreuder, 1978, 1978c).

Het doel van dit rapport is nu, nader in te gaan op de aan het begin van dit hoofdstuk aangegeven (tweevoudige) probleemstelling. Meer in het bijzonder zal onze aandacht zich richten op het nagaan of er nog nader (wetenschappelijk, fundamenteel) onderzoek nodig is om de gestelde vragen te kunnen beantwoorden. Uiteraard moeten we daartoe in detail ingaan op al hetgeen nu reeds bekend is.

4. HISTORISCH OVERZICHT

4.1. De eerste generatie van tunnelverlichting

De eerste tunnels speciaal voor het gemotoriseerde wegverkeer ontworpen, stammen uit de twintiger jaren (Werkman, 1959). De nog oudere tunnels waren bedoeld voor langzaam verkeer, zodat er van zichtproblemen geen sprake was. Er is overigens weinig bekend over de verlichting van die oude tunnels. Het gemotoriseerde verkeer echter stelde aanzienlijke eisen aan de verlichting. In de eerste tijd werd daarbij vooral gelet op een behoorlijke verlichting in het interieur van de tunnel. Maar toch werd reeds enige aandacht besteed aan de ingang: men installeerde over enige tientallen meters een "drempelverlichting" waarmee men een verlichtingssterkte van ca 1000 lux probeerde te bereiken. (Vreugdenhil, 1952). Ook zijn in enkele gevallen lichtroosters voor de tunnel aangebracht (Myers, 1939).

Algemeen toepasbaar, wetenschappelijk onderzoek werd niet uitgevoerd. Men leerde vooral van de praktijk. Deze praktijk werd met enkele studies aangevuld die gericht waren op de speciale problemen zoals die zich bij een enkele tunnel voordeden (zie hiervoor Anon, 1938; Myers, 1939; Van Bruggen, 1941; Vreugdenhil, 1952). Uit deze studies volgden dan vaak oplossingen die op die speciale gevallen toegespitst waren.

De verlichtingsinstallaties van tunnelingangen uit de eerste generatie waren gebaseerd op de overweging dat er een zekere tijd nodig is voor de adaptatie van het heldere daglicht naar de donkere tunnel, en dat deze adaptatie wordt bepaald door de verandering in de diameter van de oogpupil. Meestal werden de metingen van Nutting (1920) als basis aangenomen. Daaruit volgde een adaptietijd van ca 5 tot 10 seconden. En daaruit volgde weer de lengte van de drempelzone (enige tientallen meters). Met de, overigens wel degelijk aanwezige, kennis over de eigenlijke oogadaptatie werd in de praktijk van de tunnelverlichting geen rekening gehouden; ook niet met het feit dat de waarneming in de donkere tunnelingang ongunstig wordt beïnvloed door een grote helderheid van de omgeving direct om

de ingang heen door zogenaamde inductieverschijnselen (zie Horeman, 1963, 1965; Schreuder, 1964). Dit type verlichtingsinstallatie, zoals bijvoorbeeld geïnstalleerd in de tunnels te Hamburg, New York (Holland-tunnel en Lincoln-tunnel), Antwerpen en Rotterdam, bleek bij hogere verkeersbelasting niet meer zo goed te voldoen. Daarom heeft men voor het ontwerp van de tunnel te Velsen, in de vijftiger jaren, gekozen voor een veel langere drempelzone (ongeveer 150 m), met een veel hoger lichtniveau. Door de toepassing van daglichtroosters was het lichtniveau veel hoger dan 1000 lux; luminanties van 800 cd/m^2 zijn gemeten (zie Schreuder, 1964; Zijl, 1958). Bij deze tunnel is echter weinig aandacht besteed aan periodieke, tijdafhankelijke effecten. Er is gekozen voor een verlichtingsinstallatie waarin sterke flikkereffecten kunnen optreden.

Tenslotte worden de tunnels, in deze periode gebouwd, gekenmerkt door het feit dat de vormgeving en de materiaalkeuze van de ingangspartij niet door utilitaire, maar door esthetische overwegingen is bepaald. Dit heeft in vele gevallen geleid tot een heldere omgeving direct om de tunnelingang (Wentink et al., 1957).

In de literatuur zijn vele tunnels beschreven die tot de "eerste generatie" gerekend kunnen worden. De belangrijkste publikaties zijn: Cohu (1960); Damen (1959); Felzer (1952); Geenans & Reid (1950); Harris (1956); Lingenfelzer (1937/1938); Ramel (ed.) (1957); Reid & Shannon (1940); Riemsdijk & Alpherts (1946); Shackelforth & Atwater (1924); Singstad (1934); Swetland (1940; 1941; 1957); Vander Trappen (1954). Maar ook zijn in deze jaren reeds aanwijzingen voor een verdere ontwikkeling te zien (Anon, 1958, 1967, 1971; Balder & Schreuder, 1959; Busson, 1960).

4.2. De tweede generatie

De massamotorisering die in de meeste geïndustrialiseerde landen in de zestiger jaren zijn beslag kreeg, deed de noodzaak ontstaan voor vele tunnels in drukke wegen. Er ontstond in deze jaren een nieuwe aanpak van de techniek van het verlichten van tunnelingen, die zo sterk van het voorafgaande afweek dat men rustig van een tweede generatie kan spreken. Deze tweede generatie wordt gekenmerkt door het volgende:

- het grote aantal tunnels dat gebouwd werd, deed de noodzaak gevoelen van een betere wetenschappelijk gebaseerde theorie;
- ten gevolge van de hoge snelheid en de grote dichtheid van het verkeer kwam de nadruk veel meer op de ingang van de tunnel te liggen, en relatief minder op het interieur;
- de zeer gunstige economische toestand in de meeste landen leidde ertoe dat grote aandacht werd besteed aan het rijcomfort.

Deze periode werd gekenmerkt door een grote opbloei van het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de tunnelverlichting. Een voorbode daarvan is de studie van Kruithof (1948) waarbij voor de eerste maal een systematisch experimenteel onderzoek is uitgevoerd betreffende de zichtomstandigheden bij tunnelingangen. Daarna volgden studies van Brass et al. (1957), Jainski (1959), Kabayama (1963), Lossagk (1955), Mäder & Fuchs (1966), Smith & Waldram (1957), Waldram (1952, 1962) en vele anderen. Een afsluiting van deze periode vormt het onderzoek van Schreuder (1964) waarin de meeste aspecten die horen bij de verlichting van tunnels zijn beschouwd. Dit onderzoek heeft een belangrijke bijdrage geleverd bij het opzetten en uitwerken van de Aanbevelingen van Tunnelverlichting van de CIE (1973) aangezien die voor een belangrijk gedeelte gebaseerd zijn op de aanbevelingen uit Nederland (Anon, 1963). De CIE-aanbevelingen zijn de basis waarop vele nationale richtlijnen en aanbevelingen zijn gebaseerd (Anon, 1968, 1972a, 1973, 1975d, 1977c, 1979b; DIN, 1972; Van den Bijllaardt, 1981). Bij het ontwerp van een groot aantal tunnels in vele landen zijn ze gebruikt, ofschoon er wellicht niet één tunnel te vinden is die precies in alle opzichten aan de aanbevelingen voldoet. Veel van deze tunnels zijn in de literatuur beschreven. De meest belangrijke publikaties zijn wat dit betreft de volgende: Anon (1977a, 1977b, 1980a, 1980f, 1980g, 1980k; Barthès (1966); Griffioen (1966); Kalberlah (1970); Lévy (1980); Löwe (1980); Narisada (1975); Prochazka (1979); Schreuder (1973a); Simkovics (1978, 1979); Van den Bijllaardt (1975). Sommige tunnels zijn zeer in de publiciteit gekomen, waarbij de tunnel zelf en de verlichting op vele plaatsen zijn beschreven.

Voorbeelden daarvan zijn: de Arlbergtunnel in Oostenrijk (Demetz, 1978, 1979; Raschauer, 1979; Widmer, 1980; Wiesner, 1978, 1979; Winner, 1979), de Elbetunnel in Duitsland (Anon, 1975a, 1975b, 1975c; Scholz, 1974) en de St. Gotthardtunnel in Zwitserland (Anon, 1977, 1980, 1980c, 1980d, 1980e; Baumann, 1980, 1980a; Drent, 1978; Lenz, 1980; Riemerschneider, 1978).

De hiervoor genoemde aanbevelingen van de CIE (1973) zijn gebaseerd op een aantal uitgangspunten. Deze zijn voor een deel resultaten van het toen reeds uitgevoerde onderzoek, voor een deel gevolgtrekkingen uit praktijkervaringen, maar ook voor een deel postulaten-aannamen die zo gesteld zijn omdat dat aannemelijk leek. De belangrijkste van deze uitgangspunten zijn hieronder opgesomd. Bij deze opsomming is de volgorde waarin een automobilist die door een tunnel heenrijdt ermee wordt geconfronteerd, aangehouden. Een paar van de gebruikte begrippen zijn toegelicht in Figuur 7.

1. Overdag bij een rit over het open veld kan de adaptatietoestand van het oog als constant worden beschouwd. De adaptatietoestand kan worden beschreven met de adaptatieluminantie L_a . De buitenluminantie wordt L_1 genoemd. Verderop wordt meer in detail besproken wat L_a en L_1 precies zijn; hier is het voldoende om aan te geven dat L_1 het "gemiddelde" is van de gezichtsveldluminantie bij een rit over het open veld.

2. In het open veld komen waarden van L_1 van 8000 cd/m^2 of meer vaak voor.

3. De adaptatie blijft gelijk aan L_1 tot op een geringe afstand van de tunnel. Anders gezegd: het zogenoemde adaptatiepunt (het punt waar de adaptatie een rol begint te spelen) ligt op korte afstand van de tunnel (Figuur 7).

4. Over een zeer breed gebied van L_1 -waarden bestaat er een vaste verhouding $L_2/L_1=0,1$, waarbij L_2 de minimale luminantie is in het eerste stuk van de tunnel, de zogenaamde drempelzone.

5. De luminantie in de drempelzone, die 50 tot 100 m lang moet zijn, is constant.

6. Daglichtroosters, gebruikt voor de verlichting van de tunnelingang, moeten zo zijn geconstrueerd dat de zon nooit rechtstreeks de weg eronder kan treffen : ze moeten "zondicht" zijn.

7. Na de drempelzone volgt de overgangszone. In de overgangszone kan naar binnen toe de luminantie afnemen met globaal een factor 10 in 2 à 3 seconden.
8. De luminantie in het interieur van lange tunnels moet ongeveer 10 tot 15 cd/m² bedragen.
9. Wanneer geconcentreerde lichtbronnen worden gebruikt moet hun onderlinge afstand zo worden gekozen dat, bij de normale snelheden, flikkerfrequenties tussen 4 en 10 Hz in het geheel niet en tussen 2,5 en 14 Hz bij voorkeur niet voorkomen.

Vermeld dient te worden dat in Oostenrijk en Zwitserland de door Mäder afgeleide relatie $L_2 = 0,19 L_1^{0,9}$ wordt gehanteerd en niet de van Schreuder afkomstige, en door Narisada bevestigde, relatie $L_2/L_1 = 0,1$ (zie hiervoor ook CIE, 1981). Alleen bij hoge L_1 -waarden treden aanmerkelijke verschillen op tussen deze twee relaties (Schreuder, 1968). In hoofdstuk 6 zullen we uitgebreid ingaan op deze zaken.

In de jaren tussen - globaal gesproken - 1965 en 1975 is er een zeer grote belangstelling gegroeid voor het onderwerp tunnelverlichting. Dit heeft geleid tot een aanzienlijke hoeveelheid onderzoek, zowel theoretisch gericht laboratoriumonderzoek als meer op de praktijk toegespitste studies. De belangrijkste hiervan zijn beschreven in de hierna genoemde publikaties: Adrian (1976, 1979); Adrian & Eberbach (1969); Anon (1971a); Armington et al. (1978); Baba et al. (1967); Bonomo (1980); Dubuisson (1973, 1974, 1978); Einhorn (1975); Freiburghaus (1975); Gallagher & Freedman (1979); Gallagher et al. (1979); Gudum & Vestergaard (1971); Holmes (1971); Hopfwieser (1977); Inohara (1979); Janoff (1975, 1977); Ketvirtis (1975); Lossagk (1967); Mäder (1978); Murata & Nakamura (1970); Narisada (1972); Narisada & Yoshikawa (1974, 1978); Narisada & Yoshimura (1974, 1977); Narisada et al. (1977); Perrier (1977); Riemenschneider (1970); Riemenschneider & Müller (1975); Rinalducci (1972); Schreuder (1963, 1965, 1965a, 1968, 1975, 1977b); Schröter (1977); Van den Bijllaardt (1977); Van den Bijllaardt & Narisada (1980); Walthert (1978, 1978a).

Een aantal gelijktijdig optredende, maar onderling niet samenhangende factoren heeft een herbezinning omtrent de CIE-aanbevelingen nodig gemaakt.

Ten eerste bleken de meeste moderne tunnels, ook al voldeden ze niet in alle opzichten geheel aan de CIE-aanbevelingen, toch bevredigend verlicht te zijn. Het had er dus alle schijn van dat de CIE-aanbevelingen strenger zijn dan strikt nodig. Verder waren de CIE-aanbevelingen opgesteld in een tijd dat bijna alle belangrijke tunnels in het vlakke land werden gebouwd en bijna steeds ca 1 km lang waren. Zeer lange tunnels en tunnels in het bergland kwamen nauwelijks aan de orde; de zeer veel voorkomende lange onderdoorgang ook niet. Maar belangrijker is dat men, sinds het opstellen van de CIE-aanbevelingen, op een geheel andere manier over het gebruik van elektrische energie is gaan denken, en dat bovendien de economische situatie vrijwel overal zeer veel slechter is geworden. Deze herbezinning heeft zodanig belangrijke consequenties opgeleverd dat zich een geheel nieuwe techniek voor het verlichten van tunnelingangen schijnt aan te dienen, de derde generatie (zie ook Schreuder, 1980).

4.3. De derde generatie

Zoals reeds gezegd werden de tunnels van de eerste generatie gekenmerkt door het feit dat de ingangspartij meestal werd ontworpen op esthetische gronden, en dat dit vaak resulteerde in een lichtgekleurde en dus zeer heldere omgeving direct bij de tunnelingang. Deze trend zette zich in de periode van de tweede generatie voort. Ook toen waren tunnels, behalve verkeersvoorziening, vaak een statussymbool voor een stad of een landstreek. Toch is het in een aantal gevallen gelukt bij het ontwerp van een ingangspartij meer aandacht te gaan besteden aan de functionele vereisten. De ervaring had intussen geleerd wat dit diende in te houden: de tunnelopening diende zo groot mogelijk (zo hoog mogelijk) te zijn, en de omgeving zo donker mogelijk. Bij tunnels waarbij de drempelzone wordt verlicht met behulp van daglichtroosters, is dit tamelijk gemakkelijk te realiseren, zoals blijkt uit bijvoorbeeld de Coentunnel bij

Amsterdam en de Beneluxtunnel bij Rotterdam. Het bleek aldus goed mogelijk door middel van op zich zelf vrij eenvoudige en goedkope maatregelen te bereiken dat de luminantie dicht voor de tunnelingang veel lager was dan die in het vrije veld. Het bleek dat daarbij het vroegtijdig afschermen van de vrije hemel (bijvoorbeeld door hoog naar boven toe doorgetrokken daglichtroosters) een belangrijke rol speelt.

Zo bleek dus dat de tweede generatie, hoewel deze theoretisch behoorlijk was onderbouwd, in de praktijk niet zo erg goed voldeed. En omdat er juist in die jaren veel nieuwe, belangrijke tunnels werden gebouwd, greep men terug op de praktijkervaring en het "gezond verstand" om tot een meer bevredigende oplossing te komen. Men zou kunnen spreken van een nieuwe aanpak, misschien zelfs wel van een nieuwe denktrant. Zoals gezegd, is het eindresultaat een type van verlichtingsontwerp dat sterk afwijkt van het voorafgaande, zo sterk dat men wel van een nieuwe "generatie" van tunnelverlichting kan spreken, de derde dus. Maar al snel bleek dat niet alleen de praktische uitvoering, maar ook (en zelfs vooral) de theoretische onderbouwing bij de derde generatie anders is dan bij de tweede generatie. Die theoretische onderbouwing bleek nog aanzienlijke lacunes te vertonen. Het is nu het doel van het onderhavige rapport om deze lacunes op te sporen en - zo ver mogelijk - aan te geven hoe die lacunes door onderzoek kunnen worden opgevuld.

In de hierna volgende hoofdstukken zullen we in detail ingaan op de consequenties die volgen uit deze historische ontwikkeling. Zoals reeds eerder aangegeven, zullen we ons daarbij vooral richten op de nog niet opgeloste vraagstukken, meer in het bijzonder op het onderzoek dat eventueel nog nodig zal blijken te zijn.

5. DE PROBLEEMANALYSE

5.1. De algemene beschrijving

5.1.1. Inleiding

De problemen betreffende de verlichting overdag kunnen worden gereduceerd tot de probleemstelling hoe de verlichting moet zijn zodat onder verschillende omstandigheden de relevante objecten tijdig kunnen worden waargenomen.

5.1.2. Relevante objecten

Wanneer men probeert te komen tot een oplossing van deze vraagstelling, is de eerste moeilijkheid die men tegenkomt de noodzaak de relevante objecten nader te beschrijven. Over deze "relevante objecten" heerst niet alleen veel verschil van opvatting, er bestaan hieromtrent ook misverstanden. De gangbare weg begint met het op nogal arbitraire wijze aanwijzen van een object dat als maatgevend wordt gesteld voor de visuele aspecten van de rijtaak. Deze werkwijze is in de verkeersverlichting ingevoerd door Dunbar (1938) en, in verschillende vormen, door velen nagevolgd. We noemen hierbij: Bindels (1973); Blackwell & Blackwell (1977); De Boer (1951, 1967); De Boer & Morass (1956); De Boer & Schreuder (1969); De Boer & Vermeulen (1951, 1951a); De Boer et al. (1959); Economopoulos (1977, 1978); Fisher (1968); Fisher & Hall (1978); Gallagher & McGuire (1975); Hemion (1968); Jehu (1965); Johanssen & Rumar (1968); Knudsen (1968); Lindae (1969); NSVV (1949); Rockwell et al. (1970); Rumar (1970, 1972, 1973); Schmidt-Clausen & Bindels (1971); Schreuder (1971, 1977, 1979, 1980a); Smith (1938); Waldram (1938).

Volgens de opvattingen van Dunbar hangt het al dan niet kunnen waarnemen van objecten ervan af of het contrast tussen deze objecten en hun directe achtergrond groot genoeg is. Oogfysiologisch gezien betekent dit dat het hier gaat om een eigenschap die met de "contrastgevoeligheid" wordt aangeduid. Dit is de eigenschap van het visuele systeem om contrasten te kunnen waarnemen, of,

anders gezegd, het verschil te kunnen zien - de afgrenzing te kunnen zien - tussen gezichtsveldgedeelten met verschillende luminantie.

Nu gaat het in het wegverkeer, zoals met name door de genoemde Dunbar is onderzocht en ook aangetoond, niet om de drempelwaarde van de contrastgevoeligheid. (Een drempelwaarde is gedefinieerd als die waarde die door een standaardwaarnemer onder standaardcondities nog juist in 50% van de gevallen kan worden waargenomen). Dit levert het eerste probleem op: er is weinig bekend over de waarneembaarheid van objecten die beter zichtbaar zijn dan de drempel zoals juist gedefinieerd. Het onderzoek van Blackwell en diens medewerkers (Blackwell, 1946, 1955, 1959, 1969, 1969a, 1976, 1979; Blackwell & Blackwell, 1971, 1977a, 1979; Blackwell & Scott, 1976; Blackwell & Tsou, 1976; Smith, 1976; zie echter ook Bodman, 1973; Boyce, 1978; Fry, 1962; Padmos & Vos, 1979) een onderzoek dat de basis heeft gevormd voor het CIE-rapport over dit onderwerp (CIE, 1972; zie ook CIE, 1979) geeft de suggestie dat bovendrempelige waarneming aan dezelfde wetmatigheden voldoet als waarneming bij de drempel van waarneming. Andere proefnemingen, bijvoorbeeld die welke zijn uitgevoerd omtrent de opvallendheid van signaallichten en de herkenbaarheid van hun kleur (Adrian, 1963; Attwood, 1976; Balder, 1956; CIE, 1975, 1980a; Cole & Brown, 1966; Fisher & Cole, 1974; Hargroves, 1971; Janoff et al., 1970; King & Finch, 1969; Middleton, 1952; Mortimer, 1971; Projector et al., 1969; Roszbach, 1971; Schreuder, 1976a) geven echter de suggestie dat bij bovendrempelig waarnemen andere verschijnselen of andere processen een rol spelen. Dit laatste is intuïtief gezien ook eigenlijk wel te verwachten, zodat men er waarschijnlijk verstandig aan doet de waarnemingen van Blackwell en het daarop gebaseerde CIE-rapport No. 19 voorzichtig te interpreteren.

Dunbar, en later o.a. De Boer (1951, 1967) en Schreuder (1964, 1971a, 1975) hebben gekozen voor een meer pragmatische aanpak. Men heeft aangenomen dat een object van enige decimeters groot steeds een gevaar zal opleveren wanneer het, ongezien, door een auto wordt aangereiden. Dit is plausibel wanneer men aan een steen van 20 of 30 cm grootte denkt.

Aangezien zulk een steen overal op de weg kan voorkomen (let wel, er staat kan en niet zal) is ten eerste het voorkomen steeds onverwacht, en is ten tweede het contrast tussen de steen en de achtergrond niet te voorspellen. Op basis van de proeven van Dunbar (1938) wordt vaak aangenomen dat bij onverwacht voorkomende voorwerpen de afstand van waar de voorwerpen kunnen worden waargenomen, gehalveerd wordt. Omdat contrast en afmetingen uiteraard onbekend zijn, worden ze - willekeurig, maar met gezond verstand - gekozen.

Op grond van dergelijke overwegingen is vaak een object van 20 x 20 cm² soms ook 30 x 30 cm² en een contrast van 20% (soms 30%) als een kritisch object beschouwd. Dit betekent dat men eist dat een dergelijk object op tenminste de stopafstand kan worden waargenomen. Hieraan is toegevoegd dat ten eerste het zien (detectie) niet voldoende is; een object moet gezien kunnen worden, en herkend, en ingedeeld bij de klasse objecten waarvoor moet worden gestopt, voordat de bestuurder kan beginnen met remmen. Hierbij moet worden gewezen op hetgeen hiervoor (par. 1.2.) is gezegd over comfort in verband met de "zoekfrequentie". En ten tweede spelen bij de waarneming - en dan met name bij het herkennen - van vele grote objecten de kleine delen ervan een doorslaggevende rol. Op grond hiervan zijn de kleine objecten niet alleen als kritisch obstakel beschouwd, maar meer in het algemeen als die objecten aan de hand waarvan de visuele taak kan worden beschreven. Met dit in gedachten is de discussie of het kritisch object misschien toch wel groter gekozen moet worden niet geheel relevant - wel natuurlijk of een object van 20 x 20 cm² wel zo gevaarlijk is. Deze gedachtengang is terug te vinden bij de introductie van het concept "revealing power" in de openbare verlichting (zie hiervoor Frederiksen, 1976; Knudsen, 1968; Smith, 1938; Waldram, 1938).

Het mag vreemd lijken dat men het bepalen van de afmetingen van het object dat als kritisch wordt beschouwd zo weinig ernstig schijnt te nemen. Dit hangt samen met het feit dat men voorondersteld heeft dat de waarneembaarheid van het object alleen beschreven wordt door de contrastwaarneming. Zoals gezegd, gaat het daarbij om het ontwaren van een grens (een grenslijn) tussen twee aan

elkaar grenzende gebieden in het gezichtsveld - hier dus de schijnbare grenslijn tussen de steen en het gedeelte van het wegdek dat de achtergrond vormt. Het zal duidelijk zijn dat de grootte van het object niet veel invloed zal hebben op de mogelijkheid om deze grenslijn te ontwaren.

Deze beschouwing kan als volgt kwantitatief ondersteund worden. Het gaat bij tunnelverlichting overdag om luminanties die meer zijn (meestal veel meer zijn) dan 10 cd/m^2 .

Uit de literatuur is bekend dat het "gemiddelde" oog dan een gezichtsscherpte heeft die correspondeert met het kunnen waarnemen van details van ca 0,7 boogminuten (zie bijv. Riggs, 1965; Schreuder, 1976a; Van Norren, 1974).

De voorwerpen die op de open weg van belang kunnen zijn voor het verkeer zijn echter veel groter: men kan denken aan voorwerpen die een hoek van 7 boogminuten beslaan (dat is 20 cm op 100 m).

Een geheel andere zaak is het contrast. Uit hetgeen verderop is beschreven (zie par. 6.2.) blijkt dat de numerieke waarde van het contrast een grote invloed heeft op de waarneembaarheid van objecten. Het is dan ook bepaald niet gelijk of men als contrast voor het object dat als standaard wordt gekozen 20% of 30% kiest. En daarbij komt dat men een keuze moet doen, omdat men uit de aard der zaak in de praktijk met allerlei voorwerpen, met zeer verschillende kleur en reflectie, rekening moet houden als potentieel "gevaarlijk" obstakel. Een bevredigende oplossing is hiervoor niet gevonden.

Schreuder (1964) heeft, aan de voorzichtige kant blijvend, een contrast van 20% voorgesteld. De Japanse aanbevelingen (Anon, 1973) zijn voor een deel gebaseerd op een contrast van 25% (zie ook CIE, 1981), terwijl Bonomo (1980) gevonden heeft dat in de praktijk dergelijke objecten nooit zichtbaar zijn in tunnelingangen, ook niet wanneer ze overigens goed verlicht zijn.

Er is dus duidelijk een lacune in de kennis; het is echter niet zonder meer duidelijk om te bepalen hoe deze lacune kan worden opgevuld (zie ook par. 8.4.1.a.). De voor de hand liggende methode (namelijk om de reflectie en daarmee het contrast te meten van die

voorwerpen die in bestaande tunnels worden aangetroffen en die als gevaarlijke objecten kunnen gelden) komt niet in aanmerking, juist omdat in de praktijk dergelijke objecten nauwelijks voorkomen. En dit geeft dan weer te denken over het algemene beginsel om de criteria voor zichtbaarheid voor het gemotoriseerde wegverkeer af te leiden uit de waarneembaarheid van kleine obstakels. Op dit punt wordt momenteel veel onderzoek verricht. Zie voor de theoretische overwegingen bijvoorbeeld Blackwell & Blackwell (1977b); Edie (1961); Economopoulos (1978); Gibson (1950); Godthelp (1977); Haight (1963); Ketvirtis (1967); Ketvirtis & Cooper (1977); Krendel & McRuer (1968); Rumar (1980); Schreuder (1974a, 1975a, 1977, 1978c, 1980b, 1980c); Veling et al. (1978); Vlek & Wagenaar (1979). Experimenten op dit gebied zijn onder meer beschreven door Blaauw (1979, 1980, 1980a, 1980b); Fisher & Hall (1970); Godthelp (1978, 1980); Janssen (1974a); McRuer et al. (1977); Mortimer (1979); Riemersma (1979, 1979a); Roszbach (1974); Walraven (1980). Al deze studies zijn toegespitst op de situaties van het nachtrijden; ze zijn dus mogelijk niet rechtstreeks toepasbaar bij het analyseren van het overdag een tunnel binnenrijden.

Nader onderzoek is dus nog kennelijk nodig: ten eerste meer specifiek naar de contrastwaarde waarmee het beste de eventuele "gevaarlijke" objecten in een tunnel kunnen worden beschreven, en ten tweede, meer in het algemeen, op welke wijze de rijtaak het beste kan worden beschreven.

En nu de praktijk: zolang het probleem niet is opgelost neemt men vaak toch maar (willekeurig) aan dat met een contrastwaarde van 20%, het object dat op de meest zinvolle wijze de visuele taak bij het overdag binnenrijden van een tunnel beschrijft, kan worden gekarakteriseerd. In plaats van die 20% nemen anderen - al even willekeurig - soms 25% of soms 30%!

Een andere groep onderzoekers heeft, aansluiting zoekend bij de meer gangbare bepaling van het gezichtsvermogen, de gezichtsscherpte als criterium gekozen voor de visuele waarneming. Dit criterium is reeds lange tijd in gebruik (zie bijv. Adrian, 1965; Adrian & Kokoschka, 1965; Balder & Fortuin, 1955; Bouman, 1936; De Boer,

1960; Hartridge, 1932; Hecht, 1928; Luckiesh & Moss, 1937; Lythgoe, 1932). Deze aanpak is voor de hand liggend bij onderzoek dat betrekking heeft op de gewenste lichtniveaus bij binnenverlichting, met name voor kantoorverlichting. Immers, daar hebben de meest voorkomende oogtaken te maken met schrijven, lezen, e.d.; oogtaken die goed kunnen worden beschreven met de gangbare definities van gezichtsscherpte. Daarbij wordt de leesbaarheid van standaardletters gemeten, of van geabstraheerde letters zoals de Landolt-ring. Vooral dit laatste object is zeer geschikt als zichtbaarheids criterium bij laboratoriumproeven (zie hiervoor bijv. Vos, 1969). De resultaten van dergelijk onderzoek zijn in redelijke mate toepasbaar voor het opstellen van aanbevelingen voor kantoorverlichting (redelijk, maar toch niet erg goed, zie bijv. Padmos & Vos, 1979). Het is echter zoals verderop zal blijken, twijfelachtig of metingen waarbij Landolt-ringen als object gebruikt zijn, bruikbaar zijn om de visuele aspecten van de rijtaak te beschrijven (zie De Boer, 1951, 1953; De Boer et al., 1959; Fortuin, 1951; Vos 1976).

Nieuwere onderzoekingen hebben, zoals hierboven reeds is opgemerkt, ertoe geleid dat geleidelijk een ander idee is ontstaan over de zaken die in het verkeer moeten worden waargenomen; meer algemeen, over de rol die de visuele waarneming in het gemotoriseerde verkeer speelt.

Momenteel gaat men er steeds meer vanuit dat het besturen van een motorvoertuig allereerst een proces is dat te maken heeft met het nemen van beslissingen.

Deze beslissingen worden uiteraard genomen op basis (of tenminste mede op basis) van de momentaan uit de omgeving ontleende visuele informatie; dit betekent echter niet dat daardoor vanzelf de visuele waarneming als het meest kritische aspect van deze rijtaak beschouwd moet worden.

Maar er is meer. Het is ook niet zonder meer aan te nemen - zeker niet voor het drukke verkeer zoals we dat in Nederland kennen - dat het bij het besturen van een voertuig allereerst gaat om het

vermijden van kleine objecten. Onderzoek dat momenteel in uitvoering is geeft veel eerder de suggestie dat de visueel kritische aspecten van de rijtaak vooral liggen op het waarnemen van de eigen positie op de weg (de koers en de afstanden tot andere voorwerpen), het juist beoordelen van bochten, en het schatten van posities en snelheden van andere verkeersdeelnemers (zie bijv. Godthelp, 1978, 1979, 1980; Padmos, 1981a; Riemersma, 1979, 1979a). Hier bevindt zich, zoals gezegd, nog een lacune in de kennis waaraan momenteel veel aandacht wordt besteed (zie ook par. 8.2.2.). We zullen hier niet verder ingaan op dit lopende onderzoek (dat meestal met "analyse van de rijtaak" wordt aangeduid) maar verwijzen naar de overzichten van Griep (1970, 1971), Schreuder (1980b, 1980d) en Van der Colk & Schreuder (1981).

Een andere zaak is het de resultaten van dergelijke overwegingen, die immers in eerste instantie voor het normale verkeer op de open weg zijn opgesteld, toe te passen op de meer speciale situatie die zich voordoet bij het binnenrijden van een tunnel. Wanneer de tunnelingang zich als een "zwart gat" voordoet, wordt vooral van grote afstand, de mogelijkheid om vooruit te zien (de zgn. preview) zeer beperkt, zodat bochten direct in het begin van de tunnel niet gemakkelijk te zien zijn (Narisada et al., 1977). Dit punt is momenteel in studie (Blaauw & Van der Horst, 1981).

Ook het waarnemen van de gereden snelheid lijkt een belangrijk gegeven te zijn; mede hierom (en niet alleen omdat het gemakkelijk is te meten) zijn de eventuele veranderingen in de snelheid als maat genomen voor de moeilijkheidsgraad van tunnelingangen in het nog niet afgesloten onderzoek van Gallagher et al. (1979); zie ook Gallagher & Freedman (1979); Janoff (1975, 1977); Anon (1980h). Meer algemeen opgemerkt: gedragsstudies zullen nuttige informatie kunnen opleveren.

Concluderend kan men dus stellen dat het momenteel allerminst een uitgemaakte zaak is dat een "kritisch object" op de beste manier de zichtbaarheid kan beschrijven, en dat, zo men bij gebrek aan betere objecten, toch zo'n "kritisch object" uitkiest, dit een

zekere willekeur met zich zal brengen. Dit geldt dan in het bijzonder voor het contrast dat men kiest als zijnde het meest relevant; ook geldt dit voor de te kiezen afmetingen.

Dit alles wordt nog meer gecompliceerd gemaakt omdat men niet zelden wanneer zo'n "kritisch object" of "standaardobject" wordt gekozen twee dingen tegelijk probeert te doen: ten eerste poogt men met één enkel voorwerp alle visueel kritische aspecten van de rijtaak samen te vatten en te beschrijven, en ten tweede probeert men met één object (en dan nog hetzelfde object!) alle voor het wegverkeer gevaarlijke obstakels te beschrijven. Men moet dan ook niet verbaasd zijn wanneer van zo'n keuze van dit kritisch object of standaardobject niet veel zinvols terecht komt.

Dit geldt uiteraard ook voor de andere aspecten van het standaardobject. Immers, het al dan niet kunnen waarnemen hangt ook nog af van de waarnemingstijd, van de samenstelling van de populatie van waarnemers en van het percentage gevallen waarin het object ook feitelijk is waargenomen, wanneer het object een groot aantal keren wordt gepresenteerd. Schreuder (1964) heeft van de meeste van de hier genoemde variabelen apart de invloed bepaald, zodat de resultaten behorende bij de verschillende aannamen in elkaar kunnen worden omgerekend (zie voor details par. 5.3.3.).

Het is niettemin gebruikelijk - maar daarom niet minder arbitrair - om het door Schreuder (1964) ingevoerde object als standaardobject te gebruiken: afmetingen $20 \times 20 \text{ cm}^2$, contrast 20%, presentatietijd 0,1 s, gewaarschuwde proefpersonen, 75% waarnemingskans (zie ook CIE, 1981).

Verderop zal worden toegelicht op welke wijze een dergelijk kritisch object gehanteerd kan worden in laboratoriumproeven en in praktische situaties. Maar een slotopmerking moet nog worden toegevoegd: door de rijtaak te beschrijven in termen van de waarneembaarheid van objecten wordt de nadruk gelegd op de discontinue aspecten van het besturen. Bij een meer volledige behandeling van de rijtaak dient vooral ook aandacht te worden besteed aan de continue aspecten ervan (snelheid en koers).

5.1.3. De remweg

Er is gesteld (in par. 5.1.1.) dat relevante objecten tijdig waargenomen moeten worden. Tijdig betekent dat er voldoende tijd beschikbaar moet zijn om het betreffende voorwerp te ontwaren (te detecteren), om het te herkennen en te kunnen classificeren als te behoren bij de objecten waarvoor gestopt dient te worden, en vervolgens om de manoeuvre "stoppen" ook te kunnen uitvoeren. De totale afstand wordt wel remweg (of meer volledig bestuurdersremweg) genoemd (zie NNI, 1970 en Flury, 1969; zie ook Figuur 8 en 9). Uiteraard is dit een variant op de bekende trits: waarnemen - verwerken - handelen.

Bij het bepalen van voor de praktijk redelijk toepasbare waarden van de remweg moet rekening worden gehouden met twee onzekere factoren.

Ten eerste hangt de tijd die nodig is voor het waarnemen en herkennen van het betreffende object in hoge mate af van de mate waarin het voorkomen van een dergelijk object verwacht kan worden, en ook van het algemene niveau van de waakzaamheid (de zgn. arousal). Er zij hierop gewezen dat deze waakzaamheid niet verward moet worden met de - op bepaalde doelen gerichte - aandacht (zie bijv. Brunia, 1979). Aan het begrip waakzaamheid zoals hier bedoeld, zijn twee aspecten te onderscheiden: ten eerste de bereidheid tot waarnemen - tot herkennen, en ten tweede de bereidheid tot reageren (zie ook de in par. 1.2. gegeven discussie over het begrip "comfort").

Men kan aannemen dat, wanneer een automobilist een tunnelingang nadert, zowel het verwachtingspatroon als het vigilantieniveau anders is dan bij het gewoon voortrijden op de open weg. Het lijkt daarbij aannemelijk dat dit resulteert in een kortere benodigde tijd voor het waarnemen en reageren. Zo nemen Godthelp & Riemersma (1981) geen tijd aan van 3 seconden, maar na een voorwaarschuwing 1,5 seconden.

Om dezelfde reden mag men aannemen dat de snelheid van reageren van de bestuurder korter is dan bij gewoon rijden, zodat dan de totale "reactie-tijd" korter is. Maar welke waarden nu precies

moeten worden gekozen, kan niet in zijn algemeenheid worden gezegd. Dit kan des te moeilijker, wanneer men waarden wil invoeren bij het ontwerp van een tunnelverlichtingsinstallatie; immers dergelijke waarden moeten, afgezien van het bovenstaande, ook nog geldig geacht kunnen worden voor de gehele populatie van automobilisten. Om deze redenen zijn in de voorbeelden gegeven in Tabel 1, verschillende getalwaarden opgenomen.

De tweede onzekere factor heeft te maken met de bij de bepaling van de remweg te gebruiken waarde van de remvertraging. Wanneer het gaat om beschouwingen die te maken hebben met vragen die de verkeersveiligheid betreffen, is het niet ongebruikelijk voor de remvertraging de wettelijk voorgeschreven minimaal haalbare waarde te nemen. Dit is voor personenauto's in Nederland $5,2 \text{ m/s}^2$ (zie Anon, 1975d; Schlösser, 1976). Dit is echter meestal niet erg realistisch omdat, bijvoorbeeld op een natte weg, deze remvertraging in de praktijk vaak niet haalbaar is. Ook neemt men vaak de hoogste waarde die met goed geprofileerde banden op een nat wegdek met grove textuur nog net haalbaar is. Dit is meer realistisch, ofschoon deze mate van remmen op een weg met druk verkeer niet meer veilig kan worden genoemd. In de meeste gevallen in de praktijk correspondeert dit met ongeveer 4 m/s^2 . In Annex A zijn een aantal meetresultaten bijeengebracht (Agent, 1980; Aleswerth, 1978; Bloembergen, 1972; Engels, 1980; Neilson et al., 1979; SWOV, 1978). Zie ook Anon (1979e).

Bij tunnelingangen moet men vaak rekening houden met het feit dat de weg afhelt. Wanneer men ook nog rekening wenst te houden met vrachtauto's, dan blijkt dat een waarde van 3 m/s^2 voor de remvertraging het hoogste is dat men in de praktijk als mogelijk mag verwachten (zie bijv. Hulscher, 1974, 1975).

Wanneer men echter eisen stelt aan de verlichting die op het comfort (zowel rijcomfort als waarnemingscomfort) zijn gebaseerd, dan moet men rekenen met lagere waarden van de toelaatbare remvertragingen (zie Bloembergen, 1972). Op basis van een aantal metingen blijkt dat een waarde van $2 \text{ à } 2,5 \text{ m/s}^2$ wel het hoogste

is dat met comfortabel rijden te verenigen is (zie Figuur 10 en 11 afkomstig resp. van Baerwald (ed), 1965; en Mortimer, 1971a). In Tabel 1 zijn een aantal combinaties als voorbeeld uitgewerkt. Opvallend is dat voor de meeste toch wel realistisch gekozen combinaties de resulterende stopafstanden groter zijn dan die welke meestal worden gehanteerd; dit niet alleen wanneer men probeert aan eisen van rijcomfort te voldoen, maar ook wanneer het om eisen van de verkeersveiligheid gaat (zie ook Tabel 2).

Bij al deze overwegingen is uitgegaan van de gedachte dat er gestopt moet worden voor een object dat zich ergens (bijv. in de tunnelingang) op de weg bevindt. Het blijkt echter dat dergelijke objecten, vooral in landen waar het wegonderhoud op een redelijk niveau staat (zoals bijv. in Nederland) slechts sporadisch voorkomen (Graf & Ghielmetti, 1978 vinden 1 à 2%; Tan 1974, 1978a, 1978b). Aan de andere kant komen juist in deze landen veel situaties voor waar, bij druk verkeer, geremd wordt. Men mag dus verwachten dat ook - en misschien juist - bij tunnelingangen het nog veilig remmen in files van belang is. Het is opvallend dat er weinig praktisch bruikbare gegevens bestaan omtrent de vertragingen die nog acceptabel zijn bij verschillende situaties bij files. Wel is er veel onderzoek gedaan naar de eisen te stellen aan achterlichten van auto's, maar dat onderzoek is vrijwel steeds toegespitst op de zichtbaarheid ervan. Een recent voorbeeld is Reilly et al. (1980). Ook zijn er enige onderzoekingen bekend waarbij is nagegaan hoe het van achter naderen van een voorligger kan worden waargenomen. Dit zijn meestal drempelwaarde-metingen (zie bijv. Fisher & Hall, 1976, 1978; Janssen, 1972, 1974a; Janssen et al., 1976). De verkeerstheoretische studies hebben echter niet veel opgeleverd (zie bijv. Botma, 1977/78). Ook hier is dus kennelijk sprake van een lacune in de kennis (zie ook par. 8.4.1.b).

Meer in het algemeen kan men stellen dat gezien de grote invloed van de keuze van de remvertraging, en de daarmee samenhangende keuze van de (realistische) maximale remweg op de uiteindelijk aan te bevelen verlichtingskarakteristieken, een nadere studie noodzakelijk is, met name betreffende de remvertragingen zoals ze in normaal verkeer voorkomen (zie ook par. 8.4.1.b.).

5.2. De buitenluminantie

5.2.1. De bouw van het oog

De luminantie die in het eerste stuk van de tunnel aanwezig moet zijn, hangt af van de buitenluminantie. Op de afhankelijkheid komen we nog terug; eerst zal worden besproken wat deze buitenluminantie eigenlijk is. Daartoe is het nodig om, zeer in het kort, iets te zeggen over het menselijk gezichtsorgaan.

De oog lens vormt, samen met het buitenste oppervlak van het oog (het hoornvlies of de cornea) een optische afbeelding van de buitenwereld op het achtervlak van het oog. In dit achtervlak (het netvlies of de retina) bevinden zich de lichtgevoelige elementen; deze zijn via zenuwbanen verbonden met de hersenen. In het netvlies bevinden zich twee soorten lichtgevoelige elementen, de staafjes en de kegeltjes. De staafjes bevinden zich vooral in de buitenste gedeelten van het netvlies (de periferie). Zij zijn vooral gevoelig bij zeer lage lichtniveaus. Van meer belang voor de waarneming overdag zijn de kegeltjes. Deze zijn vooral geconcentreerd in het midden van het netvlies, de zogenaamde fovea. Wanneer de bewuste aandacht op een bepaald gedeelte van de buitenwereld (bijvoorbeeld op een of ander voorwerp) wordt gericht, dan worden door min of meer onbewuste spierbewegingen de ogen zo gedraaid dat dit voorwerp precies op de fovea wordt afgebeeld. Globaal gesproken kan men dus zeggen dat het voorwerp waar men naar "kijkt" op de fovea wordt afgebeeld. Bij deze foveale waarneming is de waarneming optimaal (maximale gezichtsscherpte, kleuronderscheidingsvermogen, enz.).

5.2.2. Verblindings als contrastverminderende factor

De lichtgevoeligheid van de kegeltjes is niet constant. Valt er meer licht op de kegeltjes, dan worden ze minder gevoelig. De lichtwaarneming hangt dus af van het lichtniveau; maar ook blijkt de lichtwaarneming af te hangen van de lichthistorie. We komen in par. 5.2.2. nog in detail terug op deze zaak (de zgn. adaptatie);

zeer globaal betekent dit dat de wijze waarop het visuele systeem op het licht reageert niet alleen afhangt van de hoeveelheid licht die op dat ogenblik het oog treft, maar dat ook de verlichtingsomstandigheden die in het "verleden" hebben geheerst, van belang kunnen zijn. (Bij de term "verleden" moet men dan denken aan een tijdverloop van seconden e.d.).

Onder adaptatie verstaan we dus het proces van aanpassing van het visuele systeem van wisselingen in de verlichtingsomstandigheden; de mate van deze aanpassing op ieder moment wordt dan aangeduid met de adaptatietoestand. Zo'n adaptatietoestand kan voor ieder netvlieselement worden aangegeven; aangezien het hier meestal gaat om foveale waarneming, zullen we ook vooral spreken over de adaptatietoestand van de fovea. Een bepaalde adaptatietoestand kan het resultaat zijn van zeer uiteenlopende toestanden in het gezichtsveld. Ook de verderop te bespreken oogpupil heeft enige invloed - zij het minder dan vaak wordt gedacht.

Een bepaalde foveale adaptietoestand wordt in evenwichtstoestand in eerste instantie bepaald door de luminantie van dat gedeelte van het gezichtsveld buiten het oog dat op de fovea wordt afgebeeld. Verder wordt het - in mindere mate - mede bepaald door de luminanties van gezichtsvelddelen die op nabijgelegen netvlieselementen worden afgebeeld (de zgn. laterale interactie). Uiteraard blijven oogbewegingen hier buiten beschouwing. Voorts wordt de adaptatietoestand mede bepaald door licht dat in het oog wordt verstrooid. Dit proces kan men zich als volgt voorstellen: wanneer zich, buiten de kijkrichting, in het gezichtsveld een voorwerp bevindt met een luminantie die veel hoger is dan de rest van het gezichtsveld (zulk een voorwerp wordt dan vaak "verblindingslichtbron" genoemd) dan wordt licht, afkomstig van deze lichtbron, in de oogmedia (cornea, lens, oogvocht, enz.) verstrooid, en een gedeelte van dit verstrooide licht kan de fovea treffen. Het draagt op die manier bij tot de adaptatietoestand; maar niet tot de beeldvorming. Het verschijnsel wordt verblindingsverschijnsel genoemd, omdat in extreme gevallen de visuele waarneming geheel onmogelijk wordt - men is feitelijk blind. Deze verblindingsverschijnselen spelen

in de visuele aspecten van tunnelverlichting een belangrijke rol; daarom zijn we er zo diep op ingegaan. In de praktijk wordt de hierboven genoemde laterale interactie niet apart in rekening gebracht, maar tot de verblinding gerekend.

De numerieke bepaling van de verblinding is gebaseerd op het feit dat ze zich voordoet als een sluier die zich over het gezichtsveld, ook over de waar te nemen voorwerpen dus, uitstrekt. Men kan dit met een zich buiten het oog bevindende sluier vergelijken, waarvan de invloed op de waarneming equivalent is aan de verblindingseffecten. Er zijn formules opgesteld waarmee de luminantie voor deze equivalente sluier kan worden berekend. Voor een puntvormige lichtbron die een verlichtingssterkte E (lux) teweeg brengt op het vlak van het oog en die gezien wordt onder een hoek θ (graden) ten opzichte van de kijkrichting, bedraagt de equivalente sluiertiluminantie L_{seq} (in cd/m^2) volgens de bekende zgn. Stiles-Holladay formule:

$$L_{seq} = k \frac{E}{\theta^2}$$

Hierbij is k een factor die ondermeer afhangt van de leeftijd van de waarnemer. Zo hebben Fisher & Christie (1965) gevonden dat k sterk van persoon tot persoon kan variëren, maar dat een redelijke benadering gevonden wordt met $k = d + 0,2A$ (met A de leeftijd in jaren, en d een constante die van de configuratie afhangt). De oorzaak van de toename van de verblinding bij toenemende leeftijd wordt in eerste instantie toegeschreven aan een toename van de genoemde lichtverstrooiing in de ooglens (Boettner & Reimer, 1962; Rushton & Gubish, 1966; Said & Weale, 1959; Wolf & Gardiner, 1965). Meestal wordt voor k de waarde van 10 aangehouden (CIE, 1976a). Dit geldt voor jonge volwassenen. Het lijkt wat overdreven nauwkeurig om, zoals Adrian doet, de waarde van 9,2 te gebruiken (Adrian, 1961).

Ook de waarde van de exponent van θ in bovengenoemde formule is onderzocht. Fisher & Christie (1964), Vos (1963) en Vos & Bouman (1959) hebben overzichten gegeven van de waarden van de exponent, zoals die uit metingen volgen. Meer recent is een overzicht gegeven

door Vos et al. (1976). Hieruit kan de volgende conclusie worden getrokken: voor een hoekbereik $4^{\circ} < \theta < 100^{\circ}$ geldt de Stiles-Holladay formule

$$L_{\text{seq}} = 10 \frac{E}{\theta^2}$$

(zie ook Stiles & Crawford, 1937; Adrian, 1961).

Voor kleinere θ (tussen 1° en 8°) is een beter verband te beschrijven met:

$$L_{\text{seq}} = 29 \frac{E}{\theta^{2,8}}$$

Zie hiervoor Fry & Alpern (1953); Vos (1963) en Vos & Bouman (1959); zie ook Hartman (1963), Hartmann & Moser (1963) en Hartmann & Ucke (1974). Op grond van onderzoek van Walraven (1973) kan het geldigheidsgebied van de formule nog verder worden uitgebreid

$$L_{\text{seq}} = \frac{29E}{(\theta+0,13)^{2,8}} \quad \text{voor } 0,15^{\circ} < \theta < 8^{\circ}$$

Voor nog kleinere waarden van θ gaan de afbeeldingsfouten van de ooglenzen overheersen. Vos et al. (1976) geven hierover nadere informatie (zie ook Fry, 1955). Voor de praktijk van tunnelverlichting lijkt dit echter van ondergeschikt belang. Wel is het interessant om het uit die overwegingen resulterende "lichtprofiel" te vermelden: zie Figuur 12. Hieruit blijkt dat de lichtverstrooiing voor grotere waarden van θ (de horizontale assen in de figuur) niet groot is: afhankelijk van de pupildiameter komt de helft van het licht, afkomstig van een witte puntbron, dat het netvlies treft, verder dan 1'- 3' terecht van het centrum van de (optische) afbeelding. Voor kleine waarden van θ is de lichtverstrooiing echter aanzienlijk (Vos et al., 1976, blz. 218).

Opgemerkt dient te worden dat de formules zoals hier gegeven niet precies op elkaar aansluiten. Er is dus enige interpolatie nodig om tot Figuur 12 te komen (Schröter, 1981).

Het is gebruikelijk om bij bepalingen van de equivalente sluiertluminantie in de praktijk uit te gaan van de Stiles-Holladay formule (CIE, 1976a; Bindels, 1970). Maar in de specifieke situatie zoals die zich bij tunnelingen voordoet, moet men zich afvragen of dit toelaatbaar is. Immers, het geldigheidsbereik van de formule is nogal beperkt. Met name de ondergrens: $\theta = 2$ graden betekent ten eerste dat bij foveale waarneming de fovea en het gebied daar direct omheen buiten het geldigheidsgebied valt. En ten tweede gaat het daarbij over een aanzienlijk - en vaak belangrijk - gedeelte van het gezichtsveld. Een gebied van bijna 7 meter diameter op 100 m afstand - dat is de hele ingang van een niet te grote tunnel!

Nog een opmerking over de foveale waarneming. De meeste verblindingsformules zijn geldig voor iedere kijkrichting; de resultaten hangen niet af van de plaats op het netvlies waarop het waar te nemen object wordt afgebeeld. Aangezien in de gevallen die hier van belang zijn het steeds gaat over het kritisch waarnemen, mag men verwachten dat dat in verreweg de meeste gevallen zal betekenen: foveale waarneming. Daarvan zal in hetgeen hierna volgt gemakshalve steeds worden uitgegaan.

Wanneer het bij de verblinding uitsluitend gaat om lichtverstrooiing in het oog, dan is te verwachten dat er een simpele additiviteit bestaat, d.w.z. de invloeden van afzonderlijke, kleine verblindingslichtbronnen kunnen worden gesommeerd; dus

$$L_{\text{seq}} = \sum_i L_{\text{seq}_i}$$

Van de relatie van Stiles-Holladay wordt algemeen aangenomen dat deze additiviteit ook inderdaad geldt (zie bijv. Adrian & Eberbach, 1969; Bindels, 1970; Crawford, 1936; Moon & Spencer, 1943; Spencer, 1943). Een vraag die niet in alle bevrediging is beantwoord is echter of deze additiviteit ook inderdaad zover gaat dat de bedoelde betrekking geïntegreerd mag worden over grote velden zoals gedaan is door Moon & Spencer (1943) en Narisada & Yoshimura (1977).

Afwijkingen zouden optreden indien oogbewegingen of laterale interacties een belangrijke rol zouden kunnen spelen. Een nadere experimentele toetsing van de geldigheid van de integratie lijkt wel gewenst, dit is dus meer dan alleen het toetsen van de strooilicht-hypothese. Maar van meer direct belang lijkt een nadere studie van de varianten van de Stiles-Holladay formules zoals die eerder zijn gegeven. Hierover zijn momenteel uit de literatuur geen gegevens bekend; het lijkt daarom verstandig, voordat wordt overgegaan tot experimenteel onderzoek, alsnog een gedetailleerde literatuurstudie op dit deelgebied uit te voeren.

Hier is dus duidelijk een lacune in de kennis aanwezig; nadere studie is noodzakelijk betreffende twee aspecten:

1. Is de formule van Stiles-Holladay zoals gewijzigd door Vos et al. (1976), inderdaad van toepassing voor de situaties zoals die zich bij tunnelverlichting voordoen?
2. Kan de formule van Stiles-Holladay, en nog meer speciaal de door Vos et al. (1976) gegeven varianten, worden geïntegreerd voor grote "verblindingslichtbronnen?" (zie voorts par. 8.3.2.a.).

Zoals hierboven reeds is uiteengezet, heeft het onderzoek uitgewezen dat de op bovenstaande manier gedefinieerde zogenaamde equivalente sluiertluminantie voor vrijwel alle praktische gevallen als een "echte" luminantie kan worden beschouwd. Meer specifiek, de sluiertluminantie kan worden opgeteld bij licht dat van buiten het oog komt (Barlow, 1972; zie ook Alpern & Campbell, 1962; Barlow & Sparrock, 1964; Blakemore & Rushton, 1965, 1965a; Crawford, 1937, 1947; Rushton, 1965; Rushton & Westheimer, 1962; Westheimer, 1962).

Deze constatering is vooral van belang voor de praktijk van het rijden met een auto op de weg. Er zijn twee belangrijke bronnen van strooilicht buiten het oog, namelijk de lichtverstrooiing aan de autoruit (voorrui), en de lichtverstrooiing in de atmosfeer. In beide gevallen ontstaat een lichtsluier die, net als de hierboven genoemde sluiertluminantie die afkomstig is van het in het oog verstrooide licht, resulteert in een vermindering van de waar te nemen contrasten. Op deze contrastvermindering komen we aan het

eind van deze paragraaf nog terug. Over de lichtverstrooiing aan voorruit en in de atmosfeer zullen we eerst nog enige opmerkingen maken.

De lichtverstrooiing aan autovoorruiten kan zeer aanzienlijk zijn. Allen (1974) heeft gevonden dat bij een vrij willekeurige groep van 40 auto's de lichtverstrooiing aan de voorruit gemiddeld tweemaal zo groot is als die van het "middelbare oog". Een schone, nieuwe voorruit echter geeft een bijdrage van minder dan 5%. Deze waarden gelden voor de bij de proefneming gekozen richting: de lichtverstrooiing is bepaald onder een hoek van $5,3^{\circ}$ met de rijrichting. Deze waarde is gekozen in verband met de toename van de verblinding door koplampen van tegenliggers 's nachts ten gevolge van deze lichtverstrooiing. Het is niet bekend hoe het met de verstrooiing staat bij andere hoeken. Daarbij moet bovendien rekening worden gehouden dat, vooral bij moderne auto's met hun vaak zeer vlak geplaatste voorruit, deze voorruit sterk bestraald wordt door het directe zonlicht - dit in tegenstelling tot het oog.

In verschillende gevallen is dit effect ook als zeer belangrijk beschouwd bij waarnemingen die betrekking hadden op de beoordeling van de ingangsverlichting van bestaande tunnels. Een nader onderzoek dienaangaande lijkt dus zeer gewenst (zie par. 8.4.3.a; zie verder Allen, 1969, 1970; Rumar, 1973a, 1974 en Pfeiffer, 1970).

Over de lichtverstrooiing in de atmosfeer is meer bekend. Het meeste onderzoek betreft mist en nevel (zie bijv. Byers, 1965; Fry et al., 1974; Kocmond & Perchonok, 1970; Magill et al. (eds), 1956; Middleton, 1952; OECD, 1976a, 1980; Schreuder, 1964a, 1976a; Spencer, 1960; Van de Hulst, 1957). Bij tunnelingangen heeft men echter vooral te maken met de stof- en dampwolken die, wanneer ze tot vlak voor de tunnelingang reiken en direct door de zon worden beschenen, een zeer heldere, extra sluier kunnen vormen. Schreuder (1964, blz. 25) heeft waarden tot 2000 cd/m^2 in de praktijk gemeten. Dit behoort echter tot de uitzonderingen. Maar uit de metingen uitgevoerd door Bonomo (1980) blijkt toch dat dergelijke

dampwolken een aanzienlijke luminantie kunnen krijgen, ook bij een overigens schijnbaar heldere atmosfeer (zie par. 8.4.3.b.).

De hierboven beschreven verblindingsverschijnselen worden vaak omschreven met fysiologische verblinding of disability glare. Men mag aan de daarbij behorende sluierluminantie toevoegen (in vele gevallen numeriek erbij tellen!) de lichtverstrooiing aan auto-voorruit en in de atmosfeer.

Voor de praktijk van de tunnelverlichting is het belangrijkste gevolg van deze (fysiologische) verblinding het feit dat de contrasten verminderen. Dit is het gevolg van de sluier die zich over het gezichtsveld lijkt uit te strekken.

Het (luminantie-)contrast C tussen een voorwerp met luminantie L_o (o van object) en zijn achtergrond met luminantie L_b (b van background) wordt gewoonlijk als volgt gedefinieerd:

$$C = \frac{L_o - L_b}{L_b}$$

Wanneer er een sluier aanwezig is met een equivalente luminantie van L_{seq} dan nemen zowel L_o als L_b met dit bedrag toe. Het contrast wordt dan C^1 .

$$C^1 = \frac{(L_o + L_{seq}) - (L_b + L_{seq})}{L_b + L_{seq}} = \frac{L_o - L_b}{L_b + L_{seq}}$$

Dus C^1 is kleiner dan C .

Wanneer in het vervolg van deze studie gesproken wordt over contrast wordt gewoonlijk het "eigenlijke" contrast C bedoeld. Wanneer verwarring kan ontstaan wordt C met intrinsiek contrast en C^1 met waargenomen contrast aangeduid.

Volledigheidshalve: C ligt tussen -1 en $+\infty$ en is positief bij een licht object tegen een duistere achtergrond (-1 hoort bij $L_o=0$; ∞ hoort bij $L_b=0$). Deze asymmetrie heeft ertoe geleid dat men soms wel andere definities van het contrast heeft ingevoerd, maar in de meeste gevallen doet het er niet zoveel toe welke definitie men gebruikt.

Naast de bovengenoemde fysiologische verblinding bestaat er ook nog een bepaald gevoel van hinder dat door "verblindingslichtbronnen" kan worden opgewekt, hoewel er van een merkbare teruggang in de visuele waarneming nog geen sprake is. Al is er dus kennelijk geen verblinding, men duidt het verschijnsel aan met psychologische verblinding of discomfort glare. De beschikbare onderzoeken betreffen vooral openbare verlichting en kantoorverlichting, en, in mindere mate, verlichting door middel van autokoplantaarns. Het is te verwachten dat uit dit beschikbare materiaal gegevens kunnen worden afgeleid die voor tunnelverlichting van belang zijn. Dit vereist echter nog wel enige daarop speciaal gerichte studies (zie ook par. 8.2.1.c).

De meest belangrijke publikaties over psychologische verblinding bij buitenverlichting zijn: Adrian & Schreuder (1968, 1970, 1971); Anon (1955, 1976); Balder (1956); Benz (1966); Bindels (1973); CIE (1976a); De Boer (1960); De Boer (ed), (1967); De Boer et al. (1959); De Boer & Morass (1956); De Boer & Schreuder (1967); De Grijs (1972); Devaux (1970); Enzmann & Adrian (1977); Fisher & Hall (1970); Folles (1975); Hargroves (1971); Haubner (1969); Hopkinson (1940); Monnier & Mouton (1939); OECD (1971, 1976b); Sabey (1971); Schreuder (1966, 1967, 1967a, 1971b, 1972, 1972a, 1974, 1975b, 1978b); SWOV (1969); Thiry (1971); Van den Bijllaardt & Tan (1975); Vos (1978); Wichert (1971); Yerrell (1971).

5.2.3. De adaptatietoestand

Uit het bovenstaande volgt dat in een evenwichtstoestand de adaptatietoestand van ieder deel (dus ook van het foveale deel) van het netvlies kan worden beschreven als de som van de luminantie van dat gezichtsveldgedeelte dat "rechtstreeks", dus volgens de afbeeldingswetten van de geometrische optica, op de fovea wordt afgebeeld (aangeduid met L_f) en de (equivalente) sluierluminantie dus $L_a = L_f + L_{seq}$. Wanneer er behalve deze twee ook nog sprake is van een fysieke sluier (bijvoorbeeld mist, stof of rook in de atmosfeer, of een vuile of gekraste autovoorraut) buiten het oog, wordt deze erbij geteld (de luminantie van een dergelijke sluier wordt aangeduid met L_v ; v van veil).

In het vervolg zullen we deze L_v meestal weglaten. Zoals in par. 5.2.2. is aangegeven kan deze L_v in bepaalde gevallen zeer belangrijk zijn. Om te voorkomen dat deze belangrijke factor wordt vergeten, zullen we hem zo nu en dan nog eens vermelden. Wanneer gesproken wordt over de adaptatietoestand dan wordt in het vervolg steeds bedoeld de adaptatietoestand van het foveale netvliesgedeelte. Zoals gezegd kan de adaptatietoestand worden uitgedrukt in een luminantiemaat, de adaptatieluminantie L_a . Deze luminantie is de luminantie van een zogenaamd standaardveld dat het gehele gezichtsveld omvat en overal dezelfde luminantie heeft, en de eigenschap heeft dezelfde adaptatietoestand (in de fovea dus) te weeg te brengen.

Algemeen geldt dus (in evenwichtstoestand en bij fixatie van de tunnelingang):

$$L_a = L_f + L_{seq} + L_v.$$

Hier dient te worden opgemerkt dat de adaptatietoestand bij het bekijken van een gezichtsveld met constante luminantie dus hoger is dan de gezichtsveldluminantie. Immers, de equivalente sluier ten gevolge van de periferie komt er nog bij.

5.2.4. De bepaling van de buitenluminantie

De in par. 5.2.3. gegeven formule geldt alleen in de evenwichtstoestand, dus in die gevallen waarin de luminanties buiten het oog in de tijd constant zijn. Het blijkt dat veelal in eerste benadering bij het rijden op de openbare weg aan deze voorwaarde is voldaan. Wanneer een automobilist over de open weg rijdt, kan dus op ieder moment de adaptatietoestand L_a worden gedefinieerd. Wanneer er zich in de omgeving van de open weg niet te grote verschillen voordoen, kan men van een gemiddelde adaptatietoestand L_1 op de open weg spreken. L_1 is dus een tijdsgemiddelde van L_a . Aan deze L_1 werd in het verleden een grote rol toebedeeld. Dit was het gevolg van het feit dat door de toenmalige gebruikelijke bouw van tunnels de omgeving tot vlak bij de tunnelingang zeer

helder bleef, zodat de adaptatietoestand dicht voor de tunnel nog steeds de waarde L_1 had.

Een belangrijke factor daarbij wordt gespeeld door de oogbewegingen.

Bij het besturen van een auto wordt door de bestuurder gedurig de omgeving afgezocht.

Onder normale omstandigheden geldt dat bij geringe informatie-inhoud per fixatie de oogbewegingen langzamer gaan dan de informatieverwerking (Moffitt, 1980; zie ook Vaughan & Graefe, 1977). Maar wanneer per fixatie veel informatie moet worden verwerkt, dan blijkt dat de fixaties ook langer gaan duren wanneer de informatie per fixatie toeneemt (Moffitt, 1980; Mackworth, 1976; Bouma, 1978; Newman, 1975). Bovendien blijkt dat bij groter wordende informatie-inhoud het gezichtsveld smaller wordt (Ikeda & Takeuchi, 1975). Tenslotte blijkt uit het onderzoek van Moffitt dat zowel met het aantal "items" per fixatie als de hoeveelheid informatie per "item" rekening moet worden gehouden (Spragins et al., 1976; Engel, 1976). Dit alles geldt allereerst het laboratorium, maar op de weg zijn tijdens normale ritten vergelijkbare tendenzen waargenomen (zie bijv. Gordon, 1966; Gould & Carn, 1973; Mourant et al., 1963, 1969; Mourant & Rockwell, 1970; Snyder (ed), 1979; Williams, 1966; Zwahlen, 1980). Overzichten zijn gegeven door Cohen (1978) en Olsen (1980). In Figuur 13 is als voorbeeld een aantal gegevens weergegeven, afkomstig van Mourant & Rockwell (1970a) (zie ook Schreuder, 1971a). Steeds blijkt weer dat bij het rijden over de open weg de fixaties zelden meer dan $3 \text{ à } 4^\circ$ van de richting "recht vooruit" afwijken (zie ook Zwahlen, 1980). Wanneer er speciale voorwerpen, bijvoorbeeld verkeersdrempels (Erikson & Hörberg, 1980a), weggebruikers (Erikson & Hörberg, 1980) of wegsituaties zijn (Blaauw & Riemersma, 1975), dan komen uiteraard systematisch afwijkingen voor (zie ook Murata & Nakamura, 1970).

Bij het naderen van een tunnel wordt de situatie anders. Dan wordt de breedtespreiding van de oogbewegingen geringer; de tunnelingang trekt kennelijk de aandacht. Narisada & Yoshikawa (1974) hebben dit experimenteel bevestigd; bij het naderen van de tunnel blijft

de kijkrichting gemiddeld gelijk, maar de spreiding (de halfwaardebreedte) wordt kleiner (zie Figuur 14). Narisada & Yoshikawa (1974) beschrijven nog een tweede, meer subjectieve onderzoek: ervaren automobilisten dienden aan te geven van welke afstand zij de tunnelingang gingen "fixeren". De resultaten zijn gegeven in Figuur 15. De conclusie is duidelijk: in het algemeen wordt, bij de tunnels en het verkeer zoals dat gewoonlijk voorkomt in Japan, reeds op aanzienlijke afstand de aandacht gericht - en dus waarschijnlijk ook de blikrichting - op de tunnelingang.

Narisada & Yoshikawa (1974, blz. 18) geven daarvoor een afstand op van tenminste 150 m; ze introduceren voor dit punt het begrip "fixatiepunt", naar analogie van, en ter onderscheiding van, het door Schreuder (1964) ingevoerde "adaptatiepunt".

Schreuder (1971a) heeft betoogd dat het invoeren van het fixatiepunt geen oplossing leverde voor de problemen bij het verlichten van tunnelingen. De door de CIE gehanteerde methode, waarbij er van wordt uitgegaan dat de adaptatie pas dicht voor de tunnel begint te veranderen, leek meer algemeen toepasbare resultaten op te leveren. Immers, daarmee zijn veel meer in het algemeen tunnels met zeer verschillend uitgevoerde ingangspartij te beschrijven. Ook leverde de CIE-methode betere resultaten op wanneer door zeer druk verkeer de tunnelingang vanaf enige afstand niet zichtbaar is, bijvoorbeeld doordat deze wordt afgeschermd door vrachtauto's. Voorts was de CIE-methode meer aan de zekere kant; de door Narisada & Yoshikawa (1974) voorgestelde methode levert weliswaar lage luminantiewaarden op voor de tunnelingang, hetgeen financiële besparingen mogelijk maakt, maar er is minder marge. Tenslotte is het fixatiepunt in feite het adaptatiepunt onder aanname dat vroegtijdig de tunnelingang wordt "gefixeerd".

Dit alles gold in het begin van de zeventiger jaren. Intussen is echter ruime ervaring opgedaan met meer "modern" uitgevoerde tunnelingen, waarbij het adaptatiepunt door o.a. het donker uitvoeren van grote delen van de ingangspartij veel verder van de tunnelingang is komen te liggen. Het is daarom te verwachten dat de eventuele invloed van het verkleinen van de spreiding in

de oogbewegingen (de vermindering van de breedte van het oogbewegingspatroon) kleiner zal zijn dan door Narisada & Yoshikawa (1974) geschat. Een nadere studie van oogbewegingspatronen in de buurt van tunnelingangen lijkt dus niet de hoogste prioriteit te krijgen; het kan anderzijds toch een interessant studie-object zijn in verband met de meer gedetailleerde uitvoeringsvormen van de ingangspartij (zie par. 8.3.2.b.). Onderzoek schijnt er niet veel te zijn uitgevoerd; alleen Walthert (1978) noemt, zonder nadere gegevens, een onderzoek van Zwahlen (1976) (zie ook Zwahlen, 1979, 1980, en voorts Blaauw & Leebeek, 1974; Olsen, 1978 en Noton & Stark, 1971). De ervaringen in de praktijk hebben, zoals gezegd, geleerd dat de tunnel veel gemakkelijker op een bevredigende manier verlicht kon worden wanneer men de toeritten zo donker mogelijk uitvoerde. Het resultaat is dan dat de adaptatietoestand dicht voor de tunnel al wat lager is dan die welke hoort bij de open weg; het is dan gemakkelijker de tunnelingang goed te verlichten. Hierop komen we nog terug. Het gevolg is echter wel dat de buitenluminantie niet meer zo eenvoudig is te definiëren en te bepalen. Wel geldt, tenminste in eerste benadering zo lang de veranderingen in de adaptatietoestand maar langzaam gaan, $L_a = L_f + L_{seq}$ (waarbij we van L_v afzien). Over deze relatie is nogal veel studie verricht. Voor zover het betrekking heeft op de verlichting van tunnelingangen, kan hierover het volgende worden gezegd.

Zoals we reeds hebben aangegeven, wijkt de blikrichting van een autobestuurder maar weinig af van de rijrichting: automobilisten kijken vrijwel steeds ongeveer recht vooruit. Het blijkt dat dit bij tunnelingangen nog sterker het geval is dan bij het rijden op de gewone weg. Dit richten van de aandacht - en de blikrichting - is wellicht nog te ondersteunen door een geschikte vormgeving van de ingangspartij. Dit punt komt overigens nog wel voor nadere studie in aanmerking (par. 8.2.1.d.).

Op grond hiervan stelt men vaak voor om voor de foveale luminantie L_f maar de luminantie van het wegdek L_r (r van road surface) te nemen. Deze voorstelling is afkomstig uit de straatverlichting, waar in zeer vele gevallen het wegdek het enige heldere gedeelte in het gezichtsveld is (afgezien dan van de straatverlichtings-

armaturen, die als - min of meer - verblindende lichtbronnen worden beschouwd, zodat hun bijdrage tot de adaptatietoestand apart in rekening kan worden gebracht). In de openbare verlichting is het dus niet alleen gebruikelijk, maar ook in behoorlijke mate gerechtvaardigd om $L_r = L_f$ te stellen (zie bijv. Schreuder, 1967). Maar we moeten wel constateren dat deze uitspraak op "gezond verstand" is gebaseerd, en niet op directe daartoe opgezette metingen.

Bij een open weg overdag is dit echter in mindere mate het geval. Immers het wegdek beslaat maar een vrij klein gedeelte van de fovea - en zeker van het 2×2^0 gebied dat buiten het geldigheidsbereik van de formule van Stiles-Holladay valt. Wanneer de luminantie van de wegbermen en die van het hemelgedeelte direct boven de horizon niet te veel van die van het wegdek afwijken, zoals niet zelden op een open weg, dan lijkt het redelijk goed te verdedigen ook dan te stellen $L_r = L_f$. Deze benadering - want dat is het - mag zeker gebruikt worden wanneer het gaat om een weg in de buurt van hoge bebouwing. Maar in de schemering - wanneer een lichte hemel en een donkere weg samengaan - lijkt de benadering niet steeds toepasbaar (zie bijv. Schober, 1960; OECD, 1971).

Wanneer men echter te maken heeft met de situatie zoals die zich in een open bak in de buurt van de tunnelingang voordoet, is deze benadering niet meer bruikbaar. Het gezichtsveld bestaat dan behalve uit de meestal grijze oppervlakte van het wegdek ook uit de wanden van de open bak (soms zeer licht van kleur, maar soms ook juist zeer donker grijs of zelfs zwart) en uit een gedeelte van de hemel. En ook binnen het gebied van 2×2^0 kunnen deze van belang zijn. Tenslotte is er natuurlijk ook de donkere tunnelingang zelf.

Dit gezichtsveld kan niet zo worden benaderd met de luminantie van het wegdek. Eigenlijk zou men één van de varianten van de Stiles-Holladay vergelijking die voor kleinere hoeken ook nog geldt, moeten gebruiken. Zolang die nog niet in afdoende mate zijn getoetst moet men volstaan met een andere benadering. Tamelijk willekeurig kiest men dan vaak voor een luminantiewaarde die be-

paald wordt als het (rekenkundig) gemiddelde van de gezichtsveld-delen: wegdek, wand en (wanneer deze tenminste een aanzienlijk deel van het binnenste gezichtsveldgedeelte beslaat) de hemel. Deze keuze lijkt gerechtvaardigd te kunnen worden op twee gronden:

1. Verderop zal blijken dat een dergelijke hiermee analoog zijnde methode bruikbaar lijkt te zijn om de totale adaptatietoestand te naderen.
2. Een gemiddelde waarde lijkt behoorlijk te rijmen te zijn met het feit dat er nogal wat oogbewegingen zijn te constateren ook binnen dit centrale gezichtsveldgedeelte - het is dus meer een "rechtvooruitkijken met toleranties".

De luminanties in het gezichtsveld kunnen worden gemeten en berekend. Bij de berekening gaat men er vaak van uit dat de oppervlakken diffuus reflecteren, zodat de simpele betrekking $L = (\beta/\pi) E$ gebruikt kan worden (Keitz, 1967). β is daarin de luminantiefactor. (Vroeger werd deze grootte met ρ , de reflectiefactor aangeduid; zie CIE, 1970). Dit is echter niet verantwoord wanneer er sprake is van natte wegdekken of van laagstaande zon (Schreuder, 1964).

Mäder (1966) heeft een gedetailleerde methode gegeven om de luminantie van een wegooppervlak te bepalen voor verschillende daglicht-situaties. Voor de bijdrage van de zon wordt uitgegaan van de door Siedentopf & Reeger (1964) bepaalde waarde $E_{o,z} = 140.000$ lux, waarmee bedoeld wordt de verlichtingssterkte loodrecht op de zonnestralingsrichting aan de buitenkant van de aardatmosfeer. Daarmee wordt de horizontale verlichtingssterkte $E_{h,z}$ op het aardoppervlak bepaald.

De berekende waarden komen goed overeen met de gemeten waarden: alleen ten gevolge van de zonnestraling zijn verlichtingssterkten van 100.000 lux of zelfs nog meer mogelijk. Nadere details zijn gegeven in par. 6.2.

Om nu tot luminanties te komen, is het nodig om de luminantiefactoren voor de verschillende geometrieën te kennen. Mäder (1966) heeft daartoe een eigen systeem van het aangeven van de luminantiefactoren ingevoerd. Dit is intussen overbodig geworden; het is

aan te bevelen het door de CIE intussen gestandaardiseerde systeem met het daarbij behorende meetpuntenmet te gebruiken (CIE, 1976a). Tenslotte wordt de bijdrage van de blauwe hemel berekend, dus zonder het directe zonlicht. Deze bijdrage hangt af van de troebeling van de atmosfeer, en ligt (voor grote zonshoogten) meestal tussen ca 6.000 en 15.000 lux. Dit wordt bevestigd door metingen - ook het feit dat bij wolkenloze hemel en hoge zonnestand de horizontale verlichtingssterkte voor het grootste deel wordt bepaald door het directe zonlicht (Postma, 1936; Steinhauser et al., 1955; Wörner, 1954). Om nu de luminantie van bijvoorbeeld een wegdek uit te rekenen die ontstaat bij verlichting door de blauwe lucht, moet men ook nog de luminantieverdeling van de lucht zelf hebben. Hiervoor kan een analytische voorstelling dienen, gegeven door Dogniaux (1960) (zie ook Kittler, 1962). De berekeningen zijn tamelijk gecompliceerd. Het is echter niet duidelijk of het voor de praktijk nuttig is om zo ver in details te gaan.

Zoals reeds is aangegeven, kan L_{seq} worden benaderd met de formule van Stiles-Holladay (eventueel in de integraalvorm). Voor een cirkelsymmetrisch gezichtsveld kan een eenvoudige analytische benadering worden gegeven (Schreuder, 1977b, 1977c; 1979a, zie Annex B). Voor een willekeurig veld zijn door verschillende onderzoekers computermodellen opgesteld, die echter niet zijn gepubliceerd (o.a. door Adrian en door Narisada). Bij deze berekeningen moet uiteraard de luminantie van de verschillende delen in het gezichtsveld bekend zijn. Bij een bestaande tunnel kunnen deze luminanties worden gemeten. Een aantal praktijkgevallen zijn beschreven in Annex C. Bij een tunnel in het ontwerpstadium kunnen de betreffende luminanties worden geschat op basis van het ontwerp en van de bekendheid met de materialen in de omgeving van de tunnelingang. Wanneer de tunnel bestaat kan de L_{seq} ook rechtstreeks worden gemeten. De zogenaamde Pritchard-luminantiemeter kan van een speciaal voorzetstuk worden voorzien waardoor wordt bereikt dat rechtstreeks de L_{seq} wordt bepaald. Over de nauwkeurigheid van deze methode bestaat nogal verschil van opvatting; het lijkt verstandig, voordat deze methode met de zogenaamde verblin-

dinglens (glare-lens) als standaard wordt ingevoerd, nog wat nadere calibratiemetingen worden uitgevoerd (zie verder Fry et al., 1963; en par. 8.3.2.c.).

Recentelijk is een nog verdergaande vereenvoudiging voorgesteld. Op basis van een aantal metingen in Japanse tunnels is aangegeven dat de adaptatietoestand L_a op ieder punt van de weg met voldoende nauwkeurigheid kan worden bepaald wanneer men de gemiddelde luminantie meet binnen een kegelmantel waarvan de tophoek $2 \times 10^\circ$ bedraagt, en waarvan de as evenwijdig is aan de rijrichting en wanneer daarna deze luminantie met 1,5 wordt vermenigvuldigd. Dit is gevonden als het resultaat van metingen van Narisada et al. (1980), waarbij bij een aantal tunnels gelijktijdig en continu de volgende luminantiewaarden gemeten zijn:

- a. binnen een cirkelvormig meetveld van $2 \times 1,5^\circ$ (gericht op 100 m voor de auto, op het wegdek);
- b. binnen een cirkelvormig meetveld van $2 \times 10^\circ$;
- c. de sluiertiluminantie met de Pritchard glare lens.

Op de door Narisada & Yoshimura (1977) gegeven manier is de adaptatieluminantie te bepalen uit a. en c. (we komen verderop nog terug op deze methode, zie par. 6.3.4.). Deze adaptatieluminantie is vergeleken met b. Het resultaat is gegeven in Figuur 16 waaruit blijkt dat er een duidelijk éénduidig verband bestaat tussen die twee luminanties. Er is kennelijk enige invloed van de afstand, want voor de hoogste waarden van de $2 \times 10^\circ$ luminantie (die met relatief lage adaptatieluminanties corresponderen) komen voor bij grote afstanden. Met andere woorden: bij grote afstanden levert de $2 \times 10^\circ$ luminantie een te lage adaptatieluminantie op. Narisada heeft voorgesteld ten behoeve van het ontwerp van verlichtingsinstallaties de buitenluminantie gelijk te stellen aan 1,5 maal de $2 \times 10^\circ$ luminantie gemeten vanaf 100 m. Deze afstand ligt midden in het gemeten gebied.

Al met al is dit een zeer interessante mogelijkheid. Nadere toetsing is echter zeer gewenst, want ten eerste is de resterende afstandafhankelijkheid nog te groot om verwaarloosd te kunnen worden, en ten tweede is het nodig na te gaan of dit verband ook voor andere

dan Japanse tunnels geldt. Immers, tunnels in Japanse autosnelwegen zijn alle volgens een standaardplan uitgevoerd.

Dit kan als een variant worden beschouwd van de door de CIE (1973) als vuistregel gesuggereerde methode ter bepaling van L_1 (niet van L_a dus!). Deze vuistregel is

$$L_1 = \frac{L_{250} + 2L_{150} + 3L_{50}}{6}$$

Hierbij zijn L_{250} , L_{150} en L_{50} de luminanties binnen dergelijke cirkelvormige meetvelden van 2×10^0 , gemeten op 250, 150 en 50 meter van de tunnelingang.

Ofschoon deze vuistregel nooit op zijn waarde is getoetst, lijkt de toepassing ervan te overwegen (CIE, 1981). Dit zou bijvoorbeeld een alternatief kunnen zijn (misschien ook met een andere diameter van het meetveld) van de hierboven genoemde methode van Narisada et al. (1980) (zie ook Riemenschneider, 1970 en Riemenschneider & Müller, 1976).

Het feit dat op de ene manier L_1 en op de andere manier L_a wordt bepaald lijkt verwarrend, maar is in feite niets anders dan een zaak van preciese omschrijving.

In het bovenstaande is de adaptatietoestand en de adaptatieluminantie beschreven; daarbij is aangegeven dat de adaptatieluminantie te bepalen is uit de luminantie van dat gezichtsveldgedeelte dat op de fovea wordt afgebeeld, vermeerderd met de sluierluminantie. Men kan zich ook afvragen of de adaptatieluminantie rechtstreeks is te bepalen. Inderdaad behoort dit theoretisch tot de mogelijkheden; immers in vele opzichten hangen de visuele prestaties rechtstreeks af van de adaptatietoestand. Omgekeerd kan men dus, wanneer tenminste deze relatie bekend is, uit die prestaties de adaptatietoestand afleiden.

Zowel principieel als praktisch is er wel iets aan te voeren tegen deze handelwijze. Een principieel bezwaar is dat men in feite de afhankelijke variabele en de onafhankelijke variabele van plaats laat verwisselen. Dit is meestal wel acceptabel wanneer het gaat om relaties die mathematisch als functie worden beschreven ($y = f(x)$ en $x = F(y)$ zijn behoudens sommige speciale gevallen gelijk-

waardig). Het gaat hier echter om een experimentele relatie die door psychofysische meetmethoden (bovendien meestal met een grote spreiding) is bepaald.

We zullen niet verder ingaan op deze principiële bezwaren van methodologische aard, omdat er voor ons geval een nog zwaarder praktisch bezwaar bestaat. Immers, in het gebied van luminanties waar we hier in zijn geïnteresseerd, hangen de meeste aspecten van visuele prestatie slechts in geringe mate af van de adaptatieluminantie. Dit betekent dat het bepalen van die adaptatieluminantie uit metingen van één of ander aspect van visuele prestatie tot zeer grote spreidingen (dus mogelijk ook grote fouten) in de adaptatieluminantie zal leiden. Dit geldt vooral wanneer men voor de visuele prestatie neemt de drempelwaarde van de zgn. contrastgevoeligheid. Als voorbeeld is Figuur 17 opgenomen. Daaruit blijkt dat voor omstandigheden waarop de daar afgebeelde referentiekromme is gebaseerd een "fout" van 10% in het bepalen van het drempelcomfort een afwijking van 1000 naar 4000 cd/m^2 in de geschatte adaptatieluminantie oplevert. Wanneer men een andere standaard voor de zichtbaarheid neemt, bijvoorbeeld een andere kijkrichting, dan ontstaan nog veel grotere afwijkingen. Zo blijkt uit Figuur 18 dat wanneer het object van 4' slechts één graad buiten de as wordt waargenomen, bij hoge luminantie een factor 3 in de adaptatieluminantie kan worden gevonden. En een afwijking van één graad in de kijkrichting is niet veel! Wanneer tenslotte een andere oogtaak wordt genomen, kunnen nog veel grotere afwijkingen optreden (zie Figuur 19).

Deze voorbeelden zijn ontleend aan ANON (1979f) waarin een samenvatting is gegeven van de studies van Blackwell en medewerkers, die zijn neergelegd in o.a. CIE (1979). Hoewel de contrastgevoeligheid (het duitse Unterschiedsempfindlichkeit is eigenlijk beter) een van de belangrijkste visuele kenmerken is, komt deze niet in aanmerking voor het bepalen van de adaptatieluminantie. Zie ook Blackwell & Blackwell (1977b); Buffart (1978); CIE (1972); De Boer (1951, 1967); Kern (1952); Schreuder (1964); Vos & Plomp (1979). Adrian (1969) heeft in dit verband een aantal onderzoeken bijeengebracht, o.a. die van Berek (1943) - die zich op zijn beurt

baseerde op datgene wat op dat moment bekend was -, Blackwell (1946, 1966) en, in een latere, niet gepubliceerde studie (Adrian, 1978) ook het onderzoek van Enzmann (1977). Maar over de aan de op bovengenoemde bepaling van de adaptatieluminantie inherente spreidingen en fouten heeft Adrian zich niet uitgelaten.

Iets dergelijks kan men zeggen voor de toepassing van de gezichtscherpte. Ook hier is nogal wat materiaal aanwezig, en ook hier blijft er een grote restspreiding wanneer men de adaptatieluminantie poot af te leiden uit de gezichtsscherpte (zie bijv. Balder & Fortuin, 1955; Fortuin, 1951; Lythgoe, 1932; Moon, 1961; Riggs, 1965).

Een meer fundamenteel bezwaar is dat het eigenlijk niet zeker is of de gezichtsscherpte wel een eigenlijke grondfunctie is van het oog, of dat het meer gaat om een speciaal geval van de contrastgevoeligheid. Dit zelfde geldt in nog sterkere mate voor andere aspecten van de visuele prestatie, zoals leesbaarheid, dynamische gezichtsscherpte, enz. Er is echter nog één aspect van de visuele prestatie niet genoemd: de drempelwaarde voor de waarneming van (bijvoorbeeld puntvormige) lichtbronnen. Ook hierover is nogal veel bekend, vooral in relatie tot de waarneembaarheid van lichtsignalen (zie bijv. Douglas & Booker, 1977; Hulburt, 1935, 1941, 1946 en Middleton, 1952). Het is echter niet bekend of van de drempelwaardebepaling van puntlichtbronnen ooit gebruik is gemaakt voor het bepalen van de adaptatietoestand toegespitst op praktische problemen - zoals tunnelverlichting. Gezien de nauwkeurigheid waarmee de bedoelde drempelwaarde kan worden bepaald, lijkt het zeer de moeite waard om onderzoek dienaangaande te bevorderen - ook al blijft dan het bezwaar bestaan dat dat kleven kan aan het omwisselen van afhankelijke en onafhankelijke variabelen (zie par. 8.3.1.a).

Zoals reeds is gezegd, hangt de luminantie L_2 die in het eerste stuk van de tunnel aanwezig moet zijn om behoorlijke waarnemingsmogelijkheden te waarborgen, ondermeer af van de buitenluminantie. Hierboven zijn een aantal mogelijkheden aangegeven hoe de adaptatietoestand buiten de tunnel kan worden bepaald; de vraag is nu op welk punt deze adaptatietoestand bepaald moet worden om die

waarde van de buitenluminantie te vinden, welke maatgevend is voor L_2 . In vorige paragrafen is aangegeven dat hierover eigenlijk nog geen definitieve uitspraak is te doen. Niet alleen kan men heel verschillende ideeën tegenkomen over de grootte van de remweg die in de beschouwing moet worden betrokken, in afhankelijkheid van de nodig geoordeelde veiligheidsmarges en van de eventuele wenselijkheid om met comforteisen rekening te houden; van meer fundamenteel belang is het ook dat het eigenlijk helemaal niet vaststaat dat de relevante aspecten van de rijtaak ook werkelijk het beste kunnen worden weergegeven door de manoeuvre "stoppen" als criterium te nemen.

Zoals gebruikelijk onder dit soort omstandigheden kiest men meestal voor een compromis. De kritische afstand waarover de waarneming mogelijk moet zijn wordt meestal wel gerelateerd aan de remweg, maar om zeer hoge eisen aan de verlichting, die soms als buitensporig worden beschouwd, te vermijden, wordt uitgegaan van een lage rijnsnelheid, een grote remvertraging en een snelle reactie. Het eindresultaat is dan dat men meestal stelt dat objecten op een afstand van 100 m zichtbaar moeten zijn.

Men is dus nu in een merkwaardige situatie terecht gekomen. Op basis van bepaalde ideeën omtrent de rijtaak komt men, gebruik makend van bepaalde realistische aannamen omtrent reactietijd, remvertraging, enz. tot een lange remweg. Niet alleen ontmoeten de consequenties (en dan met name de financiële consequenties) daarvan veel weerstand; ook blijkt dat de resultaten eigenlijk niet in overeenstemming zijn met de ervaringen in de praktijk. Het lijkt dus geen verstandige oplossing om dan maar de eisen omtrent reactietijd en remvertraging aan te passen. Van essentieel belang is dus in dit verband het doen van nader onderzoek met het doel om te weten te komen welke aspecten van de rijtaak nu wel relevant zijn voor het rijden door verkeerstunnels.

Het is echter noodzakelijk om een richtwaarde ter beschikking te hebben, ook voor de periode dat het onderzoek nog geen resultaat heeft opgeleverd. Hiervoor neemt men, zoals gezegd, meestal een stopafstand van 100 m. Ofschoon deze afstand veel korter is dan

de stopafstand bij een hoge snelheid en een grote veiligheidsmarge (zie Tabel 1) mag men uit de praktijk toch wel opmaken, zij het op indirecte wijze, dat de waarde gecombineerd met aannamen over het kritisch object en de adaptatietoestand, leidt tot als "redelijk" te bestempelen resultaten.

Het hierboven aangeduide voorstel van Narisada et al. (1980) komt er dus ook op neer de buitenluminantie te benaderen met 1,5 maal de waarde van de gemiddelde luminantie binnen de kegel van 2×10^0 , gemeten op 100 m van de tunnel. Zoals gezegd is het echter gewenst om deze benaderingsmethode nog in detail nader te toetsen.

5.3. Niet-evenwichtstoestanden

5.3.1. Inleiding

De in 5.2.3. gegeven formule geldt voor een evenwichtstoestand. Maar het overgaan van de ene adaptatietoestand naar een andere ten gevolge van veranderingen in het gezichtsveld kost tijd. Het tijdafhankelijke proces wordt adaptatie genoemd (zie par. 5.2.2.).

5.3.2. Adaptatie

Bij de adaptatie spelen een aantal processen een rol. In het verleden werd de meeste aandacht gegeven aan de pupiladaptatie (de verandering van de grootte van de opening van de oogpupil (zie bijv. Gaymard, 1958)).

Meer recente onderzoeken hebben tot het inzicht geleid dat de pupilreactie weinig bijdraagt tot de adaptatie aan verandering in het lichtniveau. Bij niveaus boven 100 cd/m^2 is de bijdrage niet meer dan een factor 2 (zie Bouman, 1965; Wyszecki & Stiles, 1967). De pupilreactie heeft meer te maken met de optimalisering van de scherpte van de optische afbeelding (Barlow, 1972; Campbell & Gregory, 1960; Campbell & Gubish, 1966; Millodot, 1978; Schreuder, 1976a; Westheimer, 1965).

In het algemeen gesproken wordt de belangrijkste bijdrage tot de adaptatie geleverd door de geleidelijke omschakeling van waarne-

ming met de staafjes naar waarneming met de kegeltjes. Bij lichtniveaus in het gezichtsveld onder $0,01 \text{ cd/m}^2$ zijn alleen de staafjes in werking (nachtzien of scotopisch zien). Bij luminanties boven ca 10 cd/m^2 zijn alleen de kegeltjes in werking (dagzien of fotopisch zien). In het tussengebied (schemerzien of mesopisch zien) zijn beide in werking. Een overzicht hiervan is bijvoorbeeld gegeven in Barlow (1972) (zie ook Cakir & Krochmann, 1971; Kokoschka, 1971; Lie, 1980; Walter & Wright, 1943).

Ofschoon dit een simplificatie is (staafjes dragen bij het fotopisch zien bij tot de waarneming, maar niet op een directe wijze; Adrian, 1965) kan dit beeld worden gebruikt; de consequentie is dat we ons in het helderheidsgebied dat voor deze studie van belang is, kunnen beperken tot het fotopisch zien. Bovendien hebben we meestal te maken met foveale waarneming, zodat alleen daarom al de nadruk komt te liggen op de waarneming met kegeltjes - fotopisch waarnemen dus.

Ook binnen het gebied van het fotopisch zien vindt er adaptatie plaats. Deze adaptatie is voor onze studie vooral van belang. Er is sprake van twee onafhankelijke verschijnselen. Ofschoon de eerste studies reeds lang geleden zijn uitgevoerd (zie bijv. Schouten, 1937), is er eerst in de laatste jaren meer duidelijkheid ontstaan in de processen die daarbij een rol spelen.

Globaal gesproken komt het erop neer dat er snelverlopende processen zijn die neuraal van aard zijn (verbonden zijn met de zenuwbanen in het visuele systeem) en langzaam verlopende processen die van fotochemische aard zijn, waarbij de hoeveelheid lichtgevoelige substantie in het oog verandert.

De laatste jaren heeft het onderzoek van de processen die zich in het zenuwstelsel afspelen een grote vooruitgang geboekt. Het is echter niet op eenvoudige wijze mogelijk de resultaten uit dit onderzoek toe te passen op de meer praktisch gerichte vragen zoals deze zich bij de verlichting van tunnelingangen voordoen. Daarom beperkt men zich meestal tot sterk gesimplificeerde beelden die met eenvoudig uit te voeren psychologische proefnemingen kunnen

worden opgesteld. Het lijkt derhalve wenselijk het theoretische onderzoek toe te passen in praktische situaties. Nadere studie is dus nodig (zie par. 8.3.1.b.). Voorlopig zullen we ons bij een eenvoudig, fenomenologisch beeld houden.

In dit beeld wordt aangenomen dat er van twee onafhankelijke adaptatieprocessen sprake is, één die steeds zeer snel gaat (zo snel dat de adaptatietijden voor de meeste praktische vragen verwaarloosd kunnen worden tenzij er bijvoorbeeld van zeer hoge rijnsnelheid sprake is) en één waarbij de adaptatietijden zeer aanzienlijke waarden kunnen aannemen.

5.3.3. Het adaptatiedefect

Wanneer de verlichtingsomstandigheden in het gezichtsveld sneller veranderen dan de adaptatietoestand, dan blijft de adaptatie als het ware achter. Dit achterblijven kan ook in luminantietermen worden uitgedrukt. Immers, men kan op ieder moment berekenen $L_a = L_f + L_{seq}$, en ook kan men op ieder moment zich een gezichtsveld voorstellen met een luminantie gelijk aan de op dat moment in feite bestaande adaptatietoestand van de fovea. Deze momentane adaptatietoestand wordt aangeduid met L'_a . Wanneer nu de adaptatie achterblijft dan is dus $L'_a \neq L_a$. In het geval van tunnelingen hebben we vooral te maken met verlagingen van de luminantie. Dan is dus $L'_a > L_a$. Het verschil wordt wel adaptatiedefect genoemd: L_{adef} . Dus $L'_a - L_a = L_{adef}$ en dus $L'_a = L_f + L_{seq} + L_{adef}$. Zo wordt dus het adaptatiedefect ook in luminantietermen uitgedrukt. Het zal blijken dat een van de meest belangrijke, momenteel nog niet opgeloste, problemen bij de praktische tunnelverlichting is dat dit adaptatiedefect in vele gevallen niet precies te bepalen is. In principe kan dit adaptatiedefect worden bepaald door op ieder moment L_a te bepalen (te berekenen) en L'_a te bepalen (te meten). Het verschil levert L_{adef} op. In de praktijk is dit echter moeilijk te realiseren. We hebben hiervoor gezien dat het zelfs al erg moeilijk is in evenwichtssituaties de adaptatietoestand te bepalen. Te verwachten is dat dit bij variabele toestanden nog moeilijker is. In beginsel echter is dit mogelijk, bijvoorbeeld

door middel van de bepaling van de zichtbaarheid van (kleine) contrasten of luminantieverschillen, of van puntvormige lichtbronnen van verschillende intensiteit. Dergelijke methoden zijn gebruikelijk voor het bepalen van het verloop van de donkeradaptatie, met name bij de tamelijk langzaam verlopende staafjesadaptatie. Ook voor adaptatie aan middelmatig lage niveaus zijn dergelijke methoden in gebruik; het lijkt daarom zeer gewenst - allereerst op basis van een gedetailleerde studie van de literatuur - na te gaan in hoeverre dergelijke meetmethoden in aanmerking komen voor het bestuderen van het adaptatiedefect zoals dat kan voorkomen bij het binnenrijden van een tunnel (zie par. 8.3.1.c. en verder bijv. Antis, 1979; Barlow, 1972; Boynton et al., 1969; Fry, 1964; Hood, 1978; Kooymans et al., 1978; Rinalducci, 1972).

Het adaptatiedefect moet, omdat het daarbij gaat om een betrekkelijk langzaam verlopend verschijnsel, in de eerste plaats in verband gebracht worden met de langzaam verlopende adaptatie-effecten, dus met de fotochemische effecten. Nu is het bekend dat dit fotochemisch effect bij de adaptatie "naar donker" te beschrijven is in termen van het "bleken" (bleaching) van pigmenten in het netvlies, en bij de adaptatie "naar licht" met de regeneratie van die pigmenten. Een overzicht is gegeven door Barlow (1972), Morgan (1965) en Haber (ed) (1968).

Deze processen van bleken en regeneratie treden steeds op bij iedere verandering van het lichtniveau; dus een zeker adaptatiedefect is steeds te verwachten. Het zal echter blijken een zeer belangrijke vraag te zijn onder welke omstandigheden met zo'n adaptatiedefect ook in de praktijk rekening moet worden gehouden. Daarbij spelen uiteraard twee zaken een essentiële rol: ten eerste het uitgangsniveau bij het adapteren en ten tweede het niveauverschil waarover deze adaptatie dient plaats te vinden. We laten het tijdinterval dat voor de adaptatie ter beschikking is - voor de praktijk een zeer belangrijk gegeven - momenteel buiten beschouwing, en we kijken voorlopig alleen naar "plotselinge" luminantie-overgangen - immers dan zal het eventuele adaptatiedefect het duidelijkst blijken.

Fotochemische processen spelen zich af in de receptoren zelf, en het vóórkomen van dergelijke processen is dus beperkt tot die lichtgevoelige elementen waarvoor de verlichtingsomstandigheden veranderen. Met andere woorden, dit adaptatie-effect is plaatsgebonden. Het wordt dan ook soms locale adaptatie genoemd. Wanneer een bepaald netvliesgedeelte eerst zeer sterk en daarna zeer zwak wordt verlicht, blijft de adaptatie in dat netvliesgedeelte nog even achter; het zwakke licht dat na de overgang op dit gedeelte valt veroorzaakt dus een relatief zwakke lichtindruk, immers het achterblijven van de adaptatie wil juist zeggen dat de gevoeligheid voor licht nog achterblijft, nog geringer is. De plaatsen die eerst sterk verlicht werden, die dus tot een zeer heldere lichtindruk aanleiding gaven, doen zich na de overgang als donker voor. En het blijft beperkt tot het verlichte netvliesgedeelte; wat men dus "ziet" is een donker gedeelte in het gezichtsveld met precies dezelfde vorm als het deel (het voorwerp) dat eerst zo helder was. Dit nu is het negatieve nabeeld van dit voorwerp. Aangezien bij dagzien tenminste drie verschillende soorten receptoren een rol spelen, ieder voor bepaalde lichtkleuren gevoelig, is het te verwachten dat niet alleen de helderheid, maar ook de kleur van het nabeeld sterk afwijkt van die van het oorspronkelijke beeld. Dit wordt inderdaad gevonden (zie bijv. Gregory, 1966, 1970; Schreuder, 1964). Behalve dergelijke negatieve nabeelden bestaan er ook positieve nabeelden, maar die blijven hier buiten beschouwing (Brown, 1965; Fry, 1964; Mann & Pirie, 1950).

De hier beschreven verschijnselen doen zich niet alleen voor bij een afname maar ook bij een toename van de helderheid in het gezichtsveld. Ook dan kan er sprake zijn van een adaptatiedefect. Dit blijkt uit het feit dat na een korte expositie de readaptatie zeer snel plaatsvindt. Zo vindt Schreuder (1964, blz. 88) dat, na een lange adaptatie aan 20 cd/m^2 , een korte preadaptatie (bijv. 10 seconden) aan 10.000 cd/m^2 , de readaptatietijd naar 20 cd/m^2 zeer kort is, maar dat na een preadaptatie van een paar minuten een aanzienlijke readaptatietijd nodig is. Deze invloed is vooral merkbaar wanneer het gaat om het detecteren van kleine contrasten:

bij contrasten van 20% of meer is het verschijnsel van ondergeschikt belang. De conclusie uit deze metingen is dat het een paar minuten duurt voordat een eindwaarde van de adaptatie aan 10.000 cd/m^2 is bereikt. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 20. Ze zijn globaal in overeenstemming met andere onderzoeken (zie Brown, 1965; Gregory, 1966, 1970).

Wanneer het lichtniveau waaraan moet worden geadapteerd aanzienlijk lager is dan 10.000 cd/m^2 , dan wordt de situatie anders. Dit kan worden toegelicht door andere onderzoeken van Schreuder (1964, blz. 89 en 90). Deze onderzoeken zijn weergegeven in Figuur 21. Deze onderzoeken betreffen de tijd die nodig is, na een plotse reductie van de gezichtsveldluminantie, voor het verdwijnen van de negatieve nabeelden (een maat voor het reduceren van het adaptatiedefect) in afhankelijkheid van het beginniveau. De metingen zijn uitgevoerd bij een homogeen veld van 10^0 met een object van 7 boogminuten en met een contrast van 7%. Uit Figuur 21 blijkt dat, in overeenstemming met het voorgaande, er een lange tijd nodig is voordat de nabeelden zijn verdwenen wanneer het beginniveau zeer hoog is (10.000 cd/m^2). Wanneer het beginniveau wat lager is, neemt echter de benodigde tijd zeer snel af. Bij $2000 \text{ à } 3000 \text{ cd/m}^2$ is er een duidelijk minimum; bij nog lagere waarden neemt de noodzakelijke tijd weer langzaam toe. Bij lage waarden van het beginniveau lijkt het erop alsof de (uiteeraard zeer lage) waarde van het eindniveau de benodigde tijd gaat beïnvloeden: het eindniveau komt dan terecht in het gebied van het mesopisch zien.

Deze twee groepen waarnemingen zijn van zeer groot belang. Ze geven immers de suggestie dat het adaptatiedefect bij zeer hoge luminantiewaarden in het gezichtsveld een belangrijke rol kan spelen, maar dat bij afnemende luminantiewaarden dit belang zeer snel afneemt. Nu zijn de door Schreuder gerapporteerde onderzoeken slechts op kleine schaal uitgevoerd. Gezien het belang van de zaak lijkt het daarom gewenst deze (of dergelijke) onderzoeken op wat ruimere schaal te herhalen, en daarbij als waarnemingscriterium rechtstreeks de drempelwaarde van de zichtbaarheid van bijvoorbeeld puntlichtbronnen te gebruiken (zie par. 8.3.1.c.).

Uit de onderzoeken op oogfysiologisch gebied zijn er wel aanwijzingen te vinden voor het feit dat bij zeer hoge lichtniveaus het menselijk gezichtsorgaan anders functioneert dan bij middelmatig hoge niveaus. Kwalitatief gesproken heeft het er de schijn van dat bij niveaus van enige honderden tot enige duizenden cd/m^2 het waarnemingsorgaan optimaal functioneert; bij hogere niveaus wordt de waarneming minder goed, alsof het systeem wordt overbelast. Dit blijkt al uit de klassieke proefnemingen van König over de contrastgevoeligheid en de vele onderzoeken die daarop zijn gevolgd (zie bijv. König, 1897; König & Brodhun, 1888). Een overzicht is te vinden in bijvoorbeeld Stevens (ed) (1951) en Morgan (1965). Een nauwkeuriger beschouwing leidt ertoe dat bij zeer hoge lichtniveaus niet steeds de waarneming zelf wordt gestoord, maar dat er eerder sprake is van een algemene afweerreactie tegen overmatig licht. Het lijkt erop dat dit zich vooral voordoet bij zeer grote heldere gebieden in het gezichtsveld (zie par. 8.3.1.e.). Deze afweerreactie kan bijvoorbeeld inhouden het gedeeltelijk dichtknijpen van de oogleden, of leiden tot overmatige traanproductie. Uiteraard komen dergelijke reacties de nauwkeurigheid van de visuele waarneming niet ten goede; het is echter iets anders dan een echte teruggang in de visuele prestatie. In dit verband kan worden gewezen op het aspect "visual clarity". Ook is er een studie gedaan over de hinder die bij de uitgang van een tunnel (in dit geval een metro-tunnel) kan optreden. Deze laatste studie is niet gepubliceerd. Gezien het belang hiervan voor de verlichting van tunnels lijkt een nadere studie dienaangaande gewenst (zie par. 8.3.1.g.).

De vrij abrupte overgang en de adaptatieverschijnselen die men kan ontmoeten wanneer men in plaats van zeer hoge adaptatieniveaus als uitgangsniveau kijkt naar wat minder hoge, is niet zo direct terug te vinden in de fysiologische verschijnselen zoals die zich in het visuele systeem voordoen. Men neemt gewoonlijk aan dat de adaptatietoestand gekenmerkt wordt door het percentage van het aanwezige pigment dat gebleekt is. Deze samenhang is weergegeven in Figuur 22 (afkomstig uit Cornsweet, 1970 en gebaseerd op gegevens van Rushton, 1963). Op basis van de gegevens van Wyszecki & Stiles (1967) kan de luminantie in cd/m^2 in plaats van in troland worden

opgegeven; het blijkt dan dat de luminantiewaarden waar we hier mee van doen hebben (2000 à 3000 cd/m^2) corresponderen met een bleekpercentage van 50 (zie ook Figuur 23 naar Fry, 1964). Het is niet zonder meer in te zien dat het visuele systeem, fysiologisch gezien, in het middengebied van een dergelijke bleekkromme opeens anders zou gaan reageren. Dit is dus een onbevredigende situatie; en wordt in de praktijk een duidelijke, tamelijk abrupte overgang geconstateerd die niet terug te vinden is in de fysiologische verschijnselen die daaraan gedacht worden ten grondslag te liggen. Nader onderzoek is dus duidelijk nodig, vooral gezien het belang van deze zaak voor de verlichting van tunnels (zie par. 8.3.1.f.). Het gaat hier dus om twee zaken. Ten eerste kan men in de praktijk constateren dat grote gezichtsvelddelen met zeer hoge lichtniveaus tot een afweerreactie aanleiding geven en daarmee waarschijnlijk de waarneming ongunstig beïnvloeden - een zaak waarvoor uit psychofysische metingen aanwijzingen bestaan, maar die niet duidelijk naar voren komt uit fysiologische onderzoekingen. En ten tweede bestaan er duidelijke aanwijzingen dat de adaptatie van een zeer hoog luminantieniveau naar een niveau dat veel lager ligt, veel langzamer gaat dan wanneer men van een middelmatig hoog niveau een dergelijke sprong in de luminantie presenteert. Dit laatste hebben we dus aangeduid met de stelling dat bij adaptaties waarbij het beginniveau zeer hoog is, een aanzienlijk adaptatiedefect kan bestaan, terwijl bij adaptaties waarbij het beginniveau minder hoog ligt, dit adaptatiedefect gering is en mogelijk verwaarloosd kan worden.

Ook wat dit tweede aspect betreft kan naar een aantal onderzoekingen worden verwezen. Boynton et al. (1969) hebben gevonden dat bij een plotselinge verlaging van de luminantie er een (voorbijgaande) vermindering van de contrastgevoeligheid optreedt. Bij gelijkblijvende relatieve verlaging (van factor 10 of een factor 100) blijkt dat deze vermindering van de contrastgevoeligheid kleiner wordt bij afnemende beginluminantie; ook blijkt dat het verschil tussen de uitgangsniveaus 4, 40 en 400 fL niet groot is, maar dat het beginniveau van 4.000 fL (ongeveer 12.000 cd/m^2) een veel grotere vermindering van de contrastgevoeligheid oplevert. Dit blijkt uit de

linker tak van Figuur 24 (naar Boynton et al., 1969). Boynton en Rinalducci hebben dergelijke metingen voor andere omstandigheden herhaald, maar de resultaten zijn steeds analoog (zie Boynton, 1967; Boynton & Boss, 1971; Boynton & Kandel, 1957; Boynton & Miller, 1963; Boynton et al., 1969, 1970; Rinalducci, 1970, 1971, 1972, 1976; Rinalducci & Beare, 1974).

Ook door anderen is onderzoek gedaan naar de invloed van "transient adaptation". Meestal zijn die onderzoeken niet zodanig opgezet dat het verschijnsel waar het ons hier om te doen is, duidelijk blijkt.

Zo geeft Fry (1964) op basis van gegevens van Rushton (1956, 1958, 1961, 1961a) aan dat er een constante relatieve toename is van kegeltjespigment bij afname van de verlichting (en een constante relatieve afname bij toename van de verlichting). Belangrijk is ook de opmerking waarmee Fry de bespreking van de fotochemische processen besluit. "Rushton has shown that at ordinary levels of luminance (up to 1,000 trolands) the concentration of photopigment is maintained at a maximum level and at these levels one does not have to be concerned about photochemical adaptation". Omdat een nadere uitwerking ontbreekt, is het moeilijk deze uitlating precies te interpreteren, maar het lijkt erop dat (volgens Fry en Rushton) pas boven 1000 troland (ca 150 cd/m^2) de fotochemische reacties voor de praktijk van belang worden. Deze waarde ligt lager dan de door Schreuder gesuggereerde. Verder kan nog vermeld worden de studie van Lossagk (1936), waarbij gevonden is dat het "Sofort-contrast" bij alle luminantiesprongen tussen 100.000 cd/m^2 en 1 cd/m^2 beginwaarde kleiner is dan 5% (d.w.z. een luminantieverschil van 105:100 blijft steeds zichtbaar); tussen 10.000 en 100 cd/m^2 is het zelfs 1,8%. Het is moeilijk om deze resultaten te rijmen met de nieuwere onderzoeken! Door Sewig (ed) (1938) worden dan ook andere conclusies getrokken, hoewel het blijkbaar om dezelfde studie van Lossagk gaat. Ook daaruit volgt dat bij hoge waarden van de beginluminantie de adaptatie langzamer gaat (zie Figuur 25).

Een aantal metingen zijn gerapporteerd door Hattwick (1954), steeds voor dezelfde luminantie in het begin (preadaptatie). Du Croz &

Rushton (1965) beschrijven donkeradaptatiemetingen, die voor ons doel echter niet zo veel informatie bieden, aangezien het bij dit onderzoek allereerst begonnen was om de processen zoals die zich bij de kegeltjes voordoen, nader te preciseren. Met name is de preadaptatie niet gespecificeerd: "bleken" was voor het doel genoeg. (Zie tenslotte Geisler, 1980, Guth, 1965; Mitchell & Rushton, 1971, 1971a; Osaka, 1981; Vos & Walraven, 1971).

In dit verband is de zgn. "equivalent background"-hypothese van belang. Er zijn een aantal situaties waarbij de drempel voor waarneming hoger is dan het geval zou zijn wanneer de waarneming alleen bepaald zou worden door de luminantie van het gezichtsveldgedeelte waar op dat moment naar wordt gekeken. Het blijkt dan men de invloed van zowel veranderingen die in het gezichtsveld in het verleden hebben plaatsgevonden als de invloed van kenmerken van andere gezichtsveldgedeelten kan weergeven in termen van een equivalente achtergrond die zich over het gezichtsveld uitstrekt. Deze constructie van een equivalente achtergrond is het eerste ingevoerd bij de bestudering van de verblindings (Holladay, 1926) en vervolgens bij de donkeradaptatie (Blakemore & Rushton, 1965; Crawford, 1947; Stiles & Crawford, 1932). Ook bleek dat nabeelden in termen van equivalente achtergronden kunnen worden beschreven (Barlow & Sparrock, 1964). De "equivalent background"-hypothese nu luidt dat dergelijke equivalente achtergronden en "echte" achtergronden zonder meer bij elkaar kunnen worden opgeteld, tenminste voor zover het betrekking heeft op de resulterende bleking van het fotopigment. Voor kegeltjes blijkt dit goed op te gaan (Blakemore & Rushton, 1965; zie ook Du Croz & Rushton, 1965). Rinalducci et al. (1970) kwamen tot andere resultaten, maar in een herevaluatie van die gegevens door Hollins & Alpern (1973) bleek toch dat de Dowling-Rushton relatie bleef gelden (Dowling, 1960; Rushton, 1961a; zie hiervoor verder Geisler, 1979, 1980 en Van Norren & Padmos, 1974). Het is niet zonder meer te overzien hoe deze "equivalent background"-hypothese gezien moet worden in relatie tot de resultaten van de studies van Narisada en diens medewerkers, die verderop besproken zullen worden, en deels al besproken zijn (zie resp. par. 5.2.4. en 6.3.4.). Nadere studie lijkt dus wel

gewenst. Uitgangspunt kan daarbij zijn de studie van Norren & Padmos (1974) (zie ook par. 8.3.1.d.).

Tenslotte kunnen nog de adaptatiemetingen van Baker et al. (1959) worden genoemd. Deze zijn interessant omdat daarbij een paar fundamentele aspecten van het achterblijven van de waarneming aan de orde gekomen zijn. Verder zijn de metingen van Ambrose & Hayhoe (1980) van belang omdat daarbij de adaptatie is onderzocht voor verschillende patronen van de test-stimulus.

Ook uit de proefnemingen van Schreuder (1964) die betrekking hebben op de minimale luminantie nodig in de ingang van de tunnel in afhankelijkheid van de buitenluminantie blijkt dat bij zeer hoge luminantie de visuele situatie bemoeilijkt wordt. We komen nog terug op deze proefnemingen (zie par. 6.2.; de proefnemingen zijn beschreven in Annex D), maar in dit verband kan alvast worden vermeld dat de verhouding tussen die twee luminanties bij ca 3000 cd/m^2 adaptatieluminantie een minimum vertoont (zie Figuur 26). Op de resultaten van dit onderzoek zullen we hier kort ingaan. In het verleden heeft men - waarschijnlijk dus ten onrechte - aangenomen dat het adaptatiedefect ook bij middenhoge en lage luminantiewaarden van doorslaggevend belang was, dat dus de adaptatie, beginnend bij middenhoge of lage adaptatietoestanden, aanzienlijke tijd in beslag neemt (CIE, 1973; Schreuder, 1964). Hieruit is de conclusie getrokken - al evenzeer waarschijnlijk ten onrechte - dat de resultaten van Schreuder over het gehele luminantiegebied rechtstreeks toepasbaar waren voor het verlichten van tunnelingangen. Uit Figuur 26 blijkt dat de gedaante van de kromme die aangeeft welke L_2 -waarde nog net toegelaten kan worden, niet sterk afwijkt van de lijn $L_1 = L_2$. In eerste benadering kan men stellen dat de relatie L_2/L_p (of L_2/L_1 , L_p is gelijk gesteld aan L_1 ; zie Annex D) over een groot gebied constant is. Maar aangezien het adaptatiedefect waarschijnlijk alleen maar een rol speelt bij hoge waarden van de adaptatieluminantie is het van belang te constateren dat juist bij $L_1 > 8.000 \text{ cd/m}^2$ opgegeven L_2 -waarden hoger zijn dan die welke uit de bedoelde L_2/L_1 regel zouden volgen. De kromme voor constante C zoals gegeven in Figuur 26 volgt alleen maar zeer

globaal een rechte lijn onder 45° . Juist ten gevolge van de invloed van het adaptatiedefect wordt de kromme bij hoge adaptatieluminantie steiler.

Dit laatste punt wordt bevestigd door proefnemingen van Mäder. Deze proefnemingen zijn in de meeste landen, waaronder Nederland, nauwelijks bekend. In de Alpenlanden, met name Zwitserland en Oostenrijk, worden ze echter als basis gebruikt voor de daar geldende aanbevelingen van tunnelverlichting. De proefnemingen zijn beschreven door Mäder & Fuchs (1966). De proefopzet is analoog aan die van Schreuder: in een buitenveld met een variabele luminantie wordt een binnenveld en een object vertoond. Het belangrijkste verschil is echter het feit dat bij de proeven van Mäder de expositietijd aanzienlijk langer is. Dit betekent dat tijdens de expositie het gezichtsorgaan de gelegenheid krijgt tot een vrij complete adaptatie; er is dus geen sprake van een belangrijk adaptatiedefect. Wanneer men nu de resultaten van Mäder & Fuchs vergelijkt met die van Schreuder, dan blijkt dat bij middenhoge luminantie een zeer goede overeenstemming bestaat. Bij zeer hoge luminanties vonden Mäder & Fuchs echter dat een aanzienlijk lagere waarde van L_2 toegelaten zou kunnen worden. Dit is juist wat men mag verwachten wanneer bij de eerste proeven het adaptatiedefect geen rol heeft gespeeld, en bij de tweede wel (zie ook Figuur 27).

Het is natuurlijk onbevredigend dat momenteel niet met zekerheid kan worden aangegeven waar de luminantiewaarde ligt waaronder men met het adaptatiedefect niet meer hoeft te rekenen. Op dit punt is nader onderzoek noodzakelijk. Voorlopig zal echter worden aangenomen, op basis van de gegevens die hierboven zijn aangegeven, dat wanneer de adaptatieluminantie minder dan 3000 cd/m^2 bedraagt het adaptatiedefect kan worden verwaarloosd. Deze constatering betekent dat steeds, op ieder moment, de adaptatie kan worden beschreven met behulp van de betrekking:

$$L_a = L_f + L_{seq}, \text{ eventueel vermeerderd met } L_v.$$

Op de consequenties, en dan in het bijzonder wat dit betekent voor de verlichting van het eerste gedeelte van de tunnel, komen we nog terug. Maar globaal kan nu al worden gezegd dat het feit dat het

adaptatiedefect kan worden verwaarloosd, betekent dat er geen reden meer is om een aparte drempelzone te definiëren, zoals in Hoofdstuk 4 is aangeduid. En dit betekent ook dat de discussie over het adaptatiepunt en het fixatiepunt veel van zijn betekenis verliest. Een voorwaarde is natuurlijk wel dat in de buurt van de tunnelingang L_a ook inderdaad niet meer dan ca 3000 cd/m² bedraagt. Dit betekent dat de omgeving in de buurt van de tunnelingang zo wordt uitgevoerd dat de adaptatietoestand (die op de open weg in vele gevallen correspondeert met waarden van boven 3000 cd/m²) over een zo groot mogelijke tijd geleidelijk kan afnemen, zodat van mogelijke geringe adaptatiedefecten geen hinder wordt ondervonden. Nauwkeurige waarden voor de daartoe benodigde tijd - en dus over de daartoe benodigde weglengte - kunnen niet worden gegeven, maar men mag op grond van praktijkervaringen aannemen dat een 10 à 20 seconden toch wel nodig is. In de termen van de traditionele definities uitgedrukt betekent dit dat het adaptatiepunt op een paar honderd meter voor de tunnel moet liggen, en dat de adaptatieluminantie na het passeren van het adaptatiepunt slechts langzaam en geleidelijk mag afnemen. Zoals reeds gezegd, is nader onderzoek hierover noodzakelijk. Ten eerste dus moet worden onderzocht of inderdaad bij een adaptatieluminantie onder de 3000 cd/m² bij een verlaging van de luminantie het adaptatiedefect verwaarloosd mag worden (zie par. 8.3.1.h.). We zullen hier niet in detail ingaan op de daartoe vereiste meetmethodiek, maar wel kan worden verwacht dat psychofysische metingen het meest in aanmerking komen - tot zekere hoogte ondersteund door de gegevens die afkomstig zijn uit de oogfysiologie en dan in het bijzonder uit de dierfysiologie. Het tweede wat nog onderzocht moet worden is de vraag op welke wijze, en in welk tijdsverloop, de luminantie van het buitenniveau teruggebracht moet worden naar de L_a -waarden (van rond 3000 cd/m²) waar men geen rekening met het adaptatiedefect meer behoeft te houden (zie par. 8.3.1.j.). Het is momenteel niet zonder meer duidelijk hoe dergelijke proeven nu precies moeten worden uitgevoerd. Het probleem is dat men daartoe waarschijnlijk niet alleen de adaptatieluminantie, maar ook de luminantie van het gezichtsveld meer in het algemeen gesproken,

moet kunnen kwantificeren. We krijgen daarbij te maken met dezelfde problemen die we hebben ontmoet bij de bespreking van de Stiles-Holladay formule, namelijk het feit dat momenteel eigenlijk nog niet op geheel bevredigende wijze de vraag is beantwoord wat er gebeurt binnen het gebied van 2×2^0 , het gebied dus onder de ondergrens van het geldigheidsgebied van de Stiles-Holladay formule. Die twee problemen (de Stiles-Holladay formule en de adaptatie) zijn dus kennelijk met elkaar verbonden.

6. PROBLEEMUITWERKING: DE LUMINANTIE IN HET BEGIN VAN DE TUNNEL

6.1. Inleiding

In het voorafgaande hebben we gezien dat bij zeer hoge waarden van de buitenluminantie in het begin de adaptatie slechts langzaam kan verlopen. Wanneer - zoals bij vele traditioneel uitgevoerde tunnel-ingenangen - de grote helderheden tot dicht bij de ingang doorlopen, bijvoorbeeld tot op een afstand die veel geringer is dan de stopafstand, zie par. 5.1.3., is het nodig dat de automobilist de tunnel kan binnenkijken, terwijl de adaptatietoestand van zijn gezichtsorganen nog die is welke bij de open weg hoort. We voeren hier het begrip "stopafstand" in; dit is de afstand overeenkomende met de remweg zoals in par. 5.1.3. gedefinieerd. De automobilist is derhalve het adaptatiepunt nog niet gepasseerd wanneer hij reeds in het begin van de tunnel de daar eventueel aanwezige objecten moet kunnen waarnemen. Om dit mogelijk te maken moet de luminantie in het begin van de tunnel, gewoonlijk aangeduid met L_2 , een bepaalde minimale waarde hebben. We laten nog even in het midden wat "het begin van de tunnel" precies is. Wordt deze waarde niet bereikt dan is waarneming van buiten af in het begin van de tunnel niet mogelijk; de tunnelingang doet zich dan als een "zwart gat" voor.

De eis dat in het begin van de tunnel de luminantie tenminste aan een bepaalde waarde moet voldoen, geldt niet voor een enkel punt in - of vlak bij - de tunnelingang, maar voor een zeker gebied, een zekere lengte. Immers, we hebben aangenomen dat de adaptatietoestand van het gezichtsorgaan van de automobilist pas op korte afstand van de ingang door de - relatief donkere - tunnelingang wordt beïnvloed. De visuele vereisten veranderen dus niet bij het dicht naderen van de tunnel; hier bedoelen we dicht bij dan de afstand gelijk aan de stopafstand vóór de tunnel, maar verder weg dan het adaptatiepunt. Dit betekent dat onder de hier geschetste omstandigheden de luminantie in het eerste gedeelte constant moet zijn. Dit gedeelte wordt gewoonlijk de drempelzone genoemd; de

lengte ervan is, gerekend van het begin van de tunnel naar binnen toe, gelijk aan de stopafstand verminderd met de afstand tussen het adaptatiepunt en de tunnelpoort. Dit alles is reeds toegelicht in Figuur 7.

Dit is de traditionele beschouwing over de ingangsverlichting van verkeerstunnels, zoals die ten grondslag heeft gelegen aan de onderzoeken van Schreuder (1964) en zijn weerslag heeft gevonden in de voor een aanzienlijk gedeelte op die onderzoeken gebaseerde aanbevelingen van de NSVV en van de CIE (zie hiervoor Hoofdstuk 4).

Aangezien deze beschouwing voor veel bestaande tunnels nog opgaat, zullen we hier de nodige aandacht aan besteden. Maar uit in par. 5.3.3. gegeven beschouwingen over het adaptatiedefect volgt dat bij wat lagere waarden van de adaptatietoestand de situatie geheel anders is. Wanneer men geen rekening behoeft te houden met het adaptatiedefect, is de adaptatietoestand alleen afhankelijk van L_f en L_{seq} (en eventueel L_v). Bij een tunnelingang wordt L_{seq} voor een groot deel bepaald door de helderheid van de open lucht, zodat L_{seq} bijna steeds snel afneemt bij het dicht naderen van de tunnel. L_a neemt dus ook af, zodat L_2 niet constant behoeft te zijn naar binnen toe. We komen hier nog uitgebreid op terug, maar het globale resultaat is dat niet alleen de eisen aan de luminantie in het begin van de tunnel anders worden, maar dat ook de (oogfysiologische) noodzaak voor de aanwezigheid van een drempelzone van de soort als hierboven beschreven vervalt. Deze aanpak wijkt sterk af van de traditionele beschouwing, zo sterk dat het gerechtvaardigd lijkt om over een nieuwe generatie (de derde dus) van tunnelingangsverlichting te spreken (zie ook Hoofdstuk 4). Wat hierna volgt (in par. 6.2.) is derhalve vooral van belang voor het beoordelen van tunnelverlichtingsinstallaties die tot de "tweede generatie" gerekend moeten worden.

6.2. De luminantie in de drempelzone

Bij de traditionele benadering, in termen van Hoofdstuk 4 de tweede generatie, gaat het allereerst om de waarde die de luminantie in de drempelzone moet hebben; de lengte van de drempelzone is een tweede, apart te bespreken punt. Als uitgangspunt diende de situatie die werd gekenmerkt door twee feiten: ten eerste is de buitenluminantie zeer hoog zodat het adaptatiedefect een belangrijke rol speelt, en ten tweede ligt het adaptatiepunt dicht voor de tunnel. Het resultaat is dus, zoals al gezegd, dat de adaptatietoestand nog niet is veranderd op een punt zo dicht voor de tunnel dat reeds in de tunnel naar binnen gekeken moet kunnen worden. De vraag is nu: hoe groot moet de waarde van de luminantie L_2 in de drempelzone zijn om voldoende waarneming te kunnen waarborgen?

Voldoende waarneming betekent in de traditionele beschouwing, zoals eerder is aangegeven, dat het standaardobject van $20 \times 20 \text{ cm}^2$ en een contrast van 20% op 100 m in 75% van de gevallen kan worden waargenomen. De meeste beschouwingen over de luminantie in de drempelzone zijn gebaseerd op de onderzoeken van Schreuder (1964). Deze zijn hieronder kort samengevat en iets uitgebreider beschreven in Annex D (zie ook par. 5.3.3.).

De grondgedachte was dat de waarnemingen gebeuren terwijl het oog van de waarnemer nog "geheel" is geadapteerd aan de buitenluminantie L_1 . Daartoe werd een scherm met luminantie L_p gepresenteerd. Omdat het scherm niet het gehele gezichtsveld beslaat, is $L_1 < L_p$. Het verschil is niet groot; we komen verderop hierop terug. Na een lange adaptatie aan dit scherm wordt daarin een klein luikje geopend. Dit stelt de tunnelingang voor met luminantie L_2 . Bovendien is er een klein voorwerp aangebracht met luminantie L_3 . De waarnemer moest aangeven of het voorwerp zichtbaar was of niet. De presentatietijd was 0,1 s. Aangenomen was, zoals gezegd, dat deze tijd zo kort was dat de adaptatie niet werd beïnvloed, zodat de adaptatie ook op de plaats van het luikje L_p bleef. De resultaten zijn samengevat in Figuur 26. Een deel van de proeven is elders herhaald (bijv. Narisada & Yoshimura, 1974; zie Figuur 28; Nakamichi et al., 1967; Mäder & Fuchs, 1966; zie Schreuder, 1971a, 1975), terwijl er

voorts sinds 1964 een aantal aanvullende proefnemingen zijn uitgevoerd (Adrian, 1976, 1979; Dubuisson, 1978; Gallagher & Freedman, 1979; Gallagher et al., 1979; Gudum & Vestergaard, 1971; Ketvirtis, 1972; Mäder, 1979, 1978; Narisada, 1975a; Narisada & Yoshimura, 1977; Narisada et al., 1980; Rinalducci, 1971, 1976; Roddewig & Stockmar, 1977; Schröter, 1977; Tanabe et al., 1977; Yoshikawa et al., 1976).

Momenteel is een Technisch Rapport van de CIE in voorbereiding (CIE, 1981), gebaseerd op een studie van Narisada. Hierin wordt ondermeer een vergelijking gegeven van de meeste van de hierboven genoemde proefnemingen, voor zover ze betrekking hebben op de verlichting van de drempelzone (zo is de titel van dit bijna voltooide CIE-rapport). Gezien het belang van deze studie wordt hiervan een uitgebreide samenvatting gegeven, ofschoon het rapport nog niet in zijn definitieve vorm beschikbaar is. Deze samenvatting is gegeven in Annex E. Het rapport wordt op deze plaats besproken, omdat het gebaseerd is op een aantal uitgangspunten zoals die bij de reeds genoemde "tweede generatie" voorkwamen, terwijl de aannamen - of hypothesen - die bij de derde generatie aan de orde lijken te komen, niet gebruikt worden. Dit betreft dan uiteraard vooral de vraag, of het nodig is rekening te houden met het adaptatiedefect. Deze vraag komt in het ontwerp CIE-rapport niet aan de orde. Op dit moment is echter vooral van belang de in dat rapport getrokken conclusie dat, op basis van de vergelijking met andere proefnemingen de resultaten van de proefnemingen van Schreuder inderdaad gebruikt kunnen worden om de luminantie in de drempelzone te kunnen bepalen. Hierbij is dan inbegrepen de constatering dat het standaardobject dat daarbij als criterium wordt gebruikt, ook inderdaad als zodanig gebruikt kan worden.

Nogmaals wijzen wij erop dat deze uitspraak alleen geldt voor de omstandigheden dat het adaptatiedefect aanzienlijk is. Dit is dus het geval bij hoge waarden van de buitenluminantie. En daarvoor geldt het CIE-rapport.

Uit de gegevens van Schreuder (1964, blz. 77, zie Figuren 26 en 29) is af te leiden dat de luminantie in het begin van de drempelzone bij een buitenluminantie van 8000 cd/m^2 tenminste 1000 cd/m^2 moet

bedragen voor een contrast van 20% (met de verdere, bekende, parameterwaarden; waarnemingskans 75%; expositietijd 0,1 s; objectafmetingen $20 \times 20 \text{ cm}^2$ op 100 m). Wanneer men als contrast voor het standaardobject kiest 25% of 30%, dan wordt de minimale waarde van L_2 700 cd/m^2 , resp. 450 cd/m^2 . Deze luminantie van 8000 cd/m^2 betreft de luminantie van het scherm; deze waarde komt overeen met ruim 7750 cd/m^2 voor een gezichtsveld dat zich tenminste 90° naar alle richtingen uitstrekt (immers, zoals in Annex B is berekend bij het kleinere gezichtsveld blijkt de L_{seq} 3% lager te zijn dan bij het uitgebreide veld).

Hier is de plaats om iets over de buitenluminantie te zeggen. Uitgangspunt van de hier gevolgde gedachtengang is dat zeer hoge L_1 -waarden vaak voorkomen. Uit metingen blijkt dit inderdaad: in het vrije veld waarbij geen afscherming door bebouwingen enz. voorkomen, worden waarden van de horizontale verlichtingssterkte van 100.000 lux of meer niet zelden waargenomen. Systematische metingen zijn o.a. uitgevoerd door Postma (1936) en Eymers (1935) (zie ook Anon, 1960; Hopkinson et al., 1966; Krochmann, 1963; Krochman et al., 1974; Reesinck, 1943, 1947; Rennhackkamp, 1967; Schreuder, 1964, 1977b).

In de meeste gevallen is het gezichtsveld in de buurt van een tunnel verre van homogeen. Men dient dus gegevens te hebben over de luminantie zoals die in het gezichtsveld optreden. Ook hierover bestaan vrij veel gegevens (zie bijv. Adrian, 1976, 1978a; Anon, 1979a, 1978b; Audier et al., 1970; Baba et al., 1967; Bonomo, 1980; Mäder, 1978; Mäder & Fuchs, 1966a; Narisada et al., 1980; Oud, 1978; Schreuder, 1964, 1977b; Westermann, 1975).

Het is niet gemakkelijk om een algemene gevolgtrekking uit deze gegevens te trekken, maar globaal gesproken blijkt wel dat waarden van 8000 cd/m^2 in het gezichtsveld vaak voorkomen, maar dan meestal in betrekkelijk kleine gebieden. Dit komt overeen met de resultaten van recente metingen, uitgevoerd in Nederlandse tunnels (Holten & Meulders, 1979, 1980; niet gepubliceerd). In het algemeen blijkt dat de hemel het helderste gedeelte van het gezichtsveld is. En voorts lijkt het erop dat de waarde van 8000 cd/m^2 als gemiddelde voor het gezichtsveld inderdaad hoog is in relatie tot wat men gewoonlijk in de praktijk tegenkomt.

6.3. Bepaling van de luminantie in het begin van de tunnel

In par. 6.2. is aangegeven hoe de luminantie in de drempelzone moet zijn. Uitgangspunt daarbij was dat er een aanzienlijke invloed uitgaat van het aanwezige adaptatiedefect. In het voorafgaande is echter aangegeven dat deze situatie in moderne tunnels die op een verstandige wijze zijn ontworpen en uitgevoerd, niet meer behoeft voor te komen (par. 5.3.3.). We zullen nu bekijken wat de luminantie in het begin van de tunnel moet zijn wanneer men geen rekening meer behoeft te houden met het adaptatiedefect. Zoals reeds is aangegeven is een van de gevolgen daarvan het feit dat naar binnen toe de luminantie niet constant behoeft te zijn; het heeft onder die omstandigheden niet veel zin om van de "drempelzone" te blijven spreken. We zullen dus een nieuwe term moeten invoeren. We zullen verder - tot er eventueel een betere term is gevonden - gewoon spreken van de tunnelingang of, wanneer er kans is op misverstand, van "het eerste gedeelte van de tunnel". Daarbij moet nog worden opgemerkt dat we voorlopig nog geen rekening houden met het daglicht dat van buitenaf de tunnel binnen kan vallen. We komen later nog terug op deze lichtinval (zie par. 7.2.).

De vraag is nu wat de luminantie op verschillende plaatsen in het eerste gedeelte van de tunnel moet zijn om een voldoende waarneming te kunnen waarborgen. Voor we echter op deze vraag ingaan, moet er nog een afspraak worden gemaakt wat we zullen verstaan onder de luminantie in de tunnel. We zullen onder de luminantie op een punt in de tunnel verstaan het gemiddelde van de luminantie van wand en wegdek, gemeten in de lengterichting over een stuk van de tunnel dat een paar meter lang is. In de meeste gevallen - tenzij er grote verschillen in luminantie bestaan tussen wanden en wegdek - mag men de wegdekluminantie daarvoor nemen. Het is nog wel een vraag hoe de optimale luminantieverhouding is tussen wand en wegdek (zie par. 8.5.2.a.).

Bij deze definitie wordt dus geen rekening gehouden met het feit dat in de formule zoals we hem gebruiken de L_f (de luminantie van het gezichtsveldgedeelte dat op de fovea wordt afgebeeld) in feite

alleen betekenis heeft wanneer dat betreffende gezichtsveldgedeelte ook zo groot is dat het de fovea geheel bedekt. En dit is waarschijnlijk niet het geval bij de hier te bespreken situatie. We maken dus een fout; het is echter de vraag of deze fout wel zo groot is. Immers de blikrichting is niet constant, zodat er toch sprake zal zijn van een aanzienlijke spreiding. We zullen dus, ondanks de resulterende onnauwkeurigheid voor de foveale luminantie L_f , de tunnel-luminantie L_x nemen, en wel de wegdekluminantie op het punt x . Het lijkt echter wel gewenst om dit punt nader te bestuderen, en wel tegelijk met de andere mogelijke gevolgen van het feit dat de ondergrens van het gebied waar de Stiles-Holladay formule geldig is, eigenlijk vrij groot is wanneer men het feitelijke gezichtsveld van een bestuurder van een auto in gedachten neemt (zie par. 8.5.2.b.). Kortheidshalve: L_x is de wegdekluminantie op het punt met lengtecoördinaat x in de tunnel. Het is dus de luminantie van het stuk weg waar de bestuurder naar kijkt, en niet de luminantie van het stuk weg waar de bestuurder zich bevindt. We nemen daarbij aan dat de bestuurder steeds een vaste afstand voor zich uitkijkt, en dat deze afstand gerelateerd is aan de stopafstand. Daarom ook heeft die afstand - tenminste bij constante snelheid - een vaste waarde. Over de kijkrichting is in par. 5.2.4. al één en ander gezegd. Volledigheidshalve vermelden we nogmaals dat de luminantie van een tunnelgedeelte in twee opzichten van belang is: de luminantie L_x bepaalt mede de adaptatietoestand van het oog (en daarmee de visuele prestaties die mogelijk zijn), en de luminantie is van belang in verband met het feit dat de meeste obstakels die in een tunnel kunnen voorkomen - tenminste voor een belangrijk deel - tegen het wegdek afsteken: het wegdek bepaalt (mede) de adaptatie, en het vormt een achtergrond (Adrian 1978a, 1979; Mäder, 1978; Schreuder, 1964, 1965b).

Wanneer we geen rekening houden met het adaptatiedefect en dus aannemen dat de buitenluminantie lager is dan ca 3000 cd/m^2 en ook niet met lichtverstrooiing, dan is op ieder moment $L_a = L_x + L_{seq}$.

Dit geldt dus voor iedere positie van de bestuurder buiten de tun-

nel maar wel zo dicht bij de tunnel gelegen dat hij in de tunnel naar binnen moet kunnen kijken. Wanneer de bestuurder dicht bij de tunnelpoort komt, neemt L_{seq} af omdat steeds meer van het heldere gezichtsveld wordt afgeschermd. In het bijzonder geldt dit voor de vrije hemel. Zou nu L_x constant zijn (zoals L_2 was bij de traditionele drempelzone) dan zou L_a toch afnemen - immers er is geen adaptatiedefect. Bij een lagere L_a behoort echter een lagere L_x !

Op deze wijze sprekend in algemeenheden komen we niet verder. De volgende stap is dat we aannemen dat er een vaste relatie bestaat tussen L_a en L_x . Dit betekent dan dat we veronderstellen dat er bij iedere L_a één L_x waarde hoort die correspondeert met "juist voldoende waarnemingsmogelijkheden". Wanneer we het hebben over de drempelwaarde van waarneming is er geen probleem. Er bestaan vele onderzoeken waarbij deze relatie is bestudeerd voor verschillende waarden van de waarnemingsparameters, en ook voor verschillende waarnemingscondities (Adrian, 1969, 1976, 1978; Blackwell, 1946, 1966; Blackwell & Blackwell, 1977; Boyce, 1978). Een overzicht is gegeven in CIE (1972) (zie ook CIE, 1979).

Wanneer er echter sprake is van bovendrempelig waarnemen, en vooral wanneer er sprake is van waarneming in het verkeer, dan is het niet zo duidelijk. Het is bekend dat onder dergelijke omstandigheden de waarneming sterk wordt beïnvloed door andere factoren, en niet alleen door L_a en de eigenschappen van het waar te nemen "kritische object". Systematisch onderzoek is echter niet bekend. Men volstaat in dergelijke gevallen er meestal mee om een min of meer arbitraire "field factor" in te voeren, op een zodanige wijze dat men hopen mag dat de praktische situatie min of meer accuraat wordt beschreven. Het zal duidelijk zijn dat men bij het kiezen van een dergelijke veldfactor er verstandig aan doet er één te kiezen, zodanig dat er weer een éénduidige relatie ontstaat tussen L_a en L_x . Men moet zich er echter wel van bewust zijn dat het hier om een benadering gaat.

We kunnen nu op de volgende manier te werk gaan. Stel de drempelwaarde voor het nog juist waarneembare contrast is p (voor het

hier van belang zijnde luminantiegebied en voor de meer gangbare waarnemingsomstandigheden en criteria ligt p meestal tussen 0,01 en 0,02 (zie bijv. CIE, 1972 en Kern, 1952). Wanneer men nauwkeuriger te werk gaat, moet men ermee rekenen dat p van de adaptatie afhangt).

Voor de luminantie van het object L_o en die van de achtergrond waar het hier om gaat (L_x) is het drempelcontrast C :

$$C = \frac{L_o - L_x}{L_x} = p$$

Wanneer het gezichtsveld bestaat uit een relatief donker gedeelte met luminantie L_x en een licht gedeelte met L_l dan wordt door de luminantiesluier het waar te nemen contrast kleiner. Wanneer dit waar te nemen contrast toch p moet blijven bedragen, dan moet het "echte" (het intrinsieke) contrast C' groter zijn, zeg p' . Het waar te nemen contrast blijft dan p ; dus

$$C = \frac{L_o - L_x}{L_x + L_{seq}} = p$$

maar het intrinsieke contrast is groter

$$C' = \frac{L_o - L_x}{L_x} = p'$$

De waarde van p' is dus nu gerelateerd aan het contrast dat door het "kritische object" wordt gevormd.

Uit deze twee relaties volgt dus

$$p' L_x = p(L_x + L_{seq}) \text{ en}$$

$$L_x = \frac{p}{p' - p} L_{seq}$$

Met deze betrekking is L_x te bepalen; immers L_{seq} kan worden berekend of gemeten, p is de (bekende) drempelwaarde en p' dient te

worden gekozen. Wanneer men zo te werk gaat, dan zal men geen realistische waarden vinden, omdat hier nog steeds van drempelwaarden is uitgegaan. De hierboven genoemde veldfactor dient om rekening te houden met de niet-optimale waarnemingsomstandigheden. De eenvoudigste manier om daarmee rekening te houden is aan te nemen dat het contrast tenminste een veelvoud m van de waarde behorende bij de drempel van waarneming moet hebben.

De hier geschetste gedachtengang wordt als regel gevolgd wanneer men probeert de minimale luminantiewaarde voor het begin van de tunnel te bepalen. Omdat deze gedachtengang op nogal uiteenlopende wijze is uitgewerkt, zullen de meer gangbare methoden hieronder afzonderlijk worden besproken. De te bespreken methoden ter bepaling van de luminantie in het begin van de tunnel zijn die, welke zijn voorgesteld door Schreuder, Mäder, CETU, Narisada, Schröter en Adrian. Ze worden achtereenvolgens kort toegelicht; de volgorde is min of meer chronologisch. De oudste van deze methoden, degene die ook door de CIE (1973) is gevolgd, heeft nog de kenmerken van de "tweede generatie" zoals die in Hoofdstuk 4 is beschreven, dit in tegenstelling tot de daarop volgende methoden. Als zevende is toegevoegd de door de PIARC voorgestelde methode.

6.3.1. Methode Schreuder

De methode Schreuder is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

- Er is een hoge, constante adaptatieluminantie, die ook op een afstand kort voor de tunnelingang nog aanwezig is (L_1 genoemd).
- Het adaptatiepunt ligt dus dicht voor de tunnel.
- Het adaptatiedefect speelt een doorslaggevende rol.
- Comfortoverwegingen zijn van overheersend belang.

De eerste stap is het bepalen van L_1 . Schreuder (1964) heeft voorgesteld $L_1 = (\beta/\pi)E$. Met $\beta \approx 0,25$ en $E \approx 100.000$ lux wordt dit $L_1 \approx 8000$ cd/m².

Een verfijning is voorgesteld door de CIE (1973):

$$L_1 = \frac{3L_{50} + 2L_{150} + L_{250}}{6}$$

waarin L_{50} , L_{150} en L_{250} de luminanties zijn binnen een cirkelvormig meetveld van 2×10^0 op resp. 50, 150 en 250 m voor de tunnel.

De tweede stap is het aflezen van L_2 uit een diagram (zie Figuur 26) dat gebaseerd is op laboratoriumproeven en een zeer bepaalde waarnemingsconditie voorstelt. Deze waarde van L_2 moet over de volle lengte van de drempelzone gerealiseerd worden. Deze methode is beschreven door Schreuder (1964, 1965c, 1967b) en CIE (1973).

6.3.2. Methode Mäder

De door Mäder voorgestelde methode is gebaseerd op de metingen van Mäder & Fuchs (1966), maar is verder tot zekere hoogte analoog aan de hiervoor behandelde methode. Weer wordt eerst de waarde van L_1 bepaald die daarbij wordt benaderd door de luminantie van het wegdek. Derhalve wordt die luminantie zeer precies bepaald. Er is een gedetailleerde bepalingwijze gegeven waarmee de luminantie van een door daglicht verlicht wegdek kan worden berekend (Mäder, 1968, 1969; Mäder & Fuchs, 1966, 1966a). Vervolgens wordt op basis van de genoemde onderzoeken de waarde van L_2 bepaald. Zoals reeds eerder (par. 5.4.2.) is aangegeven is deze waarde meestal lager dan die welke op analoge manier volgens de methode Schreuder wordt gevonden. Deze methode is als standaardmethode ingevoerd in Oostenrijk en Zwitserland, en is dan ook beschreven in de nationale richtlijnen van die landen (zie bijvoorbeeld Anon, 1978). Vooral van belang is de recente uitwerking: de zgn. tegenstraalverlichting (zie verder par. 7.4.).

6.3.3. Methode CETU

Het Franse Centre d'Etudes des Tunnels (CETU) heeft onderzoek over tunnelverlichting uitgevoerd. Dit onderzoek staat los van de andere onderzoeken (Schreuder, Narisada, Mäder). De resultaten hebben aanzienlijke invloed gehad op de standpunten die door de PIARC zijn (en worden) ingenomen. De door de CETU voorgestane methode, die o.a. heeft geresulteerd in de in Frankrijk gebruikelijke methoden voor

het verlichten van tunnels, is samengevat door Dubuisson (1978) (zie ook Perrier, 1977). Een analoge methode is voorgesteld door Hopferwieser (1977) en Monié et al. (1981).

De methode is geheel analytisch, en daarom interessant. Uitgangspunten zijn de in CIE (1972) gegeven standaardkromme voor de contrastgevoeligheid (RCS-kromme) en de door Fry (1954) gegeven verblindingsformule (zie ook Fry, 1955). Verder wordt - numeriek - rekening gehouden met de absorptie in de atmosfeer. Tenslotte wordt van een experimentele relatie gebruik gemaakt voor het bepalen van de zichtbaarheidsafstand van obstakels. Het eindresultaat is een gecompliceerde formule waarmee de zichtbaarheidsafstand kan worden bepaald wanneer het contrast, de atmosferische transmissie, de luminantie en de sluiertiluminantie bekend zijn. Wanneer men de sluiertiluminantie bepaalt voor het gezichtsveld buiten de tunnel, kan de formule ook worden toegepast voor tunnelingangen. Dubuisson (1978) geeft een paar voorbeelden: voor $L_1 = 4000 \text{ cd/m}^2$ moet L_2 tenminste 121 cd/m^2 bij een zichtbaarheidsafstand van 100 m van het object zijn. Voor een zichtbaarheidsafstand van 125 m moet $L_2 = 222 \text{ cd/m}^2$ zijn. Het voordeel van de methode is dat de bepalingwijze analytisch is; een voordeel dat door de opkomst van eenvoudig programmeerbare rekenmachines momenteel kleiner is dan vroeger. De methode is ook gebruikt voor het bepalen van het gewenste luminantieverloop op allerlei punten; zie Figuur 30. Deze figuur is de basis voor de Franse aanbevelingen.

De CETU-methode heeft een belangrijke beperking; er is geen rekening gehouden met tijdafhankelijke adaptatie-effecten; het adaptatiedefect is verwaarloosd.

De bepaling van L_1 is door de CETU apart bestudeerd (Dubuisson, 1974).

De methode is analoog aan die welke door de CIE en door Narisada is gegeven; alleen is het meetveld wat groter. Dit lijkt niet veel uit te maken.

6.3.4. Methode Narisada

De methode van Narisada heeft zijn beginpunt in de overwegingen dat de door Schreuder gevonden waarden, die in de CIE aanbevelingen

zijn gebruikt, aanleiding gaven tot tunnelverlichtingsinstallaties die zeer duur waren en bovendien wellicht een hogere verlichtingskwaliteit hebben dan strikt nodig (Schreuder, 1971a, 1975; Narisada, 1972, 1975a). De eerste stap was het invoeren van het fixatiepunt, hetgeen verdedigd werd op grond van de metingen aan oogbewegingen (zie par. 5.2.4.) en dat resulteerde in lagere aanbevelingen. Bij de verdere uitwerking van de methode zijn de luminanties van het foveale gebied en die van de equivalente sluier ingevoerd. Hierbij is niet, zoals bij andere methoden, ervan uitgegaan dat het adaptatiedefect verwaarloosbaar is. In de metingen die mede ten grondslag liggen aan deze methode is ervan uitgegaan dat er in het visuele systeem van twee effecten sprake is: een fysisch effect (het strooilicht in het oog) en een fysiologisch effect (de adaptatie). De laatste neemt tijd in beslag, de eerste niet (zie Narisada & Yoshimura, 1977).

De methode gaat als volgt in zijn werk (zie Van den Bijllaardt & Narisada, 1980). Een samenvatting ervan is gegeven in CIE (1981). - De luminantie van het gezichtsveldgedeelte dat op de fovea wordt afgebeeld, wordt bepaald. Deze luminantie (L_{af} genoemd) wordt benaderd door de luminantie van het wegdek binnen een cirkelvormig veld van $2 \times 1,5^\circ$, gemeten op 100 m afstand. Deze vrij grove benadering is gerechtvaardigd omdat de bijdrage van L_{af} slechts gering blijkt te zijn (CIE, 1981).

- De sluierluminantie L_{seq} wordt bepaald. Er wordt aangegeven dat de beschouwingen zoals die door Moon & Spencer (1943) zijn aangegeven en daarna door velen herhaald (zie bijv. Annex B) niet toegepast kunnen worden (Narisada & Yoshimura, 1977).

"This means that the adaptation luminance defined by Moon-Spencer is quite probably concerned only with the foveal adaptation. The adaptation luminance defined earlier includes the veiling luminance as well. For this reason Moon-Spencer's formula cannot be applied ..". Dit moet op een misverstand berusten, omdat Moon-Spencer ook de sluierluminantie mee in de beschouwing betrekken. Wij hebben dan ook in het voorafgaande bij herhaling gebruik gemaakt van de berekeningen van de sluierluminantie, en dit is ook in de meeste van de andere methoden, besproken in deze

paragraaf, gedaan. Narisada stelt echter voor de L_{seq} te bepalen met behulp van de glare lens (zie par. 5.2.4.).

Interessant is het alternatief gegeven voor het bepalen van de sluiertluminantie. Op basis van de metingen in een groot aantal Japanse tunnels is gevonden dat de L_{seq} kan worden benaderd door de buitenluminantie (Narisada et al., 1980), omdat de foveale bijdrage maar gering is (Narisada & Yoshimura, 1977). In feite wordt dan meteen L_1 benaderd (zie verderop).

- Op basis van de meetgegevens uit Narisada & Yoshimura (1977) kan, wanneer L_{af} en L_{seq} bekend zijn, de drempelwaardeverhoging bepaald worden. Op basis van Figuur 31 worden ΔL_{af} en ΔL_{seq} bepaald. Deze worden vervolgens opgeteld: $\Delta (L_{af} + L_{seq})$.

- Op basis van de meetgegevens van Inohara et al. (1980) kan uit $\Delta (L_{af} + L_{seq})$ de equivalente luminantie L_1' worden bepaald. Deze tussengrootheid L_1' heeft veel verwarring opgeleverd. Volgens CIE (1981) is deze grootheid gedefinieerd als "A hypothetical luminance of a standard field for which the perception of the observer's eyes is just equivalent to that under non-uniform luminance field conditions. This was sometimes called "adaptation luminance" in the past".

Dit is dus kennelijk hetzelfde als wat wij hiervoor ook inderdaad als adaptatieluminantie L_a hebben aangenomen. Het probleem is voor een groot deel ontstaan omdat de overwegingen van Narisada hebben geleid tot de mening dat de afmetingen van het meetveld (of het gezichtsveld) zeer grote invloed hebben op de foveale adaptatie. Narisada (1980) heeft gesteld "By calculation, it was found that the luminance difference threshold for the Narisada et al. (1980) type standard field is equivalent to that for a Schreuder (1964) type with a luminance about 1.5 times greater".

Aangezien blijkt dat hier bedoeld is dat de strooilichtbijdrage van het scherm met 1,5 moet worden vermenigvuldigd (Narisada, 1981; in overeenstemming met Annex B) is het blijkbaar onjuist om op basis hiervan alle luminanties in het verhaal gewoon maar met 1,5 te vermenigvuldigen, zoals o.a. Van den Bijllaardt & Narisada (1980) voorstellen.

"Die Schirme die Schreuder und Narisada ... verwendet haben waren

verschiedener Grösse. Das hatte Konsequenzen für die dabei vorkommenden Schleierleuchtdichten. Es ist dazu notwendig die van Narisada gegebenen L_1' -Werte mit 1,5 zu multiplizieren um einen equivalenten L_1 -Wert von Schreuder zu bekommen". Annex B wijst eerder in de richting van een verschil van een paar procent.

- Wanneer men de L_1' -waarde heeft, kan op basis van de door Schreuder (1964) gevonden relatie de L_2 worden bepaald, die dan de luminantie in het begin van de tunnel voorstelt. Het te gebruiken contrast is daarbij nog te kiezen. Van den Bijllaardt & Narisada (1980) nemen 20%. De Japanse aanbevelingen (Anon, 1973) nemen 25%, terwijl in CIE (1981) "contrast perhaps of less than 30% is one of the best compromises between safety and economy".

6.3.5. Methode Schröter

Door Schröter (1977) is een methode gepubliceerd ter bepaling van de luminantie in het begin van de tunnel. Uitgangspunt daarbij was dat een maximaal mogelijke zichtbaarheid niet nodig is. Aangenomen is dat de zichtbaarheid zoals die 's nachts op een goed verlichte weg ($\bar{L} = 2 \text{ cd/m}^2$) voldoende is. De experimenten, en de daarop gebaseerde bepalingsmethode, gaan terug op deze aanname. Allereerst is bepaald wat, gegeven bepaalde instrumentele randvoorwaarden, het drempelcontrast is voor een voorwerp van 7' afmetingen in hoekmaat, wanneer de waarnemingstijd onbeperkt is en de waarnemingskans 50% (Schröter neemt het rekenkundig gemiddelde van de luminantiewaarden; aangenomen is dat dit hetzelfde is als een waarnemingskans van 50%).

Dit leverde op een drempelcontrast van 7% bij 2 cd/m^2 . Dit voorwerp van 7% en 7' werd vervolgens als "standaardobject" genomen. Dit lijkt een voordeel; de keuze van het standaardobject is dus minder arbitrair dan de keuze zoals beschreven in par. 5.1.2.

Vervolgens is de benodigde luminantie in de tunnelingang (hier is genomen het wegdek, aangeduid met L_5) bepaald voor dezelfde waarnemingscriteria. Wanneer van de buitenluminantie L_{AG} wordt genomen, een gemiddelde over de belangrijkste gezichtsveldgedeelten binnen een gebied dat 15° hoog is en 20° breed, dan is het resultaat:

$$L_5 = 0,142 L_{AG}^{0,77}$$

Ook bij deze methode wordt geen rekening gehouden met een eventueel adaptatiedefect. Bovendien wordt aangenomen dat in alle opzichten, dus niet alleen wat betreft de tijdafhankelijke aspecten van de adaptatie, de waarneming onder evenwichtsomstandigheden gelijk zijn aan die bij een zeer heterogeen gezichtsveld. De proeven zijn in essentie stationair, maar de invloed van oogbewegingen is niet bekend. Verwacht mag worden dat hierdoor de drempelwaarden voor het geval van de tunnelingang verhoogd moeten worden.

Het is duidelijk dat in dit geval geen "veldfactor" zoals door Adrian is ingevoerd (zie par. 6.3.6.) nodig is. Immers, de drempelwaarde wordt onder gelijke experimentele omstandigheden bepaald als de feitelijke meetgrootte.

Volledigheidshalve kan worden vermeld dat Schröter een ontwerpmethode gebaseerd op deze bepalingmethode van de luminantie heeft gepresenteerd, en ook een meet- en regelmethode om aanpassingen aan wisselingen in de daglichtomstandigheden te realiseren. Deze methoden schijnen in de praktijk goed te voldoen; gepubliceerde gegevens ontbreken echter (Schröter, 1981).

6.3.6. Methode Adrian

Adrian (1976, 1978, 1979) heeft een methode geopperd om de luminantie in het begin van de tunnel te bepalen. Deze methode is gepresenteerd in twee versies die onderling op details verschillen.

De eerste versie gaat uit van een diagram waaruit de vereiste waarde van de luminantie in het begin van de tunnel (L_2 genoemd) kan worden afgelezen, wanneer bekend is welke waarde het contrast heeft van het waar te nemen object (C) en wat L_{seq} is. Dit diagram is afgebeeld in Figuur 32.

Uitgangspunt voor het opstellen van dit diagram is dat een voorwerp alleen maar als voldoende zichtbaar kan worden beschouwd wanneer het contrast waarmee het wordt gezien (C_{red}) tenminste 20% bedraagt. Dit is als volgt afgeleid: de drempelwaarde voor het contrast bij de hier aan de orde zijnde luminanties bedraagt, onder

laboratoriumomstandigheden, ongeveer 2% (Adrian, 1976). Wegens het feit dat de presentatietijd voor de praktijk anders wordt gekozen en het feit dat het verschijnen van het object in de praktijk onverwacht is, wordt een "veldfactor" van een factor 10 ingevoerd. Dus C_{red} moet tenminste 20% bedragen. Het intrinsieke contrast (zie omschrijving daarvan in par. 5.2.2.) moet dus groter zijn, immers

$$C = \frac{\Delta L}{L_2} \text{ en } C_{red} = \frac{\Delta L}{L_2 + L_{seq}}$$

Op basis van deze gegevens kan het bovenvermelde diagram worden geconstrueerd, als bovendien het verloop van de drempelwaarde van de contrastgevoeligheid in afhankelijkheid van de adaptatieluminantie bekend is. Adrian (1976) heeft daarvoor de gegevens verzameld, deels gebaseerd op eigen experimenten, deels op de gegevens van Blackwell (zie Adrian, 1969 en Adrian & Eberbach, 1969; zie ook Figuur 33).

Wanneer dus L_{seq} bekend is en C gekozen, dan is L_2 te bepalen.

Deze methode heeft een aantal zwakke punten.

Ten eerste is het uitgangspunt dat het adaptatiedefect geheel verwaarloosbaar is. Immers, er is van uitgegaan dat $L_a = L_2 + L_{seq}$. Een tweede groot bezwaar is het feit dat een veldfactor ter grootte van een factor 10 is ingevoerd. Dit is verder niet geargumenteed; er is slechts, zeer in het vage, verwezen naar oude experimenten die niets te maken hebben met tunnelverlichting.

En ten derde wordt de keuze van het grenscontrast zo maar aan de gebruiker overgelaten.

De tweede versie van de methode Adrian ondervangt tot zekere hoogte deze bezwaren. Deze tweede versie is uitgewerkt in een (nog) niet gepubliceerde studie (Adrian, 1980). Weer wordt uitgegaan van het contrast:

$$C = \frac{\Delta L}{L_2}; C_{red} = \frac{\Delta L}{L_2 + L_{seq}}$$

Maar nu wordt voor C gekozen de waarde van 35%. Vervolgens wordt vereist dat C_{red} tenminste gelijk is aan de drempelwaarde C_{th} , dus $C_{red} = C_{th}$. Hieruit volgt:

$$L_2 = \frac{L_{seq}}{\frac{0,35}{C_{th}} - 1}$$

Voor de drempelwaarde C_{th} is een nieuwe tabel gegeven (zie Tabel 3) waarin rekening is gehouden met het verschil tussen laboratorium en werkelijkheid wat betreft de presentatietijd. Hierdoor wordt de benodigde veldfactor kleiner, namelijk een factor 4. Maar de situatie blijft onbevredigend: weer wordt in zeer algemene termen verwezen naar oud onderzoek, ditmaal dat van Roper & Howard (1938) over zichtbaarheid met verlichting door autokoplantaarns.

Weer moet L_{seq} worden bepaald. Adrian stelt nu dat het voldoende is dit te doen van 200 m afstand van de tunnel. Het diagram dat reeds eerder is genoemd kan weer worden gebruikt. Tenslotte is nog de mogelijkheid gegeven om de resultaten die zo zijn gevonden, te vergelijken met de resultaten van subjectieve beoordelingen aan een tunnelmodel. Deze vergelijking kan worden gemaakt aan de hand van Figuur 34 waar de resultaten van deze subjectieve beoordelingen (uitgedrukt in "Rapportcijfers") zijn ingetekend in de berekende waarden volgens Figuur 32. De bedoelde subjectieve beoordelingen zijn ontleend aan een nog niet gepubliceerde studie van de Universiteit Karlsruhe (Menkhaus, 1981).

6.3.7. De PIARC-methode

De PIARC heeft in 1980 richtlijnen aangegeven voor de verlichting van tunnels (Anon, 1979b). Deze richtlijnen zijn voor een aanzienlijk deel gebaseerd op de CIE-aanbevelingen. Dit is in overeenstemming met het feit dat de CIE-aanbevelingen zelf weer zijn opgesteld in nauw overleg met de PIARC. In het voorwoord van de CIE-publicatie is dit zelfs nog expliciet vermeld ("In its present form, the text

of the document has obtained the approval of the Committee for Road Tunnels of PIARC") (CIE, 1973; blz. 27).

De nieuwe PIARC-richtlijnen wijken echter wat betreft de verlichting van het eerste stuk van de tunnel, en de bepalingwijze daarvan, nogal sterk af van de door de CIE aanbevolen waarden. Wel wordt vastgehouden aan een vaste verhouding L_2/L_1 , maar de PIARC kiest voor een waarde van ca. 0,07. Dit is een typisch praktijkgetal waarvoor geen preciese onderbouwing is gegeven. En het tweede belangrijke verschil tussen CIE en PIARC is gelegen in de waarden van L_1 , en de bepalingwijze ervan. De PIARC heeft voor een zeer eenvoudige methode gekozen. Er zijn vijf veel voorkomende (geometrische en geografische) situaties gegeven (zie Figuur 35). Voor iedere situatie is een afbeelding gekozen van een enkele tunnel die aan die situatie voldoet, en een enkele L_1 -waarde die geacht wordt representatief te zijn voor de adaptatieluminantie zoals die zich kort voor het binnenrijden in die betreffende tunnel kan voordoen. Dit is een zeer praktische en eenvoudig toe te passen methode; uiteraard moet men echter rekening houden met afwijkingen die soms zeer aanzienlijk kunnen zijn. Deze methode toont overeenstemming met het door Tan (1977, 1978c) gegeven voorstel om de tunnel (en dus de ingang) in gevarenklassen in te delen. Deze gedachte van een klassificatie van tunnelingangen is, voorlopig als werkhypothese, overgenomen door de CIE Technische Commissie TC-4.6 (Werkgroep Tunnels). Over het criterium voor klassificatie heeft deze werkgroep zich echter vooralsnog niet uitgelaten. Op grond van het voorgaande, en rekening houdende met de praktijkervaring, lijkt een combinatie van "gevaar" en buitenverlichting het meest in aanmerking te komen; wellicht in combinatie met de richting van het wegverloop. Men moet er echter voor blijven zorgen dat de klassificatie hanteerbaar blijft.

6.3.8. Discussie

Hierboven zijn zeven methoden beschreven waarmee de luminantie in het eerste stuk van de tunnel kan worden bepaald. De methoden van Schreuder en Narisada gaan daarbij van de veronderstelling uit dat het adaptatiedefect een belangrijke invloed heeft, terwijl de

methoden van CETU en Adrian ervan uitgaan dat het adaptatiedefect verwaarloosbaar is. Bij de methoden van Mäder en Schröter wordt daarover geen uitspraak gedaan, maar in feite komen beide erop neer dat met het adaptatiedefect niet in sterke mate behoeft te worden gerekend, tenminste, de aan de laatste twee methoden ten grondslag liggende proefnemingen zijn zo opgezet en uitgevoerd dat met een adaptatiedefect geen rekening kan worden gehouden. Eigenlijk voldoet geen van de zeven methoden geheel aan de eisen die men aan een algemeen bruikbare bepalingmethode zou mogen stellen. Ook hier is dus nog sprake van een lacune in de kennis, en dan speciaal wat betreft de generaliseerbaarheid van de resultaten, en het realisme van een aantal van de gemaakte aannamen (zie par. 8.5.1.c.). Nog eens kort samengevat:

- De methode Schreuder geldt alleen voor zeer hoge buitenluminanties; er wordt vanuit gegaan dat het adaptatiedefect van groot belang is; de bepaling van de buitenluminantie is gebaseerd op een zeer ruwe benaderingsmethode, er is een grote plaats ingeruimd aan het comfort (zowel rijcomfort als visueel comfort). Een voordeel is de eenvoud.
- De methode Mäder is gebaseerd op betrekkelijk simplistische experimenten; de buitenluminantie wordt vervangen door de wegdek-luminantie, hetgeen een ruwe benadering is; de wegdekluminantie daarentegen wordt zeer nauwkeurig bepaald (in theorie tenminste). Een voordeel is het feit dat de methode direct aan de praktijk aansluit.
- De methode van de CETU is gebaseerd op de nogal sterk aangevochten relaties zoals deze door Blackwell zijn uitgewerkt; het is een geheel analytische methode, iets dat tegenwoordig geen voordeel meer is; het feit dat de methode van Fry voor de bepaling van de verblinding is gebruikt, houdt in dat geen rekening kan worden gehouden met oogbewegingen; het is een bezwaar dat de zichtbaarheid is uitgedrukt in termen van zichtbaarheidsafstanden van objecten omdat bekend is dat deze berekeningswijze weinig nauwkeurig is onder de hier geldende omstandigheden. Een voordeel is het feit dat gemakkelijk rekening kan worden gehouden met lichtverstrooiing in de atmosfeer en aan de autoruiten.

- De methode Narisada is de meest gecompliceerde van alle. Een voordeel is dat op de juiste wijze rekening wordt gehouden met de lichtverstrooiing en de verblinding; een bezwaar is dat een niet-verdedigbare omrekeningsfactor gebruikt moet worden om het mogelijk te maken dat de resultaten van de experimenten van Schreuder in de methode kunnen worden opgenomen. Tenslotte wordt wel met het adaptatiedefect rekening gehouden, maar door het invoeren en gebruiken van het fixatiepunt is het niet duidelijk hoe ver dit "rekening houden" eigenlijk gaat.

- De methode Schröter heeft het aantrekkelijke dat ervan wordt uitgegaan dat de zichtbaarheid "goed genoeg" moet zijn, zonder naar perfectie te streven. Het bezwaar is dat dit "goed genoeg" niet op overtuigende wijze wordt gekozen. Ook wordt geen rekening gehouden met oogbewegingen.

Anderzijds heeft deze methode, net als die van Mäder, het aantrekkelijke dat gemakkelijk aansluiting wordt gevonden met de praktijk.

- De methode Adrian is theoretisch het beste onderbouwd. Om echte aansluiting te vinden met de praktijk, is een zeer grote omrekeningsfactor nodig, die de geloofwaardigheid van de methode ernstig aantast. Een tweede bezwaar is dat de methode geheel gebaseerd is (nog sterker dan de methoden van Schreuder en CETU) op de waarneembaarheid van een "kritisch" object, een object dat tamelijk willekeurig wordt gekozen. Een vrij geringe verandering in de parameters van dit object kan een aanzienlijke invloed hebben op de resultaten.

- De methode van de PIARC tenslotte is een typisch praktijkgeval. Er is gekozen voor een zeer simpele, direct uit de praktijk af te lezen bepalingsmethode voor L_1 . Rekening houdend met het feit dat de methode Schreuder nogal duur uit kan komen is gekozen voor een kleinere waarde van L_2/L_1 . Het nadeel is dat er grote afwijkingen kunnen optreden, en dat er geen mogelijkheid is na te gaan of dit het geval is of niet. Het is in feite weinig meer dan een vuistregel - met alle voor- en nadelen daarvan.

Als conclusie kan men dus rustig stellen dat er momenteel geen methode beschikbaar is die geheel bevredigt, maar dat het te verwachten is dat een dergelijke bevredigende methode op te stellen is, mede gebaseerd op elementen van de hierboven genoemde (zeven) methoden.

7. OVERIGE ASPECTEN

7.1. Inleiding

In de in Hoofdstuk 3 gegeven probleemstelling zijn behalve de twee hoofdpunten waarover in de voorafgaande paragrafen in detail is gesproken, nog twee "ermees samenhangende" problemen aangegeven, die echter niet rechtstreeks met de ingang van de tunnel samenhangen. Deze betreffen de eisen te stellen aan de verlichting van de overgangszone en het interieur van tunnels. Voorts zijn op verschillende plaatsen in het voorafgaande problemen aangesneden die met de invloed van daglicht te maken hebben. Al deze punten worden hierna kort besproken. Ook zijn enige opmerkingen toegevoegd over de zgn. tegenstraalverlichting.

7.2. Daglicht in tunnels

Bij de hierboven gegeven overwegingen betreffende de waarneembaarheid van objecten zijn we er van uitgegaan dat deze objecten meestal als een donker silhouet afsteken tegen de lichte (lichtere) achtergrond, en zo een "negatief" contrast vormen. Dit blijkt als regel wel op te gaan. Een uitzondering vormt de situatie zoals die zich vlak bij het begin van de tunnel kan voordoen. Tengevolge van het daglicht dat de tunnel binnenvalt kan de verticale verlichtingssterkte op het voorvlak van zulke objecten zo hoog worden dat ze als een licht voorwerp afsteken tegen de donkere (donkerder) achtergrond in de tunnel. Deze achtergrond is dan meestal tamelijk donker omdat ze ver in de tunnel ligt.

In Figuur 36 zijn een aantal metingen samengevat van de horizontale en verticale verlichtingssterkte. Uit deze figuur blijkt dat de bijdrage van de horizontale verlichtingssterkte slechts gering is: na 20 m is nog maar 0,1% over van de verlichtingssterkte in het open veld. Wat betreft de luminantie van wanden en wegdek in de tunnel is de bijdrage even gering of nog geringer, omdat de wanden en het wegdek als regel enigszins spiegelen.

Wat betreft de uitgang kan de bijdrage anders zijn. Vooral wanneer

de oppervlakken van wanden en wegdekken spiegelen, kan ondanks de lage verlichtingssterkte de luminantie zeer hoog worden. Systematische metingen zijn niet uitgevoerd, maar het effect is duidelijk te zien aan de metingen afgebeeld in Figuur 37a en b. Het is overigens nog wel de vraag of deze hoge luminantie alleen maar voordelig is. Weliswaar is de adaptatietoestand hoog en het contrast van objecten die dicht bij de uitgang in de tunnel staan, zeer hoog (deze objecten keren immers hun donkere kant toe naar de nabijkomende automobilist), maar de luminantie is vaak zeer ongelijkmatig verdeeld, en voorts kan vaak storende verblinding optreden. Waldram heeft voorgesteld om meer efficiënt gebruik te maken van het daglicht dat bij de ingang de tunnel binnenvalt, door aan de wanden panelen aan te brengen die voorzien zijn van retroreflecterende materialen. Deze krijgen dan een hoge luminantie. Die luminantie wordt immers in eerste instantie bepaald door de luminantie van de omgeving buiten, voor de tunnel, en slechts in geringe mate door de verblindingssterkte ter plaatse (Smit & Waldram, 1957; Waldram, 1962). (De werking van retroreflecterende materialen is beschreven in OECD, 1975 en Schreuder, 1980b en 1980c). Vooral gezien het laatste toepassingsgebied lijkt het gewenst om nader de lichtinval van het daglicht in de tunnel te onderzoeken (zie par. 8.5.1.b.). Daarbij kan dan, voor zover het de theoretische aspecten betreft, gebruik gemaakt worden van de studies van o.a. Hopkinson et al. (1966), Swierstra (1947), Walsh (1961), Zijl (1951), en de onderzoeken gerapporteerd in CIE-verband (zie verder o.a. Helbig, 1972; Keitz, 1967; Moon, 1961; Reeb, 1962; Wahl, 1954; Walsh, 1965; Zwicker, 1933).

Ook een andere toepassing van het daglicht in tunnels kan kort worden vermeld. Wanneer een spleet in het dak van de tunnel wordt open gelaten - dit is vaak mogelijk in tunnels onder spoorelementen - dan kan een eenvoudige en goedkope mogelijkheid worden gevonden om de problemen van zichtbaarheid te overwinnen. Uiteraard zijn er wel praktische bezwaren tegen dergelijke oplossingen, maar ze verdienen toch wel de aandacht (zie Figuur 38). Deze figuur, afkomstig van Schreuder (1964, blz. 37) is berekend aan de hand van de door Higbie (1934) gegeven formule

$$E = \frac{\Pi L}{2} (\sin \gamma_2 - \sin \gamma_1)$$

Hierin is E de verlichtingssterkte in een punt P, L de luminantie van de spleet (dus van de hemel boven de spleet) en γ_1 en γ_2 de hoeken waaronder de randen van de spleet gezien worden (zie ook Figuur 39). De resultaten stemmen redelijk overeen met metingen van Lossagk (1955) (zie ook Figuur 40, waar resultaten van recente metingen zijn opgenomen: Holten & Meulders, 1979). In Figuur 41 is de horizontale verlichtingssterkte opgegeven voor diezelfde tunnel. Het betreft hier een tunnel met een aantal van dergelijke licht-sleuven.

Tenslotte kunnen we nog wijzen op de mogelijkheid gebruik te maken van lightsleuven in de lengterichting van de tunnel. Wanneer de zon door dergelijke sleuven het wegdek kan treffen moet men rekenen met van tijd tot tijd zeer grote ongelijkmatigheid in de dwarsrichting. Systematische metingen zijn niet bekend, maar de praktijkervaringen opgedaan in de Coentunnel en tijdens de roosterproeven in de Beneluxtunnel, geven de suggestie dat onder bepaalde omstandigheden de zichtbaarheid in de tunnel onacceptabel slecht kan worden. Men moet met deze bezwaren rekening houden wanneer men overweegt dergelijke constructies toe te passen wanneer, uit overwegingen van de bestrijding van de overlast door lawaai, verzonken wegen gedeeltelijk worden afgedekt (zie bijv. Beyer, 1980, Hahn & Widman, 1980). Hahn & Widman beschrijven een aantal proefnemingen waarbij is geconstateerd dat voor een groot deel van de dag (ze geven 80% op) geen kunstlicht nodig is. Voorts maken dergelijke sleuven een ventilatie-installatie overbodig. Ook roosters blijken overigens effectief te kunnen zijn voor lawaai-bestrijding. Een ander toepassingsgebied - maar voor Nederland niet van belang - betreft de lawinebescherming. Met name in de Alpenlanden worden vaak galerijen toegepast om de weg te vrijwaren van lawines; deze galerijen zijn meestal aan één kant opzij open. Gezien de toename van het aantal gevallen waarin tunnels of tunnelachtige constructies worden toegepast ten behoeve van het bestrijden van lawaai-overlast lijkt een nadere studie over de daglichtaspecten gewenst.

7.3. Lichtroosters

In de paragrafen 6.2. en 6.3. is aangegeven wat de luminantie moet zijn (of zou moeten zijn) in het begin van de tunnel. We zullen er in dit rapport niet in detail op ingaan op welke wijze deze luminantie kan worden bereikt. Wel kan worden opgemerkt dat er in beginsel twee methoden bestaan: kunstlicht toepassen of getemperd daglicht. Het is in de eerste plaats een kwestie van kosten en van energiebeleid welke van de twee wordt gekozen. Een kostenvergelijking, geldig voor 1963, is gegeven door Schreuder (1964, blz. 43). Het is interessant om te zien hoe in die betrekkelijk korte tijd van nog geen 20 jaar de kosten (absoluut en relatief) zijn veranderd. Zo wordt voor een SOX lamp 110 lm/Watt gerekend, en voor rente 4%!

Wanneer men sterk de nadruk legt op energiebesparing (een anno 1981 zwaar wegend argument) dan heeft de toepassing van getemperd daglicht uiteraard altijd belangrijke voordelen. Als nadeel is vaak naar voren gebracht dat de lichtdoorlating van dergelijke constructies niet voldoende is om de hoge luminantievoorwaarden die in het eerste gedeelte van de tunnel nodig zijn, te kunnen bereiken (zie bijvoorbeeld Van den Bijllaardt, 1975, 1977, die zich daarbij (zonder dit overigens te vermelden) baseert op de metingen van Swart). In Figuur 42 zijn deze metingen samengevat. Vooral is duidelijk de grote variatie in de relatieve lichtdoorlating die kan optreden bij verschillende omstandigheden van zonshoogte en bewolking. Dit geldt voor open roosters; gebleken is dat gesloten constructies in het geheel niet kunnen voldoen. De lichtdoorlating van een open rooster blijkt vooral te worden bepaald door de geometrie van de roosterelementen en ook in aanzienlijke mate door de reflectie-eigenschappen van het materiaal waarvan de roosters zijn gemaakt. Een aantal metingen van Schreuder (1965) zijn weergegeven in Figuren 43 t/m 46. Uit deze metingen blijkt ondermeer dat voor de situatie zoals die zich in Nederland voordoet een rooster met verticale wanden minder lichtdoorlating mogelijk maakt dan een rooster met hellende tussenschotten. In Nederland zijn, behalve bij de Velsertunnel, steeds roosters

van onbewerkt aluminium toegepast. Het is gebleken dat de aantasting van het oppervlak van de roosters een zeer grote invloed heeft op de doorlating. Als voorbeeld hiervoor moge dienen Figuur 47.

Men kan zich daarom afvragen waarom het aluminium (nog steeds) onbewerkt wordt toegepast. Interessant is daarbij dit volgende citaat:

"Aluminium krijgt in de atmosfeer vrij snel een matgrauw uiterlijk door een oppervlakkige aantasting en wordt in agressieve atmosfeer door aanhechtend vuil en corrosieproduct op den duur vrijwel ontoonbaar. Ernstige onrust behoeft dit niet op te leveren, behalve dan dat in zeer agressieve atmosferen enige versnelde materiaalachteruitgang mogelijk is. Esthetisch is de verandering van uiterlijk echter zeer ongewenst en om dit te voorkomen wordt dan ook een oppervlaktebehandeling (anodiseren, lakken, verven) zeer veel toegepast. In verband met het hierboven vermelde, behoort een dergelijke oppervlaktebehandeling in (agressieve) maritieme en industriële atmosferen dan ook dwingend te worden voorgeschreven. Voor een blijvend gunstig resultaat van esthetische aard blijft evenwel regelmatig reinigen van het aldus behandelde aluminium noodzakelijk. Erkende firma's op het gebied van oppervlaktebehandeling en -reiniging dienen te worden ingeschakeld voor nauwkeurig advies en betrouwbare uitvoering." (Naar Boon & Breedveld, 1980, blz. 28).

Uit deze publikatie blijkt ook dat de corrosie vooral een zaak is van het uiterlijk. Dit is kennelijk, gezien de betekenis van de interreflectie, van groot belang bij lichtroosters voor tunnels. Voor constructieve aspecten speelt corrosie echter een geringe rol. Voorts blijkt dat de corrosie vooral het eerste jaar optreedt, en dat deze vooral optreedt aan de "achterkant" van platen, dus buiten bereik van regen en zon. En tenslotte blijkt dat aan klink- en lasverbindingen, mits ook van aluminium uitgevoerd, geen bijzondere eisen behoeven te worden gesteld.

Uiteraard waren er in dit onderzoek wel verschillen geconstateerd tussen verschillende aluminiumlegeringen. Er is dus kennelijk voldoende kennis beschikbaar in Nederland aangaande deze materie!

Andere metingen zijn gegeven door Schreuder (1964). Ook hier is een grote invloed van de reflectie van het materiaal van de roosterwanden te constateren (zie Figuur 48 en verder Anon, 1938; Gaymard, 1958; Hahn & Widman, 1980; Inditsky, 1975; Löwe, 1980; Monkowius, 1978; Myers, 1939; Rinalducci, 1976; Sagouit, 1966; Schreuder, 1964, 1976b). Een aantal oudere toepassingen zijn beschreven door Busson (1960), Ernens (1960), Huet (1956), Jainski (1961), Wentink (1957) en Zijl (1958).

Steeds wordt bij de opzet van het ontwerp van roosters die het licht temperen geëist dat nooit de zon er doorheen het wegdek kan treffen (de roosters moeten "zondicht" zijn). "Constructions to screen the daylight must absolutely satisfy the condition that under no circumstances whatever direct sunlight strikes the road surface below the screen" (Schreuder, 1964, blz. 33). Dit blijkt in de praktijk een zeer strenge voorwaarde te zijn. Voor een rooster met verticale wanden blijken de openingen slechts smal te mogen zijn; dit blijkt uit Figuur 49 (zie ook Swierstra, 1951, 1952). Wanneer de tussenwanden van de roosters hellend kunnen worden uitgevoerd, dan is een zekere winst te boeken, zoals uit Figuur 44 en 46 blijkt (zie ook Figuur 50). Maar wanneer de oppervlakten van de roosterplaten donker zijn (hetgeen in de praktijk meestal niet te vermijden is) dan is de totale lichtdoorlating in vele gevallen te gering. Men moet immers niet vergeten dat er ook nog steunconstructies voor het rooster nodig zijn. Bij de modelproeven is daarmee meestal geen rekening gehouden. Het is echter de vraag of het nodig is inderdaad aan deze eis van zondichtheid vast te houden. Wanneer deze eis wordt losgelaten dan is men natuurlijk bijna onbeperkt vrij om iedere doorlating te kiezen die men wil. Dan behoeft een rooster ook geen hoge wanden te hebben, zodat de interreflectie geen rol meer speelt. Dit heeft dan weer tot gevolg dat vervuiling, corrosie of meer in het algemeen de reflectie van het oppervlak van deze wanden geen invloed meer heeft.

In de Beneluxtunnel zijn momenteel proeven in uitvoering waarbij verschillende methoden worden vergeleken waarop niet-zondichte roosters kunnen worden uitgevoerd. Hoewel deze proefnemingen nog niet zijn afgesloten, bestaat wel reeds de indruk dat, mits aan bepaalde voorwaarden wordt voldaan, de eis van zondichtheid kan worden losgelaten.

Dit resultaat, en de herbezinning op de mogelijkheden van energiebesparing, doen de belangstelling voor lichtdoorlatende roosters voor tunnelingangsverlichting weer herleven (zie par. 8.5.1.d.).

7.4. Tegenstraalverlichting

Wanneer in tunnelingangen gebruik wordt gemaakt van de zgn. tegenstraling (Gegenstrahl), waarbij het licht afkomstig van de verlichtingsarmaturen tegen de rijrichting van het verkeer in wordt gestraald, worden de contrasten waarmee obstakels tegen het wegdek afsteken groter, omdat de naar de waarnemer toegekeerde voorvlakken van die obstakels min of meer in de schaduw blijven. In termen van wat hiervoor in het begin van par. 6.3. is gezegd, betekent dit dat p' veel groter wordt, zodat bij gelijke p en gelijke L_{seq} een lage waarde voor L_x gekozen kan worden. Het tegenstraalprincipe heeft nog een tweede voordeel: bij een dergelijke lichtinval reflecteren gangbare wegdekken sterker dan bij meer diffuus invallend licht - een feit bekend uit de straalverlichting - zodat bij gelijke lichtsterkte (of gelijke horizontale verlichtingssterkte, of, bij goed geconstrueerde verlichtingsarmaturen, ook bij gelijke lichtstroom) een hogere luminantie-opbrengst (luminance yield) wordt bereikt. Details hierover zijn te vinden in Anon (1973a, 1974c); Burghout (1971, 1977, 1977a); CIE (1976a); De Boer et al. (1959); Frederiksen (1972); Frederiksen & Gudum (1972); Keschull (1968); OECD (1976); Schreuder (1965d; 1967b); Sørensen & Nielsen (1974); Tooke & Hurst (1975).

Beide effecten te zamen leiden tot een economisch aantrekkelijke oplossing voor het vraagstuk van de verlichting van tunnelingangen. Bij de eerste toepassingen werd men geconfronteerd met

een aantal ongunstige neveneffecten. Men constateerde een aanzienlijke verblinding ten gevolge van de lichtbronnen; de luminantieverdeling op het wegdek was soms zeer ongelijkmatig, vooral in dwarsrichting, en dan speciaal wanneer de weg nat was, en de herkenbaarheid van de obstakels, die zich als silhouet voordoen, was verre van optimaal. In de nadere uitwerking van dit beginsel zijn deze problemen ondervangen. Moderne tunnels in Oostenrijk en Zwitserland worden dan ook meestal voorzien van een verlichtingsinstallatie die het midden houdt tussen "tegenstraal" en "conventioneel". Men noemt dit, niet ten onrechte, vaak "contrastverlichting" (zie bijv. Adrian, 1978a; Anon, 1978b; Baumann, 1980; Mäder, 1969; LITG, 1978; Prohazka, 1979; Simkovics, 1978, 1979). Een aantal gegevens van moderne tunnels zijn gegeven in Annex F.

De voor- en nadelen van het tegenstraalprincipe zijn in detail beschreven door Blaser (1981), zie ook Anon (1968, 1974d, 1975d, 1977c, 1979b, 1981a); Freiburghaus (1975); Herbst (1978); Müller & Riemenschneider (1975); Riemenschneider & Müller (1975); Schwengler (1978); Van den Bijllaardt (1981); Van Bommel & De Boer (1980); Waldram (1962); Walthert (1977). Al met al een systeem dat tenminste nadere studie en zeer waarschijnlijk, ook in Nederland, navolging verdient.

7.5. De overgangszone

De term overgangszone stamt nog uit de "tweede generatie". Immers daar is aangegeven dat de luminantie in de drempelzone constant moest zijn. Daaraan moet dan uiteraard een overgangszone aansluiten waarna de interieurzone bereikt kan worden. Omdat in de meer moderne opvattingen een aparte overgangszone niet meer nodig is (wanneer immers met het adaptatiedefect geen rekening meer gehouden hoeft te worden, zie par. 6.3.) zullen we daaraan slechts weinig aandacht besteden. Wel moet opgemerkt worden dat, ook al is een aparte overgangszone niet meer nodig, er wel voor moet worden gezorgd dat er een goede overgang moet worden bereikt tussen de luminantie aan het begin van de tunnel en die in het interieur. Het is dus voor een deel slechts een verandering in naam. De be-

langrijke verandering is echter gelegen in het feit dat het "moderne" overgangsgebied gebaseerd wordt op overwegingen van zichtbaarheid, net als de eisen die gesteld moeten worden aan de luminantie in het begin van de tunnel. Wanneer men geen rekening behoeft te houden met het adaptatiedefect, dan kunnen deze eisen ook weer worden afgeleid op basis van de betrekking $L_a = L_f + L_{seq}$ (zie par. 5.2.3.). Omtrent de overgangszone is veel minder onderzoek gedaan dan omtrent de drempelzone. Schreuder (1964) heeft metingen gedaan waarin is bepaald hoe snel de luminantie van een scherm in het gezichtsveld kan worden teruggebracht zonder dat hinder ontstond door nabeelden; een comforteis derhalve. Bij deze proeven bleek dat ook een klein object met 7% contrast nog zichtbaar bleef (Schreuder, 1964, blz. 84). Mäder & Fuchs (1966) hebben dergelijke proeven gedaan, en ook Kabayama (1963). Bij de laatste twee is een (niet precies omschreven) visuele taak als criterium gebruikt, zodat die proeven als zichtbaarheidsproeven kunnen worden beschouwd. Schreuder (1968) heeft deze drie groepen van waarnemingen vergeleken, en geconcludeerd dat het verschil ertussen niet groot is (zie Figuur 51). Schreuder (1964, blz. 83-84) heeft ook nog over andere experimenten gerapporteerd. Het bleek dat een plotselinge overgang van 3 op 1 voor alle waarnemers acceptabel was wat betreft de hinder door nabeelden; een overgang van 6 op 1 werd nog door driekwart van de waarnemers getolereerd, terwijl een overgang van 10 op 1 nog voor éénderde acceptabel was (zie Figuur 52). Tenslotte werd bepaald hoe lang het duurde voordat, na een plotselinge overgang van 8000 cd/m^2 naar 13 cd/m^2 , naar het oordeel van de waarnemers de hinder door nabeelden verdwenen was. Hier blijkt dat 10 seconden voor de helft van de waarnemers voldoende is, en 15 seconden voor ongeveer driekwart (zie Figuur 53 en ook Schreuder, 1964, blz. 87-88).

7.6. Het interieur

De verlichting van het interieur van de tunnels is, zoals gezegd, vroeger de belangrijkste vraag geweest; meer recentelijk is echter de aandacht verlegd naar de verlichting van de ingang. Dit is te

begrijpen omdat gedurende vele jaren vrijwel alle tunnels niet meer dan een paar honderd meter, hoogstens een kilometer lang waren. Met een ingangsverlichting die 150 à 250 m van de tunnel besloeg was er slechts een beperkte lengte voor het "interieur", zodat het financieel niets uithaalt veel aandacht daaraan te besteden. Men hield meestal de door de CIE aanbevolen waarde van 10 à 15 cd/m² aan. Dit geldt voor de Nederlandse tunnels zoals de Coentunnel (Griffioen, 1966), de IJtunnel (Schreuder, 1972b), de Velsertunnel (Zijl, 1958), de Benelux- en de Heijenoordtunnels (Anon, 1967a). Ook in het buitenland werden dergelijke waarden vaak aangehouden. Maar veel van de interesse ging uit naar de verkeersregeling en de akoestiek, en minder naar de verlichting (zie bijv. Herbert, 1975; Jahnke & Müller, 1980; Janoff, 1977; O'Reilly & Munton, (geen jaartal); Schönleiter & Heymann, 1980; Thompson et al., 1972; Van Dalen, 1980; Woodhouse, 1971).

De laatste jaren is daar verandering in gekomen. Ten eerste zijn de tunnels in gebruik genomen die ontworpen zijn in de tijd dat de energie nog ruim beschikbaar was (zoals men tenminste dacht) zodat hoge niveaus geïnstalleerd waren. Dit is vooral gebeurd in middenlange of vrij korte tunnels met zeer hoge verkeersbelasting. Voorbeelden zijn beschreven in Anon (1979, 1980g); Fritschy (1961) (de spoortunnel in Nijmegen - de eerste van de vele tunnels met de zeer hoge niveaus); Hughes & Roberts (1980); Ruhfuss (1979) beschreef een tunnel in München waar de ingangsverlichting 3700 lux bedraagt, maar de doorgaande verlichting overdag slechts 150 lux en Van den Bijllaardt (1975, 1977) die de Vlaketunnel in Zeeland beschrijft, een tunnel die opvallend is door het zeer hoge niveau bij de ingang: de nieuwwaarde is 8300 lux, wegens de totale lengte van slechts 328 m is er nauwelijks een doorgaande verlichting; toch is deze tunnel door de grote verticale kromming zeker niet als "kort" te beschouwen.

Een tweede verandering is te vinden in het gereedkomen van een aantal zeer lange tunnels, meestal in Alpenlanden. We noemen de Arlbergtunnel (Demetz, 1978, 1979; Widmer, 1980; Wiesner, 1979; Wimmer, 1979) die in gebruikstoestand meestal niet meer dan 2 cd/m² heeft in het interieur bij een totale lengte van bijna 14 km; de

ruim 8 km lange Gleinalmtunnel, ook in Oostenrijk (Prochazka, 1979). Voorts de ruim 16 km lange Gotthardt-tunnel in Zwitserland (Anon, 1977, 1980c, e; Baumann, 1980a) met een interieurverlichting van maximaal $4,5 \text{ cd/m}^2$ en de ruim 9 km lange Seelisbergtunnel (Baumann, 1980). In Duitsland vindt men de Elbetunnel van ruim 3 km lang (Anon, 1975a; Scholz, 1974), in Frankrijk de opnieuw verlichte 11,6 km lange Mont Blanc-tunnel (Anon, 1979a) en de bijna 13 km lange tunnel bij Fréjus die een doorgaande verlichting heeft van 50 lux (Lévy, 1980) en de tunnels van Epine (3200 m) en Dublin (1600 m) (Moirin, 1979). Tenslotte noemen we nog de tunnel onder het Suezkanaal van ruim 4 km lang (Anon, 1980f, 1981b).

Er zijn een aantal studies verschenen waarin methoden beschreven zijn om de luminantie (soms ook alleen de verlichtingssterkte) in het interieur van een tunnel te berekenen (zie Einhorn, 1975; Gudum & Vestergaard, 1971; Harris, 1956; Herbst, 1978; Hopfwieser, 1977; Janoff, 1975; Kalberlah, 1970; Roch, 1958; Roddewig & Stockmar, 1977; Stockmar & Thygs, 1980; Thum, 1952; Walthert, 1977). Soms zijn deze methoden theoretisch van belang, maar voor de praktijk lijkt het erop dat men wel met eenvoudige benaderingen, gebaseerd op metingen in bestaande tunnels, kan volstaan.

Tenslotte nog een punt dat van belang is bij het verlichten van het interieur van met name lange tunnels. Dit betreft de zgn. flikker-effecten. Wanneer de lichtbronnen van elkaar zijn gescheiden, en dus niet in de ononderbroken rij zijn aangebracht, dan zullen bij het doorrijden lichtflikkeringen optreden. Algemeen kunnen die hinder opleveren (Anon, 1979d; Jantzen, 1960; Schreuder, 1964). Deze storing hangt allereerst af van de frequentie van de lichtflitsen, verder van de licht-donkerverhouding, van zgn. modulatie-diepte en van de steilheid van de krommen (zie bijv. Bartley & Nelson, 1961; Collins, 1956; Collins & Hopkinson, 1957; De Lange, 1957; Kelly, 1961). Uit de metingen van Schreuder (1964) en ook uit die van Jantzen (1960) is gebleken dat wanneer een frequentiegebied tussen ca 2,5 en 14 Hz wordt vermeden, de hinder meestal gering is.

Ofschoon bekend is dat er een duidelijke relatie bestaat tussen lichtflitsen - vooral periodieke lichtflitsen - en epilepsie, met

name de fotosensitieve epilepsie, kan men op grond van uitgebreide studies rustig aannemen dat men bij de verlichting van tunnels geen rekening hiermee behoeft te houden - dit in tegenstelling tot wat wel eens wordt beweerd in de populaire pers. Zo heeft men wel geschreven over de "psychedelische verlichting" van de Velsertunnel - een verlichting die, voordat ze werd gewijzigd, wel degelijk hinderlijk kon zijn. Voor het hier bedoelde onderzoek wordt verwezen naar Anon (1980j); Binnie (1980); Binnie et al. (1979); Harding (1980); Harding et al. (1978); Hess et al. (1974); Jeavons et al. (zonder jaar); Wilkins et al. (1979).

7.7. Korte tunnels

De verlichting van korte tunnels valt eigenlijk buiten het bestek van dit rapport. We noemen het hier alleen om erop te wijzen dat de verlichting van korte tunnels niet alleen een geheel aparte verzameling problemen oproept, zoals reeds in par. 2.3. is aangeduid, maar dat ook deze problemen, vooral voor zover het de zichtbaarheid van objecten in de tunnel betreft, van zeer aanzienlijke aard zijn. En tenslotte komen korte tunnels veel voor, zowel binnen als buiten de bebouwde kom. Al met al voldoende reden om intensief de problemen bij de verlichting van korte tunnels te bestuderen (zie par. 8.5.1.e.).

Deze studie zal het gehele probleem dienen te omvatten, en bovendien bijna "van voren af aan" dienen te beginnen, omdat er tot nu toe slechts weinig onderzoek op dit gebied is gedaan (zie bijv. Jainski & Hochstädt, 1974; Narisada & Yoshikawa, 1975; Schreuder, 1964, 1965b; Springer & Labrie, 1977; Trapp, 1980).

8. ONBEANTWOORDE VRAGEN

8.1. Inleiding

In de voorafgaande hoofdstukken is een groot aantal vragen naar voren gekomen, waarvan een gedeelte beantwoord kon worden. Andere vragen zijn echter onbeantwoord gebleven. Uit deze vragen zal een onderzoekprogramma afgeleid moeten worden aan de hand van een prioriteitstelling. Deze prioriteitstelling is deels gebaseerd op de overwegingen zoals ze in deze studie zijn gegeven, maar ook voor een belangrijk gedeelte op geheel andere overwegingen (voor onderzoek beschikbare financiële en personele middelen enz.). Deze overwegingen liggen buiten het bereik van deze studie, en daarom zullen we er niet verder op ingaan, maar volstaan met te herhalen dat eigenlijk een goede prioriteitstelling alleen geleverd kan worden aan de hand van kosten/batenanalyse.

In dit rapport wordt volstaan met een opsomming te geven van de problemen die in de behandeling naar voren zijn gekomen, en die niet in de behandeling zelf beantwoord konden worden. Een aanduiding van het relatieve belang van de vragen blijft achterwege; dit zou eigenlijk al een soort van prioriteitstelling zijn. We geven dus alleen een inventarisatie, die, voor de overzichtelijkheid is gerubriceerd naar gezichtspunten die met het eventueel te ondernemen onderzoek samenhangen. Deze gezichtspunten zijn: psychologische, fysiologische, verkeerskundige en praktische.

8.2. Psychologische gezichtspunten

8.2.1. Comfort

- a) de relatie tussen waarnemingszekerheid, visueel zoekgedrag en comfort (par. 1.2.);
- b) de relatie tussen subjectieve veiligheid, burgerlijke veiligheid, comfort en verlichting, toegespitst op tunnels (par. 1.2.);
- c) het eventuele belang van de psychologische verblinding bij de verlichting van tunnels (par. 5.2.2.);

d) de mogelijkheden om door de vormgeving te bereiken dat de blikrichting en de aandacht meer op de tunnelingang worden gericht (par. 5.2.4.).

8.2.2. Rijtaak

a) de visueel kritische aspecten van de rijtaak, met name het waarnemen van de eigen positie op de weg en het waarnemen en beoordelen van bochten, posities van andere verkeersdeelnemers enz. toegespitst op de situaties bij tunnels (par. 5.1.2.).

8.3. Fysiologische gezichtspunten

8.3.1. De adaptatie

- a) de mogelijkheid om de adaptatietoestand in niet-evenwichtstoestanden te bepalen door middel van de meting van de drempelwaarde van de waarneming van (bijv. puntvormige) lichtbronnen (par. 5.2.4.);
- b) nader inzicht in de fysiologische verschijnselen die met de adaptatie samenhangen (par. 5.3.2.);
- c) de mogelijkheid om de bepaling van de adaptatie zoals in deze paragraaf aangeduid, toe te passen op de rechtstreekse bepaling van het adaptatiedefect (par. 5.3.3.);
- d) het gebrek aan overeenstemming tussen de "equivalent background"-hypothese en de metingen van Narisada c.s. (par. 5.3.3.);
- e) de verschijnselen die leiden tot speciale hinder bij zeer hoge luminantie in het gezichtsveld, en de relatie tussen de hinder en de afmetingen (omvang) van dat heldere gezichtsveld (par. 5.3.3.);
- f) het verschil tussen de fysiologische verschijnselen en de praktijkervaring wat betreft de mate waarin het gebied waarbij met het adaptatiedefect gerekend moet worden, naar lage waarden van de luminantie is begrensd (par. 5.3.3.);
- g) de rol die eventuele "afweermechanismen" spelen bij de ervaringen die optreden bij confrontatie met zeer hoge luminanties (par. 5.3.3.);
- h) de praktische betekenis van de waarde van 3000 cd/m^2 als de grens waaronder geen rekening behoeft te worden gehouden met het adaptatiedefect (par. 5.3.3.);

j) het toelaatbare verloop in de luminantie om de adaptatietoestand van 3000 cd/m^2 te bereiken zonder dat storing tengevolge van het adaptatiedefect optreedt (par. 5.3.3.).

8.3.2. Verblindingsverschijnselen

- a) de bruikbaarheid van alternatieve formules voor het bepalen van de verblinding, en met name de mate waarin de formules bruikbaar zijn voor grote verblindende lichtbronnen (additiviteit en integreerbaarheid) (par. 5.2.2.);
- b) patronen van oogbewegingen van bestuurders van auto's met name in de buurt van tunnelingangen (par. 5.2.4.);
- c) calibrering van de "glare lens" volgens Fry et al. met name voor de situatie zoals die zich bij tunnelingangen voordoen (par. 5.2.4.).

8.4. Verkeerskundige gezichtspunten

8.4.1. Het standaardobject

- a) de waarde van het contrast van objecten die in tunnels kunnen voorkomen en die kritisch kunnen zijn ten aanzien van de visuele aspecten van de rijtaak met name in tunnels (par. 5.1.2.);
- b) de remvertragingen die kunnen optreden in normaal verkeer, met name in normaal fileverkeer, en dan toegespitst op de situatie zoals die zich in de buurt van tunnelingangen kan voordoen (par. 5.1.3.).

8.4.2. Indeling van tunnels

- a) een duidelijke en eenduidige methode om tunnels in te delen naar aanleiding van hun lengte (hoofdst. 2);
- b) een methode om tunnels in te delen met als criterium de mate van gevaar die zij kunnen bieden voor het verkeer (hoofdst. 2 en par. 6.3.).

8.4.3. Lichtverstrooiing

- a) de samenhang tussen de grootte van de lichtverstrooiing en de mate waarin autoruiten vuil en/of beschadigd zijn (par. 5.2.2.);
- b) de samenhang tussen lichtverstrooiing en de atmosferische toestand met name dicht bij tunnels (par. 5.2.2.).

8.5. Praktische gezichtspunten

8.5.1. Algemene punten

- a) de samenhang tussen het "zwarte raam" bij korte tunnels en de zichtomstandigheden (hoofdst. 2);
- b) de invloed van het daglicht dat de tunnels binnenvalt vanaf de ingang (hoofdst. 2 en par. 7.2.);
- c) een eenvoudig toe te passen, algemeen geldige methode voor de bepaling van de luminantie in het begin van de tunnel, een methode die gebaseerd is op goed controleerbare, realistische aannamen (par. 6.3.);
- d) de mate waarin lichtroosters zondicht moeten zijn (par. 7.3.);
- e) de verlichting van korte tunnels, en de bijdrage die geleverd kan worden door het toepassen van een (door daglicht of kunstlicht verschaffen) heldere dwarsbaan (par. 7.7.).

8.5.2. Lichttechnische gezichtspunten

- a) het relatieve visuele belang van wanden en wegdekken in tunnels, in het bijzonder wat betreft hun luminantie (par. 6.3.);
- b) de bijdrage van de luminantie van het wegdek bij de luminantie in de tunnel (L_x , par. 6.3.).

DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN

Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels

Deel II: Tabellen, Figuren, Annexen, Bibliografie

R-81-26 II

Dr.ir. D.A. Schreuder

Voorburg, 1981

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

TABELLEN 1 t/m 3

bij

DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN

Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels

INHOUD

Table 1. Remweg (m) bij verschillende snelheden v (m/s), stop-tijden (s) en remvertragingen (m/s^2).

Table 2. Minimum stopping sight distance. (Source: Baerwald (ed.), 1965, p. 30).

Table 3. Practical threshold values in different luminance levels (cd/m^2). (Source: Adrian, 1980).

a	v = 10 m/s (36 km/h)					v = 15 m/s (54 km/h)				
	t = 1	2	3	6	10	1	2	3	6	10
1	60	70	80	110	150	127	142	157	202	262
1,5	43	53	63	93	133	90	105	120	165	225
2	35	45	55	85	125	71	86	101	146	206
3	26	36	46	76	116	52	67	82	127	187
4	22,5	32,5	42,5	72,5	112,5	43	58	73	118	178
5	20	30	40	70	110	37	52	67	112	172
6	18	28	38	68	108	34	49	64	109	169
8	16	26	36	66	106	29	44	59	104	164

a	v = 20 m/s (72 km/h)					v = 30 m/s (108 km/h)				
	t = 1	2	3	6	10	1	2	3	6	10
1	220	240	260	320	400	480	510	540	630	750
1,5	153	173	193	253	333	330	360	390	480	600
2	120	140	160	220	300	255	285	315	405	525
3	87	107	127	187	267	180	210	240	330	450
4	70	90	110	170	250	142	172	202	292	412
5	60	80	100	160	240	120	150	180	270	390
6	53	73	93	153	233	105	135	165	255	375
8	45	65	85	145	225	86	116	146	236	356

Table 1. Remweg (m) bij verschillende snelheden v (m/s), stoptijden (s) en remvertragingen (m/s^2).

Operating speed (mph)	Pavement condition					
	Wet			Dry		
	Perception -reaction distance (ft)	Braking distance (ft)	Total distance (ft)	Perception -reaction distance (ft)	Braking distance (ft)	Total distance (ft)
30	110	86	196	110	43	159
40	148	167	315	148	89	237
50	183	278	461	183	144	327
60	220	414	634	220	214	434
70	258	583	841	258	298	556

Source: Policy on Geometric Design of Rural Highways, American Association of State Highway Officials, Washington, D.C., 1954, p. 115 (slightly modified to indicate distances for operating speed rather than design speed).

Table 2. Minimum stopping sight distance. (Source: Baerwald (ed.), 1965, p. 30).

Object size $\alpha = 10'$	L_2	$\Delta L_{t=\infty}$	$\Delta L_{t=0.1}$	$C_{t=0.1}$
	50	1.2043	2.483	0.1986
	80	1.836	3.764	0.1882
	100	2.25	4.60	0.184
	200	4.288	8.714	0.1743
	300	6.303	12.77	0.1702
	400	8.311	16.805	0.1680
	500	10.315	20.832	0.1666
	600	12.320	24.856	0.1657

Tabel 3. Practical threshold values in different luminance levels (cd/m^2). (Source: Adrian, 1980).

FIGUREN 1 t/m 53

bij

DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN

Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels

INHOUD

Figure 1.a. Van Aerssen tunnel, Rotterdam, Netherlands. (Source: Schreuder, 1964, plate 10).

Figure 1.b. Tunnel Bezuidenhoutseweg, Eindhoven, Netherlands. (Source: Schreuder, 1964, plate 8).

Figure 2. Example of a tunnel regarded as short from one side (a) and long from the other (b). (Source: Schreuder, 1964, plate 5a + b).

Figure 3. The relation between the length of the tunnel and the size of the obstacle that may disappear.

Figure 4. A curve in the tunnel results in a wide "black frame".

Figure 5. The width and the cross-wise profile of the tunnel influence the visibility.

Figure 6. Some tunnels must be classified as "long tunnels" in spite of the fact that the exit is visible.

Figure 7. Course of the luminance in the entrance zone in diagram form. Figure 5: see Schreuder, 1964, p. 14. (Source: Schreuder, 1964, p. 50).

Figure 8. Terminology regarding the stopping time and its derivatives. (Source: NNI, 1970).

Figure 9. Terminology regarding the stopping distance and its derivatives. (Source: NNI, 1970).

Figure 10. Percentage of vehicles capable of a given or greater deceleration. (Source: Baerwald (ed.), 1965, p. 29).

Figure 11. Frequency distribution of braking decelerations puts most stops below 0.3 g, but there is still a significant 0.1% above $\frac{1}{2}$ g. (Source: Mortimer, 1971a).

Figure 12. The cumulative distribution of the fraction of the light entering the eye that falls within a circle (expressed in degrees, radians and minutes of arc). Parameter is the diameter (in mm) of the pupil. (Source: Vos et al., 1975).

Figure 13. Percentage of fixation by location as a function of experience for a novice driver (open driving - 50 mph) (after Mourant & Rockwell, 1970a, fig. 3). (Source: Schreuder, 1975).

Figure 14. Sample of data from ciné film record. The ordinates represent on an arbitrary scale the displacement of the centre of attraction of the observer's eyes in relation to the centre of the tunnel mouth. Curve D_R shows the variation of the apparent right half-width, curve D_L the apparent left half-width, and D_H the apparent height of the tunnel entrance as seen by the observer during approach. (Source: Narisada & Yoshikawa, 1974).

Figure 15. Cumulative frequency distribution of the fixation distance obtained from direct observations. The ordinate shows the percentage of cases in which the observers started to concentrate their visual attention on the tunnel entrance at a distance on the access road greater than that indicated on the abscissa. (Source: Narisada & Yoshikawa, 1974).

Figure 16. Comparison of the average luminance in the measuring field of 2×10^0 ; measured at the access zone of actual tunnels (L_0) and the equivalent luminance (L_1) of the standard field. (Source: Narisada & Yoshimura, 1977).

N.B. L_1 and L_0 are here used in a different way as compared with the text.

Figure 17. Visibility level increases for a given object as the luminance increases and threshold decreases. (Source: IERI, 1979).

Figure 18. The RCS-function changes with the object being seen at various distances (expressed in degrees) off the line of sight. (Source: IERI, 1979).

Figure 19. Meshing of ogives from simulated tasks of two field researchers (Westen, and Boynton and Boss) with Blackwell laboratory Landolt-ring ogives. (Source: IERI, 1979).

Figure 20. Influence of variations of the pre-adaptation time τ on the adaptation time t . (Source: Schreuder, 1964, p. 88).

Figure 21. Influence of variations in the starting level L_b of the luminance on the adaptation time t for different values of L_b/L_e ; L_e being end value of luminance. (Source: Schreuder, 1964, p. 90).

Figure 22. Proportion of pigment in the bleached state as a function of the adapting intensity at equilibrium (i.e., when the subject has been exposed to the adapting light for a long time) (After Rushton, 1963). (Source: Cornsweet, 1970).

Figure 23. The relation between the concentration (s) of cone pigment and light adaptation time for different values of the illuminance E.

Figure 24. The relation between required increase in contrast ($\log \phi$) and the ratio between the luminances at the beginning B_1 , and the end B_2 of the transition. Parameter is B_1 , resp. B_2 .

Figure 25. The relation between the adaptation time (in s) and the minimum value of the contrast that stays visible ("Sofort-Kontrast") for a sudden transition from B_1 to B_2 for various values of B_1 and B_2 (After Sewig, 1932).

Figure 26. Relationship between L_1 and L_2 for an object of 7' with a contrast of 20% to be visible in 75% of cases when it is displayed for 0,1 s ($L_3 < L_2 < L_1$). (Source: Schreuder, 1964, p. 8).

Figure 27. Vergleich zwischen Empfehlungen zur Vermeidung von Induktionsproblemen bei Tunnelleinfahrten: Minimalwert L_2 der Leuchtdichte im Tunnelleingang in Abhängigkeit der Aussenleuchtdichte L_1 .

Kurve 1: nach Mäder & Fuchs, 1966. Gleichung 2 (Kontrastwert ist nicht angegeben).

Kurve 2: nach Schreuder, 1964, p. 8. (Sehe auch Figure 26).

Figure 28. Comparison of data obtained by Schreuder with those of Narisada et al. (Source: CIE, 1981).

Figure 29. Relationship between the outer luminance L_1 and the minimum luminance L_2 in the tunnel for different values of the contrast C. o Group 1; x Group 2; Δ Group 4. (Source: Schreuder, 1964, p. 77).

Figure 30. Required luminance values in a tunnel according to the system proposed in France. Outside luminance 1000 cd/m^2 , contrast of object 0,2 for two values of the required visibility distance (100 m and 120 m). (Source: Dubuisson, 1978).

Figure 31. The relationship between the adaptation luminance L_{af} and the equivalent veiling luminance $L_{säq}$, and their variations (ΔL_{af} and $\Delta L_{säq}$) for threshold visibility, in the way these values are applied in the system proposed by Narisada. (Source: Van de Bijllaart & Narisada, 1980).

Figure 32. Veiling luminances (L_s)_{eq} caused by the environmental luminance of the tunnel entrances. $C = \Delta L/L$, contrast of object to remain visible ($C_{red} = 0.2$). (Source: Adrian, 1976).

Figure 33. Relationship between calculated luminance difference threshold and luminance of the inner field. (Source: Adrian & Eberbach, 1969).

Figure 34. The relation between the equivalent veiling luminance L_{seq} and the luminance in the threshold zone L_2 for different values of the threshold contrast (dashed lines, see also Figure 32) and of the subjective appraisal of the tunnel entrance situation (drawn lines). The values go from 1 (very bad) to 9 (excellent). (Source: Adrian, 1980).

Figure 35. L_{sp} -values to be considered. (Source: PIARC, 1979).

Figure 36. Penetration of daylight. Horizontal and vertical illumination in % with horizontal illumination outside = 100%. d = distance to tunnel entrance. The graphs are constructed partly from calculated, partly from measured values. (Source: Schreuder, 1964, p. 38).

Figure 37. Diagrams of traffic situations (a) and measuring results (b). (Source: Schreuder, 1964, p. 63).

Figure 38. Transmission of daylight slits. W = width of slit. Illumination outside 100% ($W = \infty$). (Source: Schreuder, 1964, p. 37).

Figure 39. Determining the transmission of daylight slits. (After Higbie, 1934, pp. 158-159). L = luminous plane. (Source: Schreuder, 1964, p. 36).

Figure 40. Verloop van de wegdek luminantie in een onderdoorgang, bepaald met een meetveld van $2 \times 4,5$ m. $\bar{L}_{wegdek} = 220 \text{ cd/m}^2$. (Source: Holten & Meulders, 1979).

Figure 41. Lichtmeting tunnel Kruislaan, Amsterdam, in langsprofiel. E_{hor} buiten = 55.000 lux. (Source: Swart, 1979).

Figure 42. Top figure: the transmission for different screen constructions in relation to the outdoor illuminance (E_{hor}). Bottom figure: the relation between the horizontal illuminance on top of the screen and on the road under the screen. In both figures the hatched areas indicate the variation within the values measured in practice. (Source: Swart, 1979).

Figure 43. Formen der untersuchten Rasterelementen. (Source: Schreuder, 1965).

Figure 44. Lichtdurchlässigkeit τ eines "geraden" Rasters (Sehe Figure 43.a.) mit Öffnungswinkel α und relativer Höhe h/s . Die voll ausgezogene Linie gibt die Grenze des "sonnendichten" Gebietes an. Gultig für 52° N.Br. und eine Wandreflexion $\rho = 0.78$. (Source: Schreuder, 1965).

Figure 45. Zusammenhang zwischen Lichtdurchlässigkeit τ eine geraden, sonnendichter Rasters und der Wandreflexion ρ in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel α (h/s variabel). (Source: Schreuder, 1965).

Figure 46. Lichtdurchlässigkeit τ eines "schrägen" Rasters (Sehe Figure 43.b.), Neigungswinkel γ und der Form c/b der auf die Basis projizierten Öffnung $\rho = 0.78$. (Source: Schreuder, 1965).

Figure 47. Vergelijking tussen de lichtdoorlaat van een nieuw en een geoxideerd ruitvormig recht rooster (bij helder blauwe hemel). (Source: Anon, 1972c).

Figure 48. Relationship between transmission τ and height h of grids. (Source: Schreuder, 1964, p. 35).

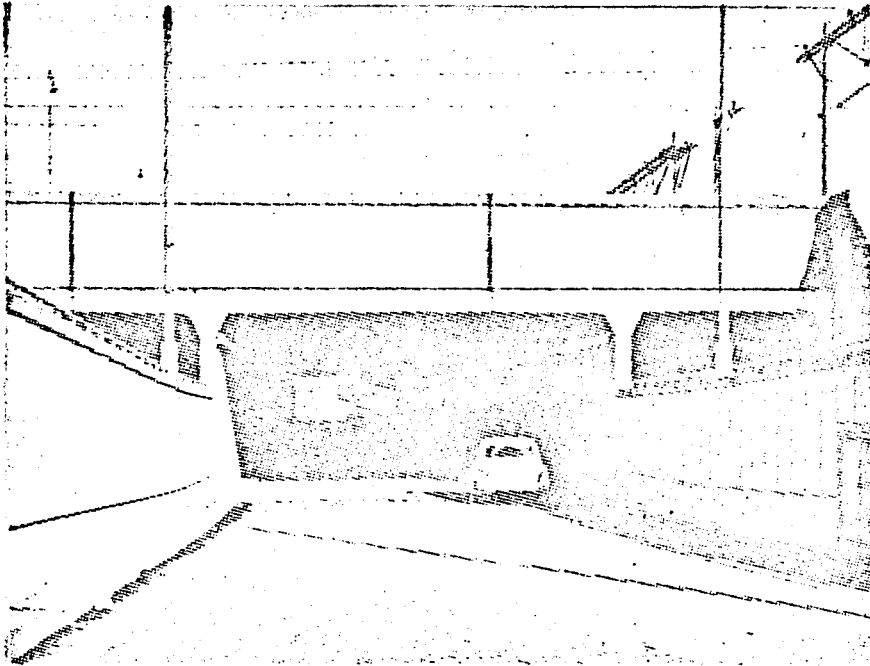
Figure 49. Diagram of solar altitudes. ϵ = maximum elevation of the sun; d = width of grid opening for height $h = 1$; ($\cotg. \epsilon$). Diagram is valid for June 21th at 52° Latitude Norht. (After Swierstra, 1951, 1952). (Source: Schreuder, 1964, p. 34).

Figure 50. Vergelijking tussen de lichtdoorlaat van een nieuw ruitvormig schuin en een geoxideerd ruitvormig recht rooster (bij helder blauwe hemel). (Source: Anon, 1972c).

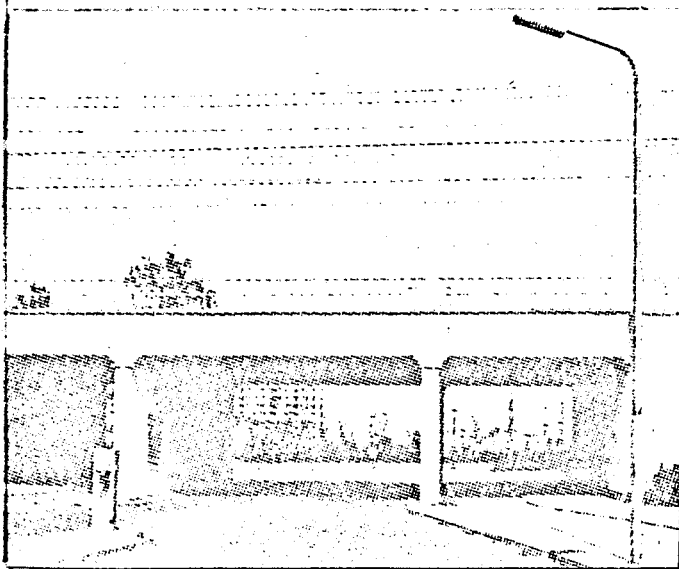
Figure 51. The relation between the luminance of a screen that is still accepted by observers and the adaptation time. The luminance of the beginning (L_0) of the experiments is taken as 100%. (Source: Schreuder, 1968).

Figure 52. Evaluating a sudden luminance transition. p = percentage of transitions found acceptable; L_b = beginning value; L_2 = end value of luminance. (Source: Schreuder, 1964, p. 84).

Figure 53. Cumulative frequency distribution of the adaptation times. x = Group 2; o = Group 3. (Source: Schreuder, 1964, p. 87).



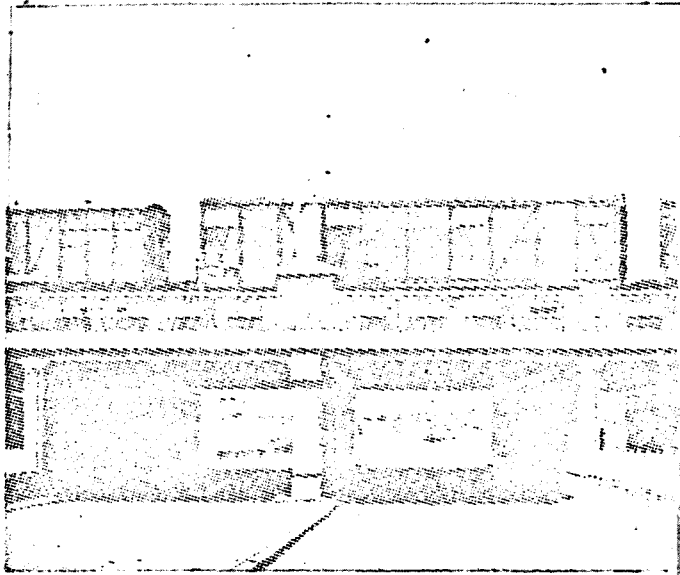
a



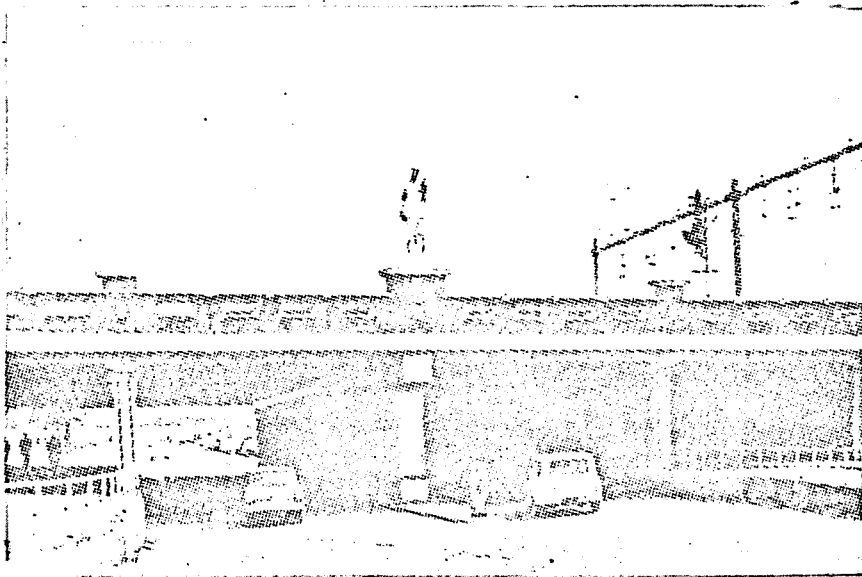
b

Figure 1.a. Van Aerssen tunnel, Rotterdam, Netherlands. (Source: Schreuder, 1964, plate 10).

Figure 1.b. Tunnel Bezuidenhoutseweg, Eindhoven, Netherlands. (Source: Schreuder, 1964, plate 8).



a



b

Figure 2. Example of a tunnel regarded as short from one side (a) and long from the other (b). (Source: Schreuder, 1964, plate 5a + b).

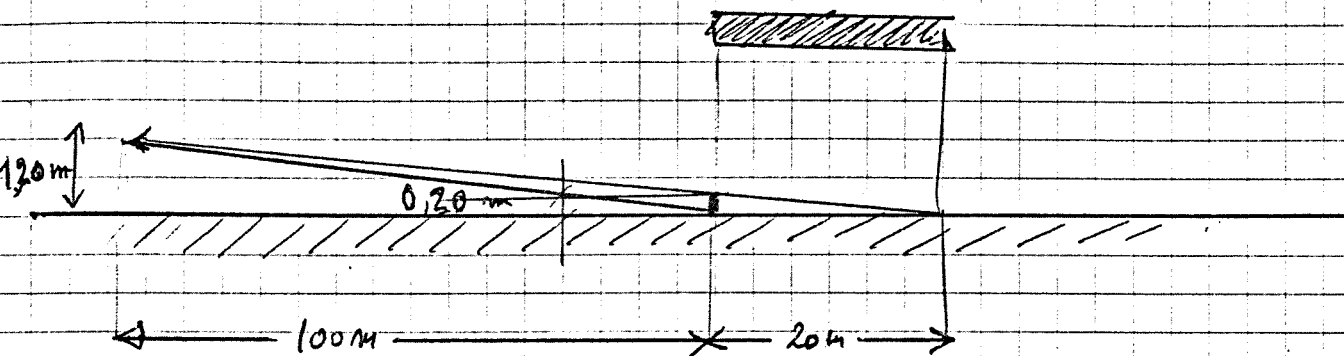


Figure 3. The relation between the length of the tunnel and the size of the obstacle that may disappear.

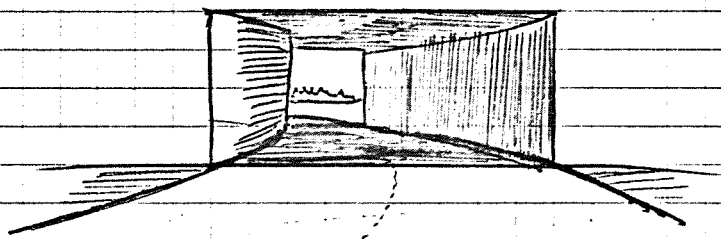


Figure 4. A curve in the tunnel results in a wide "black frame".

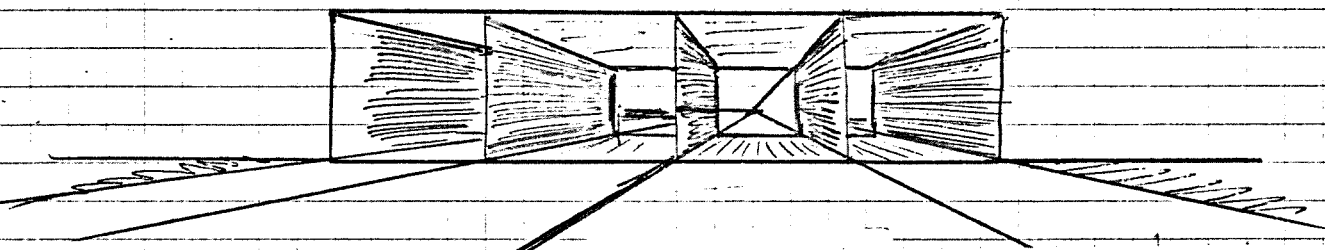


Figure 5. The width and the cross-wise profile of the tunnel influence the visibility.

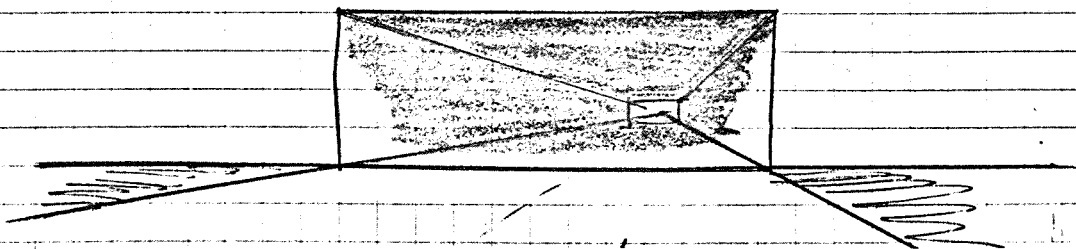
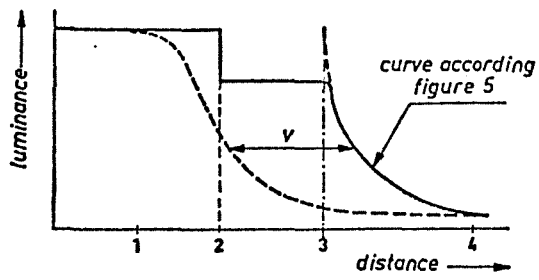


Figure 6. Some tunnels must be classified as "long tunnels" in spite of the fact that the exit is visible.



- 1 = adaptation point;
- 2 = tunnel entrance; beginning of threshold zone;
- 3 = end of threshold zone;
- 4 = beginning of interior.

Figure 7. Course of the luminance in the entrance zone in diagram form. Figure 5: see Schreuder, 1964, p. 14. (Source: Schreuder, 1964, p. 50).

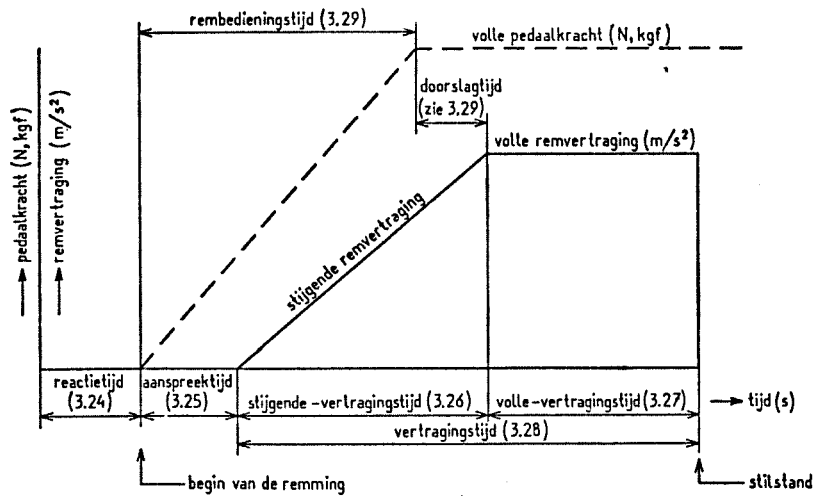


Figure 8. Terminology regarding the stopping time and its derivatives. (Source: NNI, 1970).

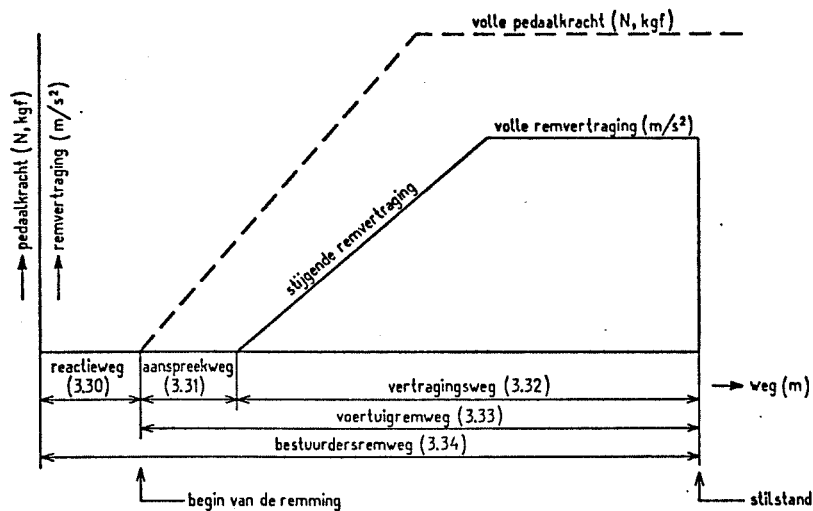


Figure 9. Terminology regarding the stopping distance and its derivatives. (Source: NNI, 1970).

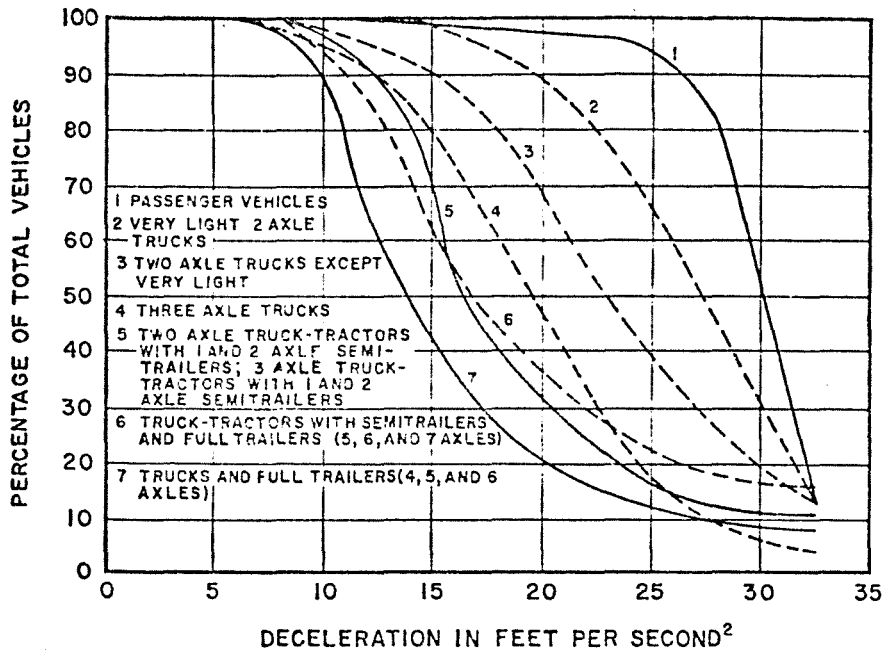


Figure 10. Percentage of vehicles capable of a given or greater deceleration. (Source: Baerwald (ed.), 1965, p. 29).

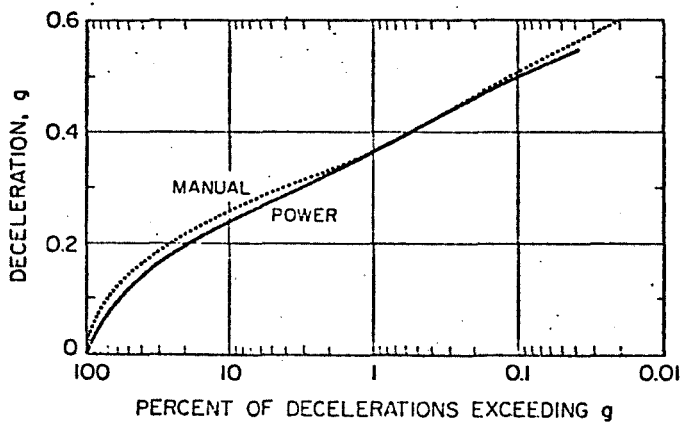


Figure 11. Frequency distribution of braking decelerations puts most stops below 0.3 g, but there is still a significant 0.1% above $\frac{1}{2}$ g. (Source: Mortimer, 1971a).

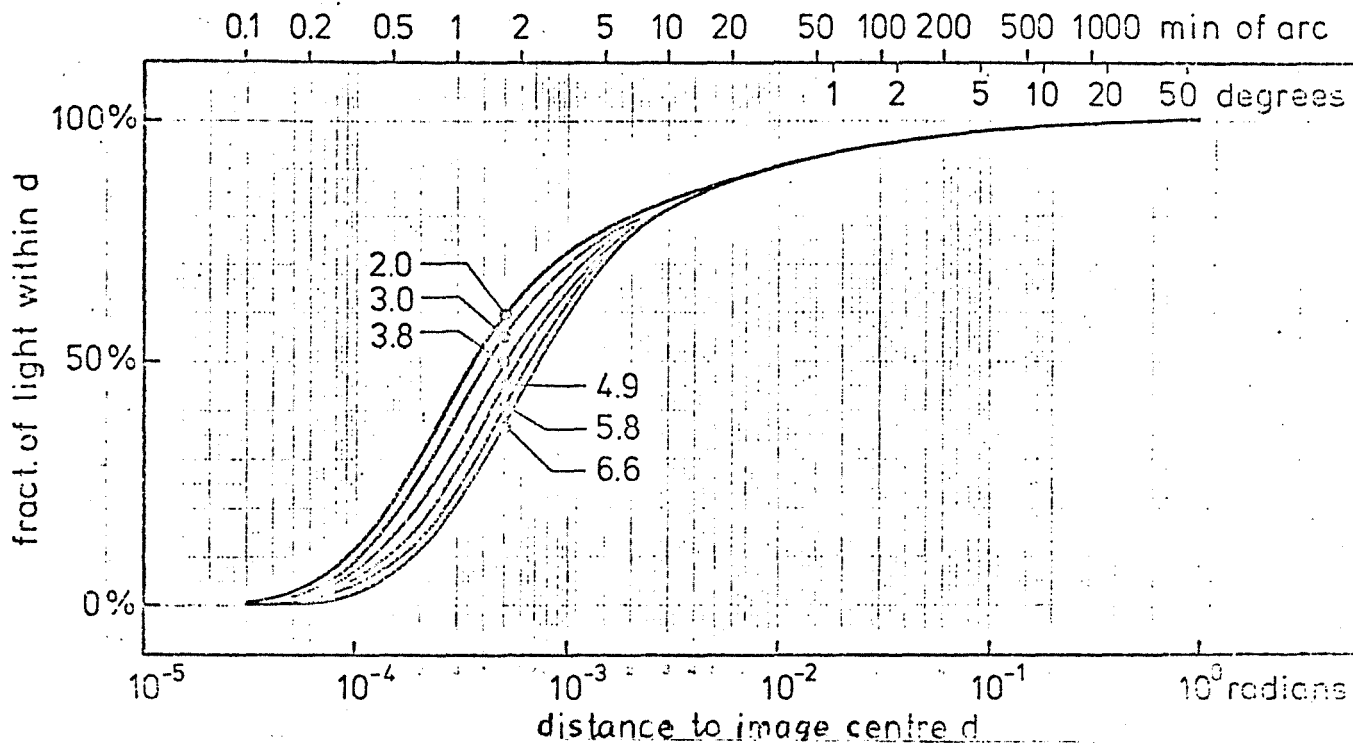


Figure 12. The cumulative distribution of the fraction of the light entering the eye that falls within a circle (expressed in degrees, radians and minutes of arc). Parameter is the diameter (in mm) of the pupil. (Source: Vos et al., 1975).

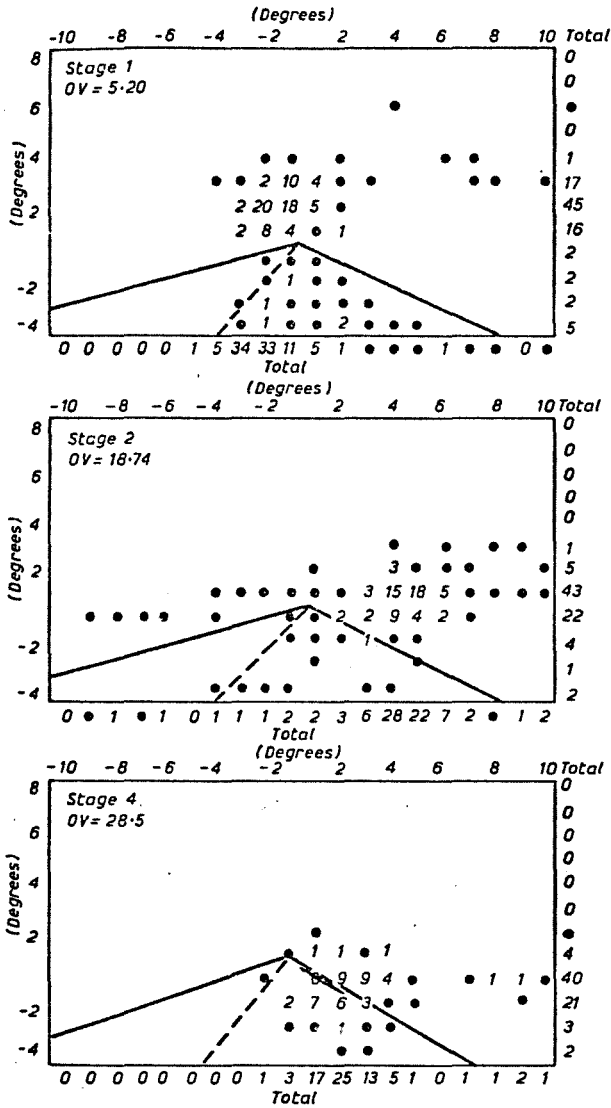


Figure 13. Percentage of fixation by location as a function of experience for a novice driver (open driving - 50 mph) (after Mourant & Rockwell, 1970a, fig. 3). (Source: Schreuder, 1975).

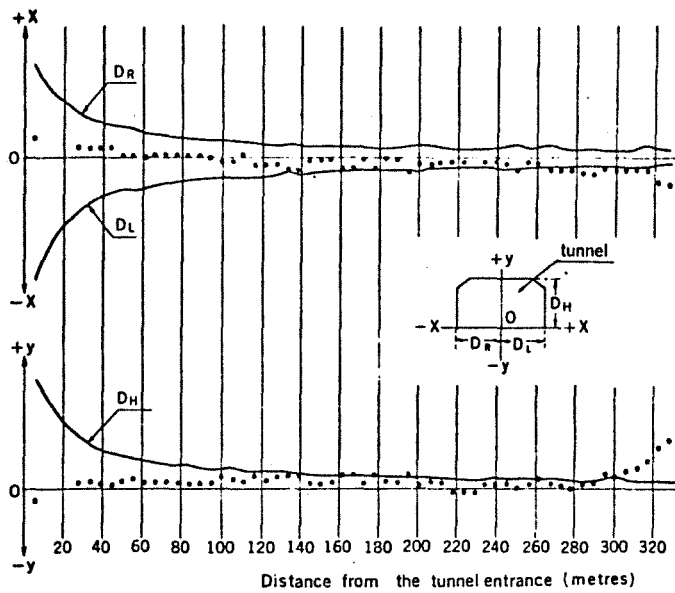


Figure 14. Sample of data from ciné film record. The ordinates represent on an arbitrary scale the displacement of the centre of attraction of the observer's eyes in relation to the centre of the tunnel mouth. Curve D_R shows the variation of the apparent right half-width, curve D_L the apparent left half-width, and D_H the apparent height of the tunnel entrance as seen by the observer during approach. (Source: Narisada & Yoshikawa, 1974).

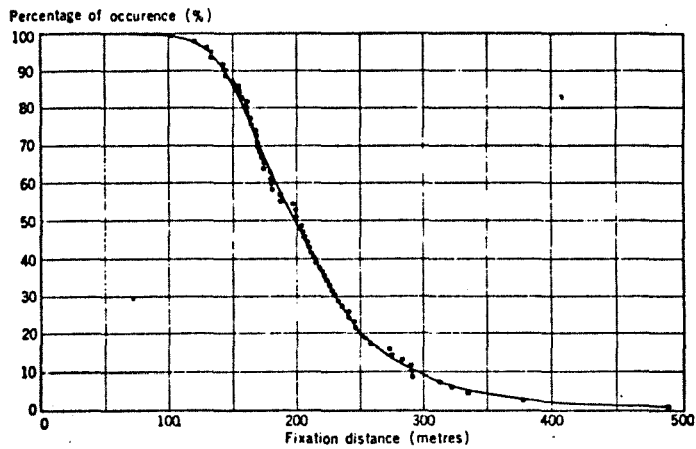


Figure 15. Cumulative frequency distribution of the fixation distance obtained from direct observations. The ordinate shows the percentage of cases in which the observers started to concentrate their visual attention on the tunnel entrance at a distance on the access road greater than that indicated on the abscissa. (Source: Narisada & Yoshikawa, 1974).

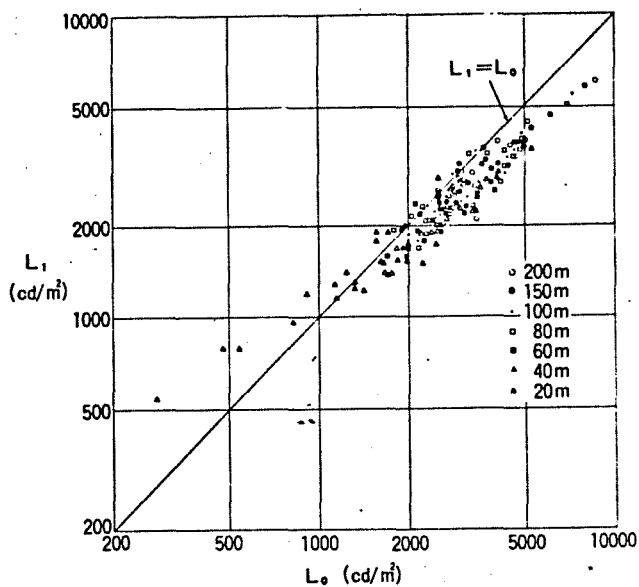


Figure 16. Comparison of the average luminance in the measuring field of 2×10^0 ; measured at the access zone of actual tunnels (L_0) and the equivalent luminance (L_1) of the standard field. (Source: Narisada & Yoshimura, 1977).

N.B. L_1 and L_0 are here used in a different way as compared with the text.

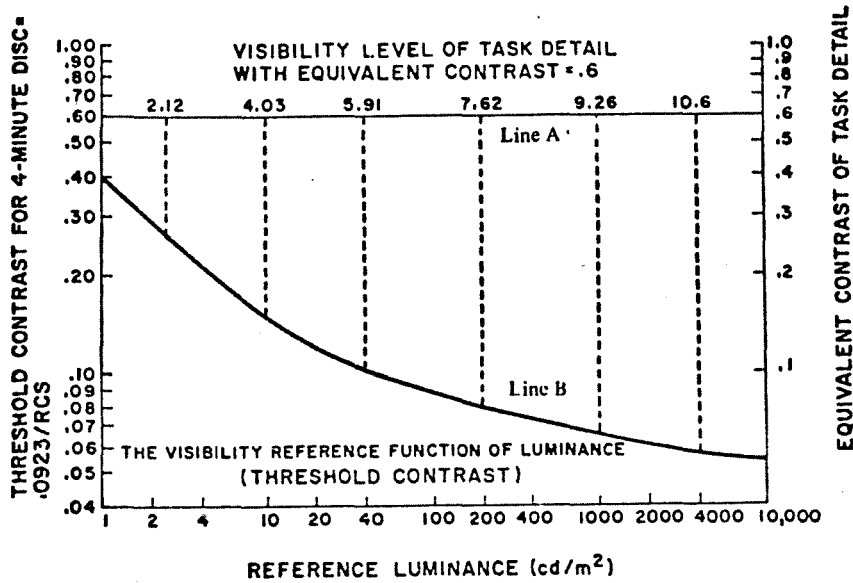


Figure 17. Visibility level increases for a given object as the luminance increases and threshold decreases. (Source IERI, 1979).

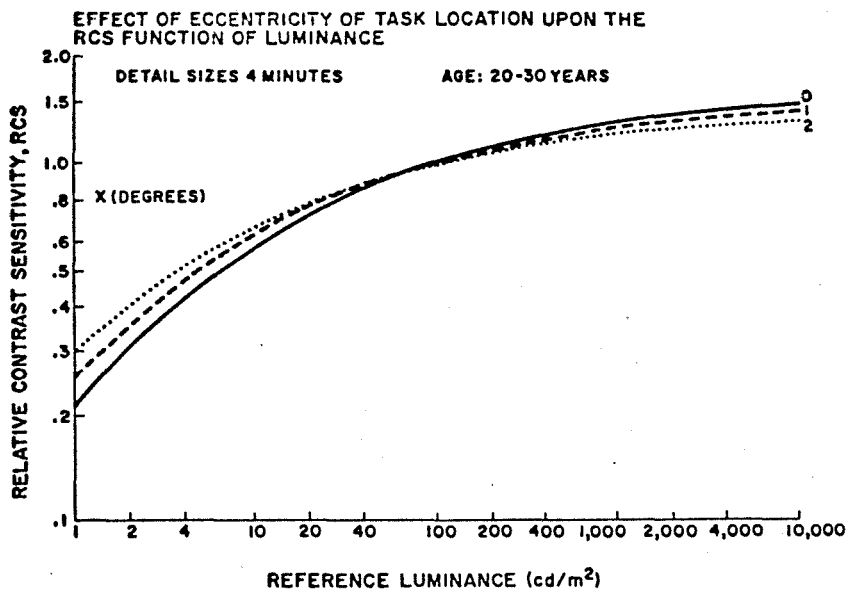


Figure 18. The RCS-function changes with the object being seen at various distances (expressed in degrees) off the line of sight. (Source: IERI, 1979).

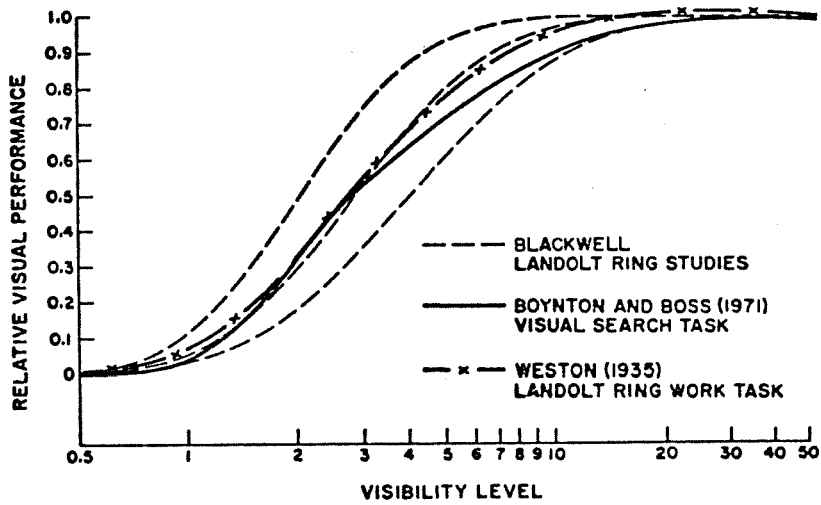


Figure 19. Meshing of ogives from simulated tasks of two field researchers (Westen, and Boynton and Boss) with Blackwell laboratory Landolt-ring ogives. (Source: IERI, 1979).

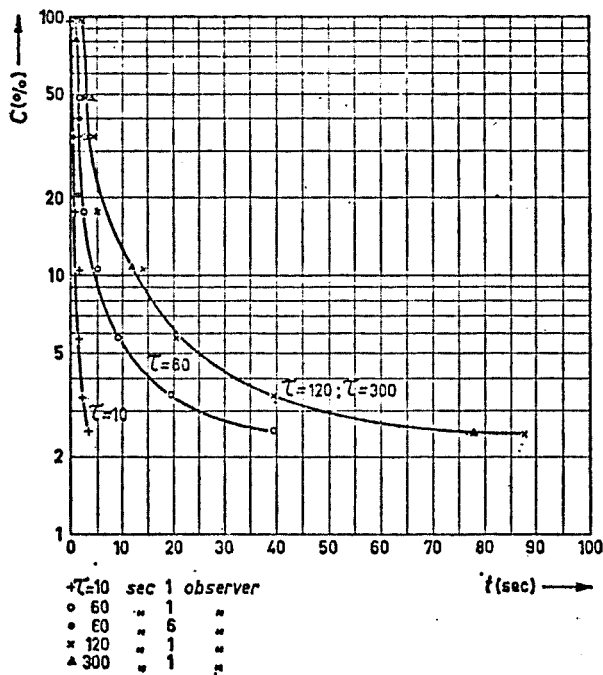


Figure 20. Influence of variations of the pre-adaptation time τ on the adaptation time t . (Source: Schreuder, 1964, p. 88).

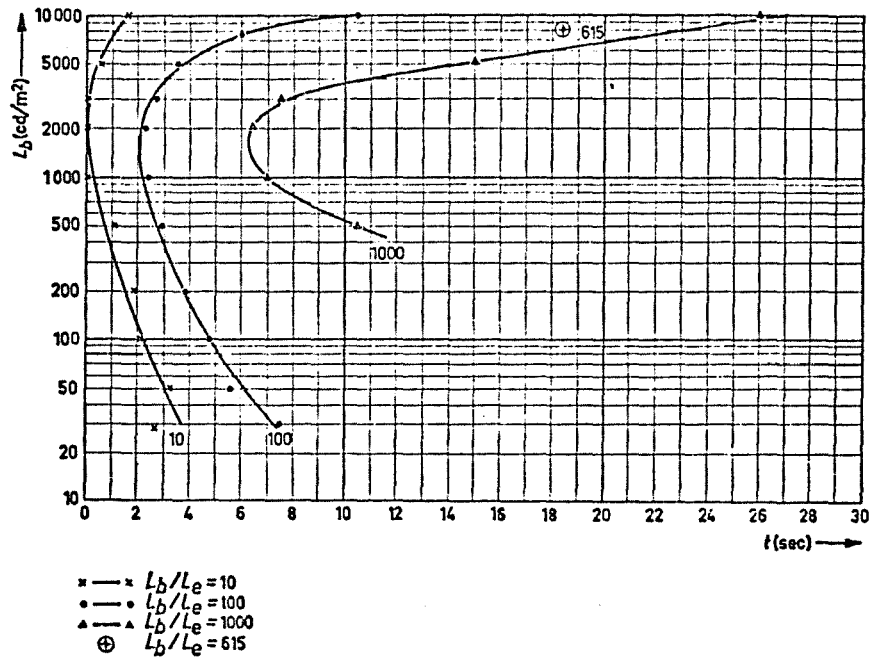


Figure 21. Influence of variations in the starting level L_b of the luminance on the adaptation time t for different values of L_b/L_e ; L_e being end value of luminance. (Source: Schreuder, 1964, p. 90).

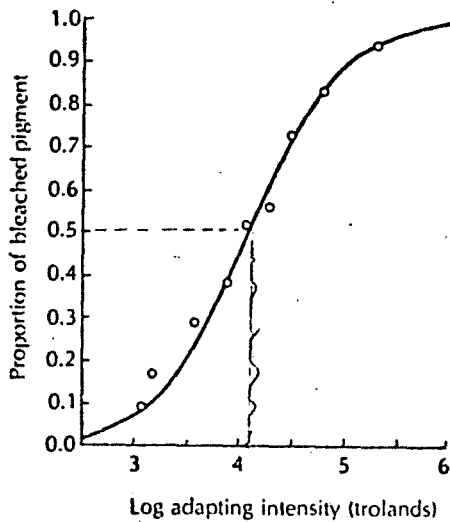


Figure 22. Proportion of pigment in the bleached state as a function of the adapting intensity at equilibrium (i.e., when the subject has been exposed to the adapting light for a long time) (After Rushton, 1963). (Source: Cornsweet, 1970).

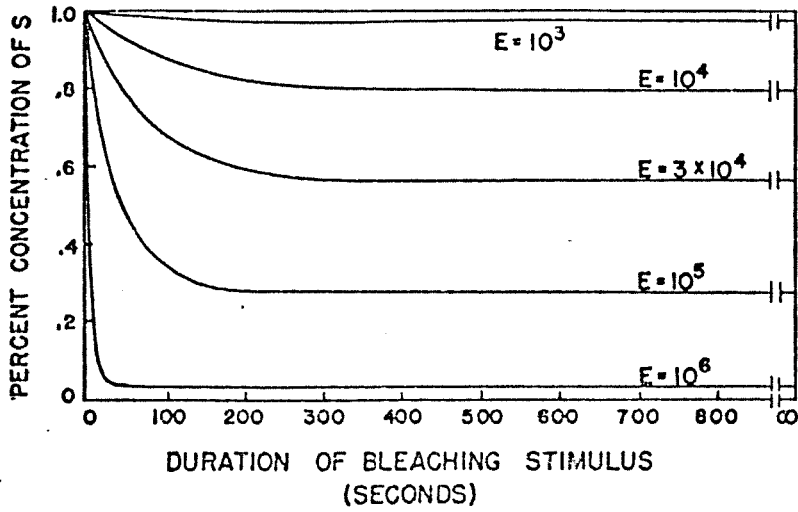


Figure 23. The relation between the concentration (s) of cone pigment and light adaptation time for different values of the illuminance E.

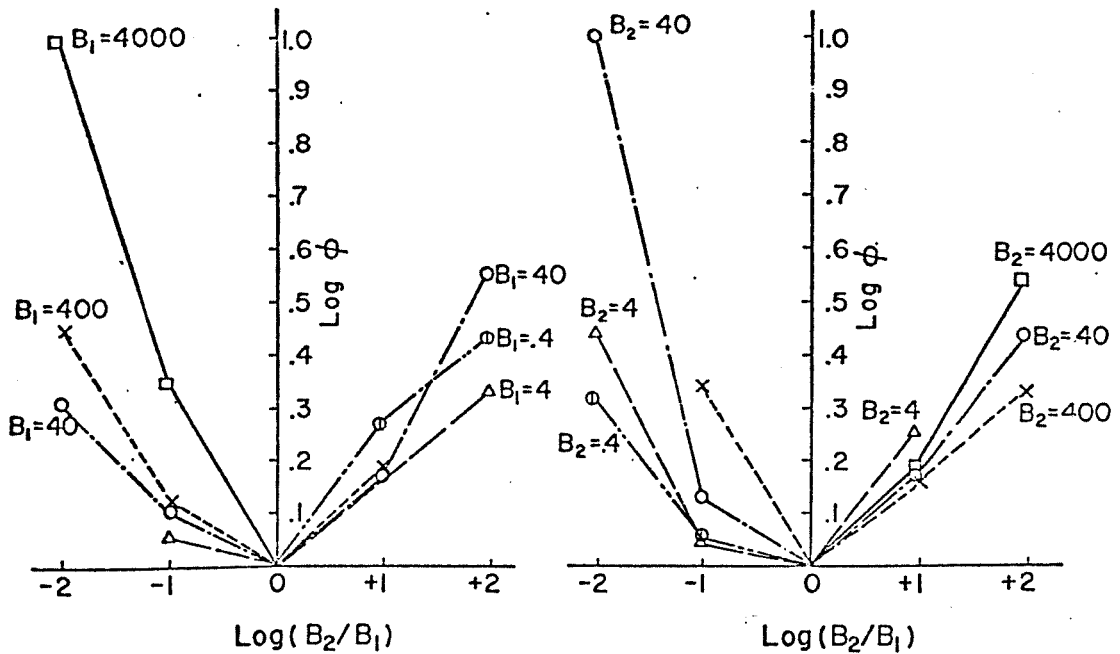


Figure 24. The relation between required increase in contrast ($\log \phi$) and the ratio between the luminances at the beginning B_1 , and the end B_2 of the transition. Parameter is B_1 , resp. B_2 .

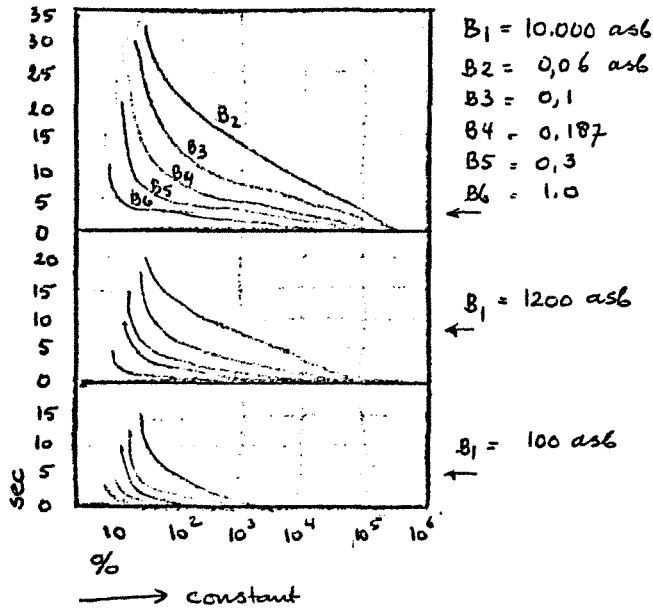


Figure 25. The relation between the adaptation time (in s) and the minimum value of the contrast that stays visible ("Sofort-Kontrast") for a sudden transition from B_1 to B_2 for various values of B_1 and B_2 (After Sewig, 1932).

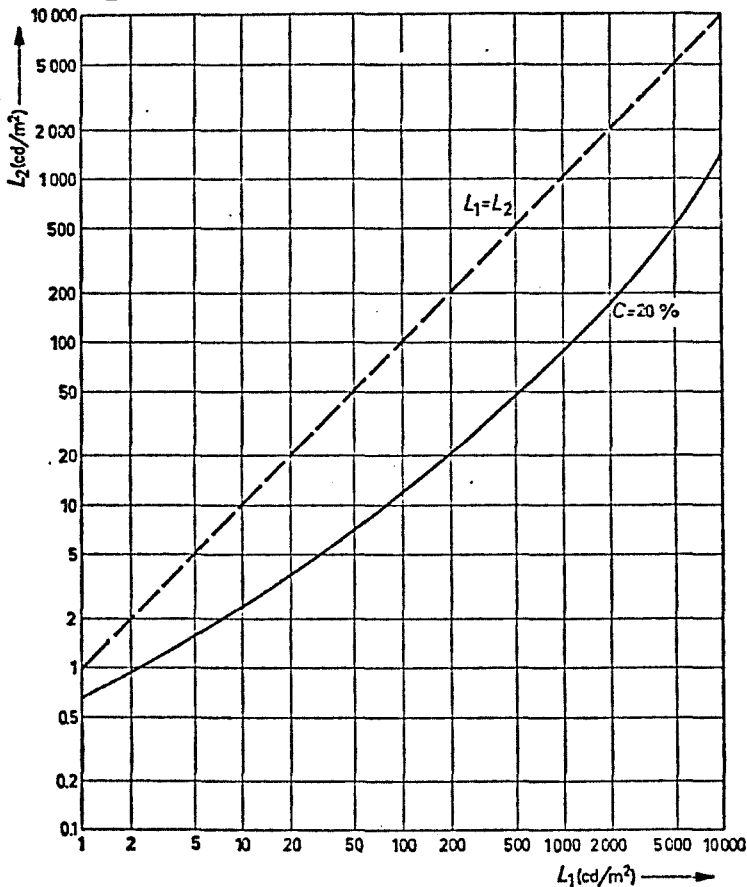


Figure 26. Relationship between L_1 and L_2 for an object of 7' with a contrast of 20% to be visible in 75% of cases when it is displayed for 0,1 s ($L_3 < L_2 < L_1$). (Source: Schreuder, 1964, p. 8).

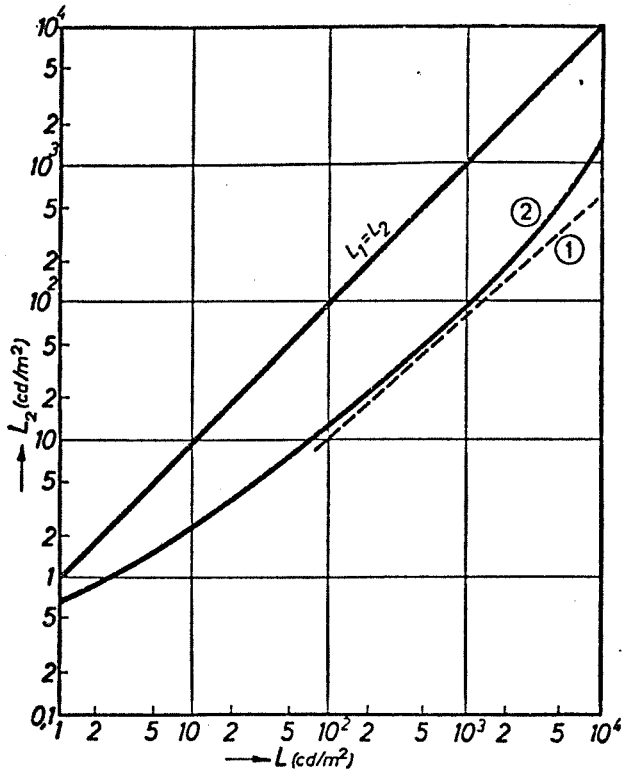


Figure 27. Vergleich zwischen Empfehlungen zur Vermeidung von Induktionsproblemen bei Tunnelleinfahrten: Minimalwert L_2 der Leuchtdichte im Tunnelleingang in Abhängigkeit der Aussenleuchtdichte L_1 .

Kurve 1: nach Mäder & Fuchs, 1966. Gleichung 2 (Kontrastwert ist nicht angegeben).

Kurve 2: nach Schreuder, 1964, p. 8. (Sehe auch Figure 26).

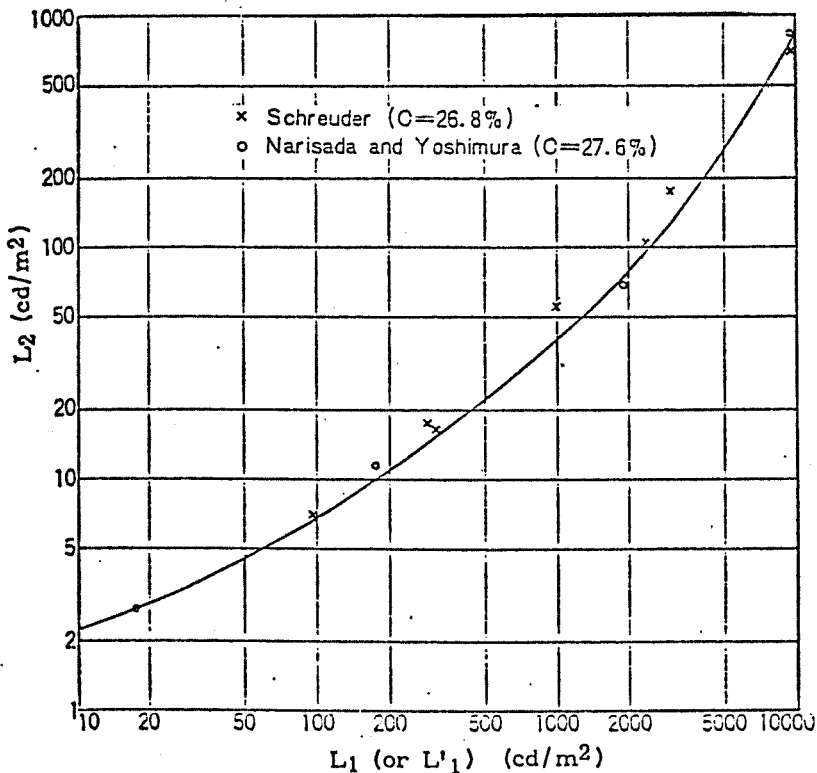


Figure 28. Comparison of data obtained by Schreuder with those of Narisada et al. (Source: CIE, 1981).

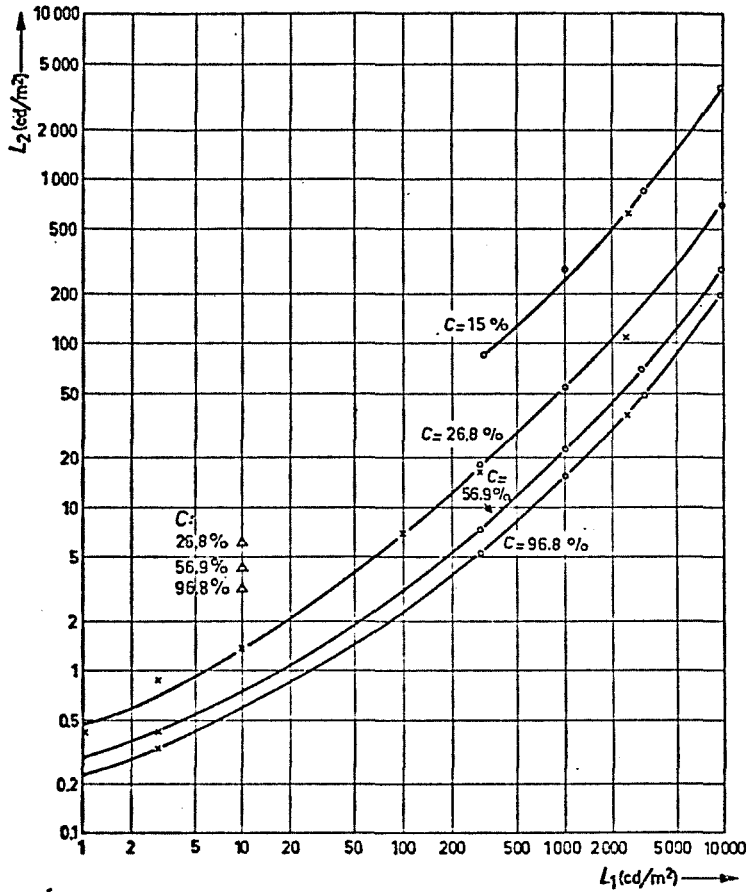


Figure 29. Relationship between the outer luminance L_1 and the minimum luminance L_2 in the tunnel for different values of the contrast C . o Group 1; x Group 2; Δ Group 4. (Source: Schreuder, 1964, p. 77).

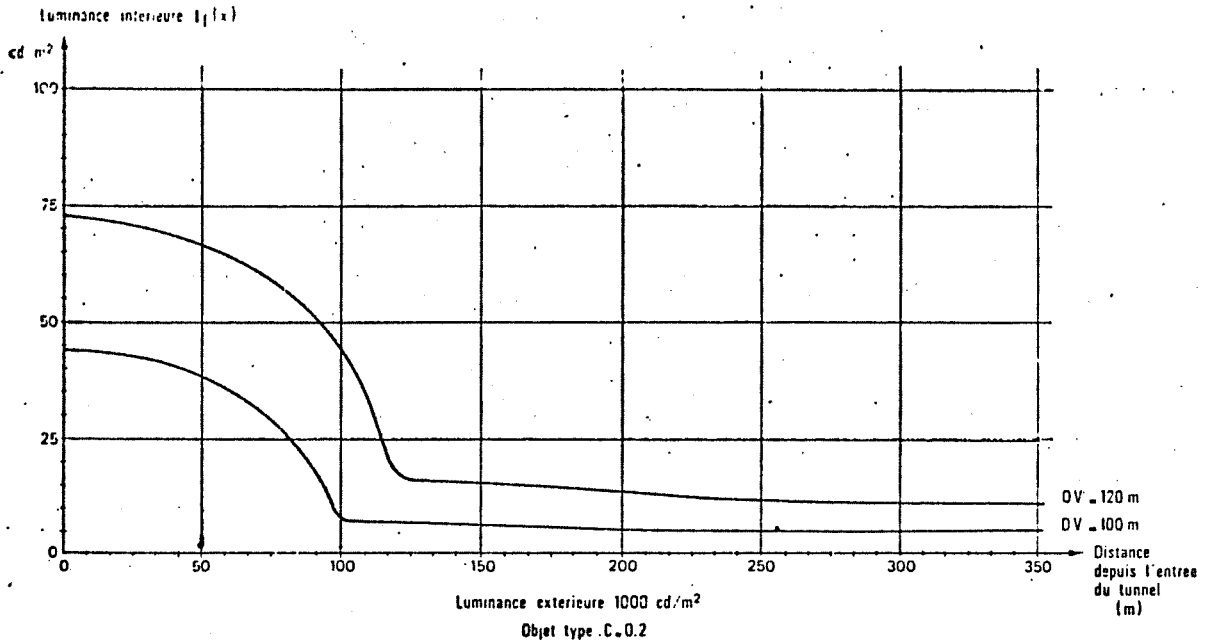


Figure 30. Required luminance values in a tunnel according to the system proposed in France. Outside luminance 1000 cd/m^2 , contrast of object 0,2 for two values of the required visibility distance (100 m and 120 m). (Source: Dubuisson, 1978).

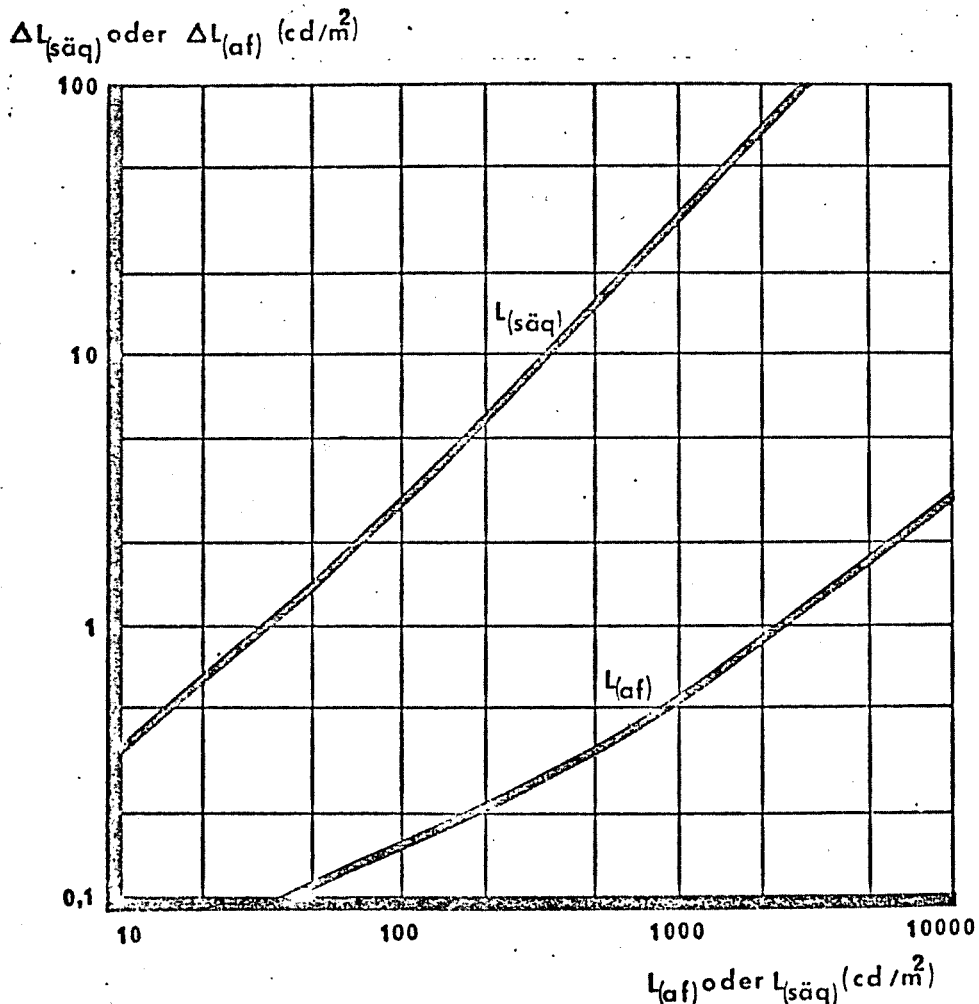


Figure 31. The relationship between the adaptation luminance L_{af} and the equivalent veiling luminance $L_{s\ddot{a}q}$, and their variations (ΔL_{af} and $\Delta L_{s\ddot{a}q}$) for threshold visibility, in the way these values are applied in the system proposed by Narisada. (Source: Van de Nijlen & Narisada, 1980)

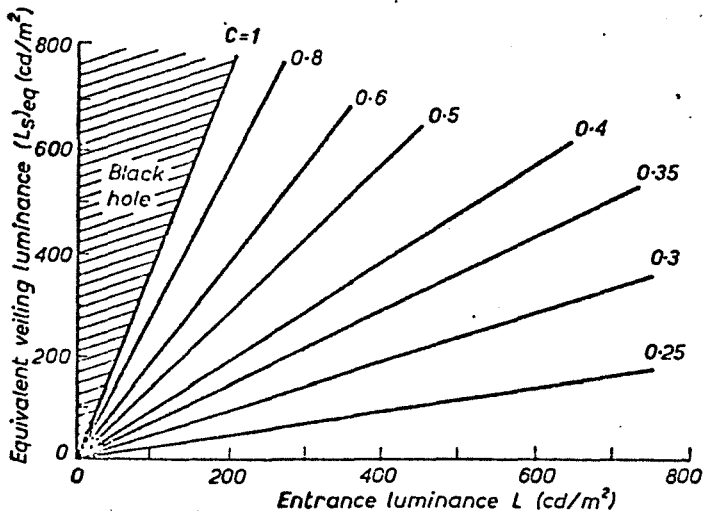


Figure 32. Veiling luminances $(L_s)_{eq}$ caused by the environmental luminance of the tunnel entrances. $C = \Delta L/L$, contrast of object to remain visible ($C_{red} = 0.2$). (Source: Adrian, 1976).

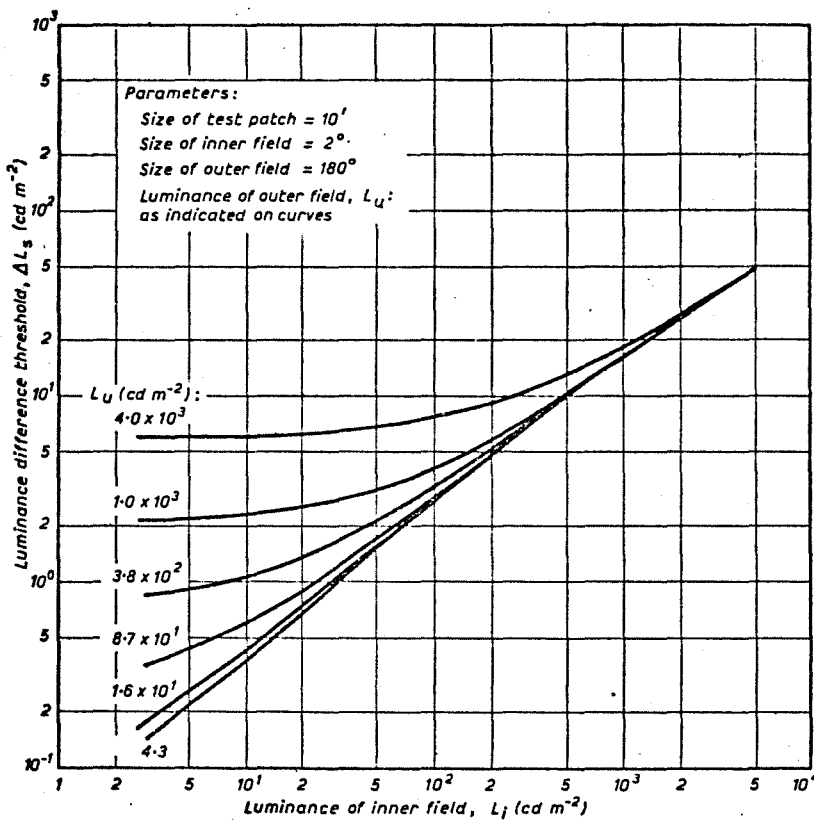
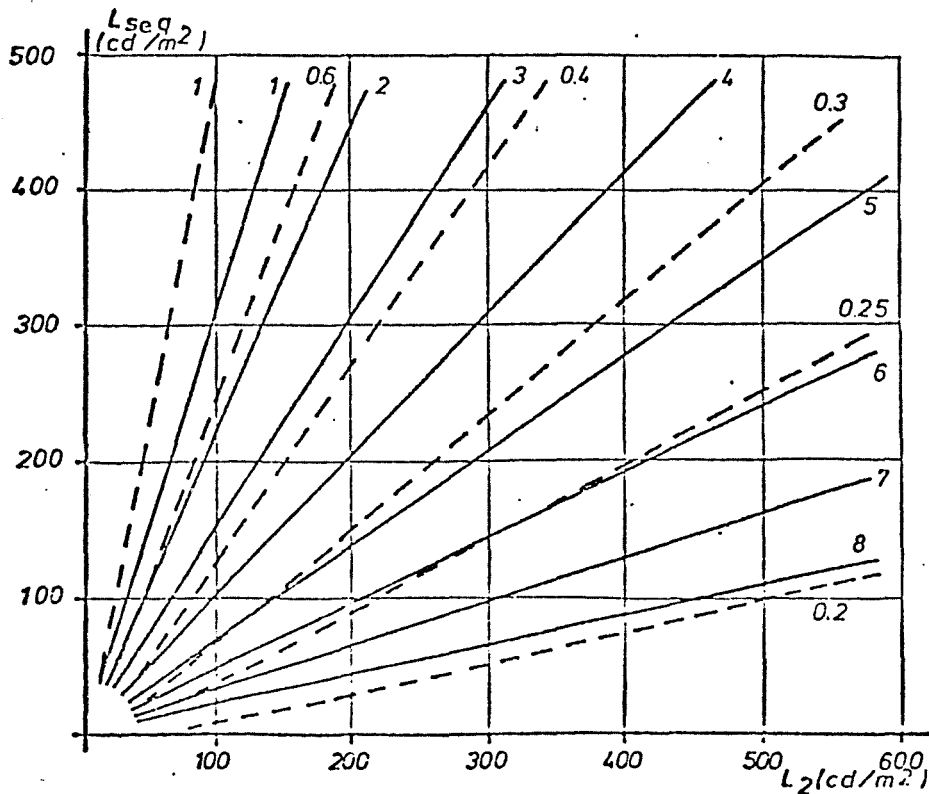
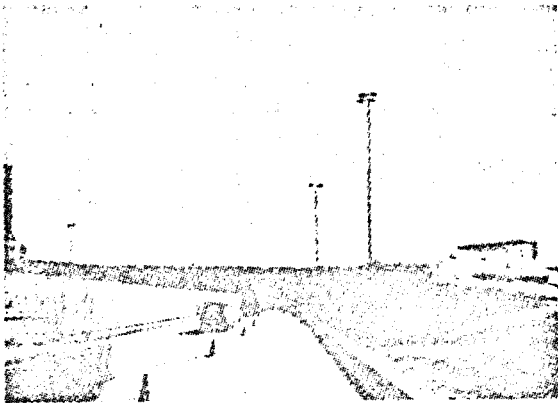


Figure 33. Relationship between calculated luminance difference threshold and luminance of the inner field. (Source: Adrian & Eberbach, 1969).

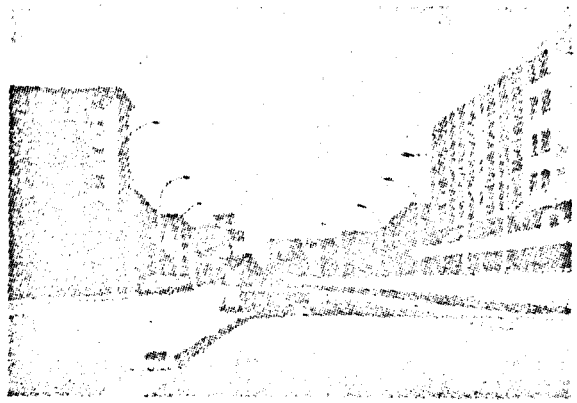


Results of the subjective evaluation of the entrance Luminance L_2 according to the safety rating numbers as indicated in the text. The results are plotted in the same way as Fig. 5 for comparison. As can be seen the curves reflecting appraisal of safety parallel those for various target contrasts of the 10' object to be visible. High safety ratings SRN6 allow that objects of $C = 0.25$ remain just perceptible. This diagram permits to obtain L_2 if L_{seq} is known requiring a certain SRN-number or object contrast.

Figure 34. The relation between the equivalent veiling luminance L_{seq} and the luminance in the threshold zone L_2 for different values of the threshold contrast (dashed lines, see also Figure 32) and of the subjective appraisal of the tunnel entrance situation (drawn lines). The values go from 1 (very bad) to 9 (excellent). (Source: Adrian, 1980).



Portal in very open countryside
5000-8000 cd/m²



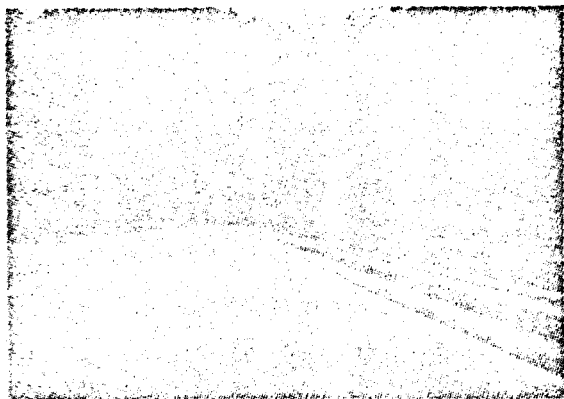
Portal in an urban environment
3000-4000 cd/m²



Portal in open country with little background
4000-5000 cd/m²



Portal in rural area (hilly background)
2000-3000 cd/m²



Portal with mountain background
1000-2000 cd/m²

Figure 35. L_{sp} -values to be considered. (Source: PIARC, 1979).

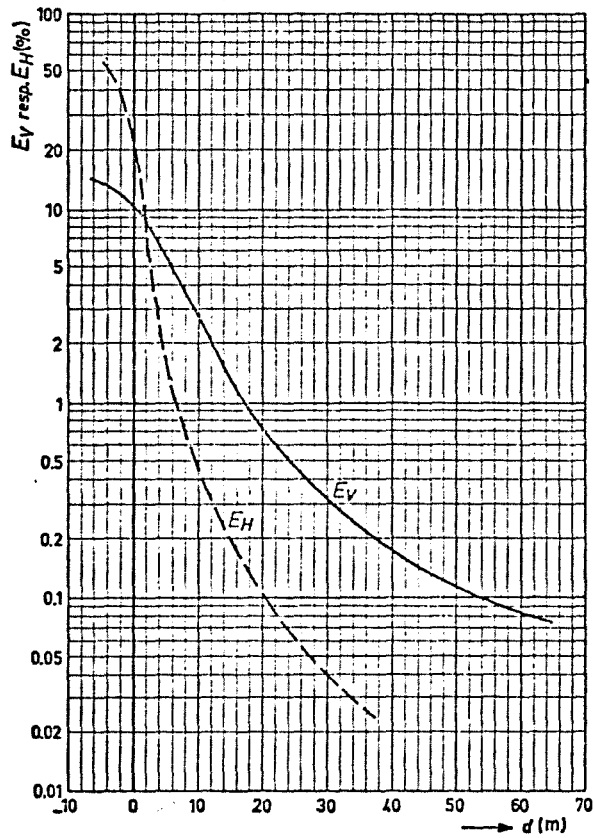


Figure 36. Penetration of daylight. Horizontal and vertical illumination in % with horizontal illumination outside = 100%. d = distance to tunnel entrance. The graphs are constructed partly from calculated, partly from measured values. (Source: Schreuder, 1964, p. 38).

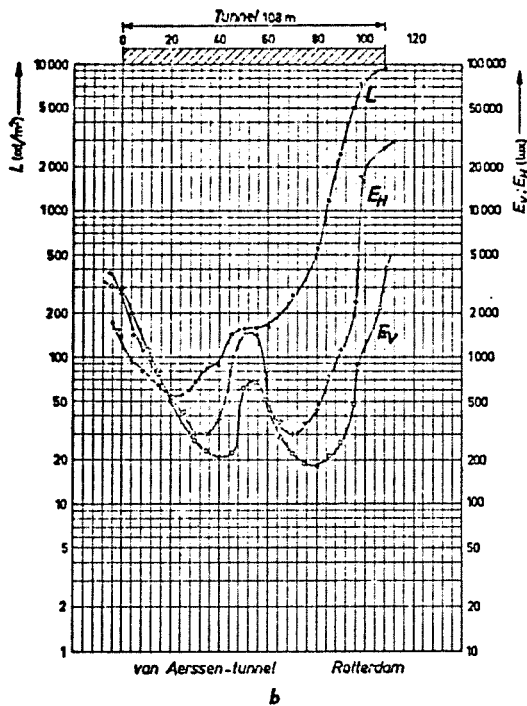
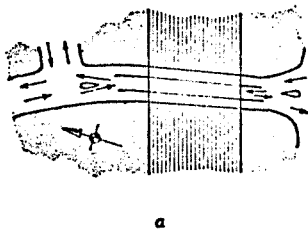
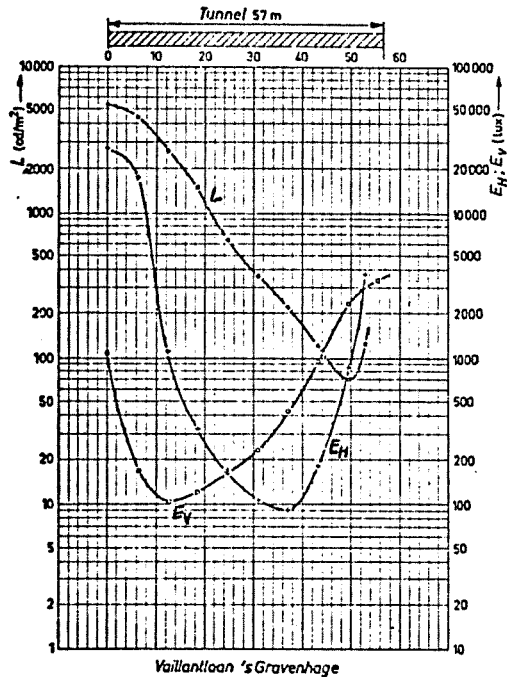
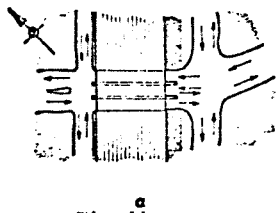


Figure 37. Diagrams of traffic situations (a) and measuring results (b). (Source: Schreuder, 1964, p. 63).

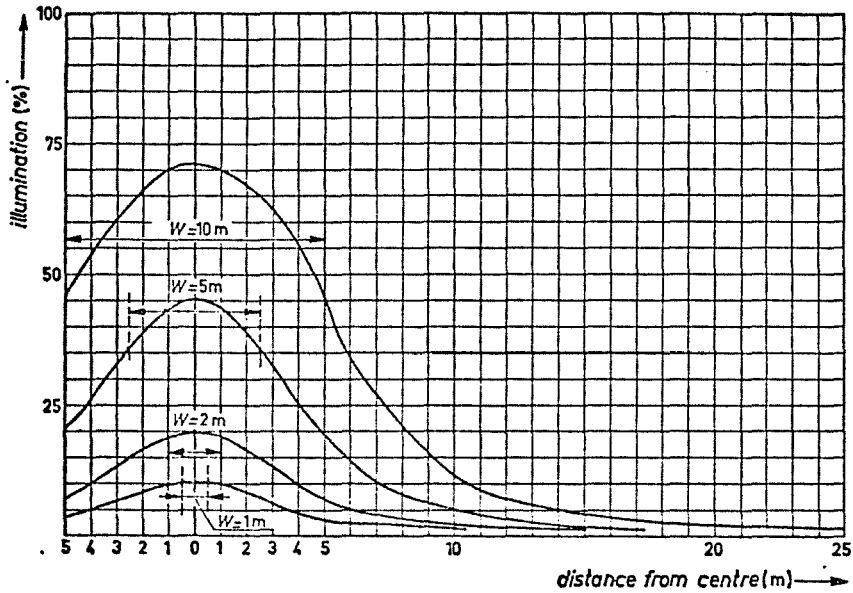


Figure 38. Transmission of daylight slits. W = width of slit.
Illumination outside 100% ($W = \infty$). (Source: Schreuder, 1964, p. 37).

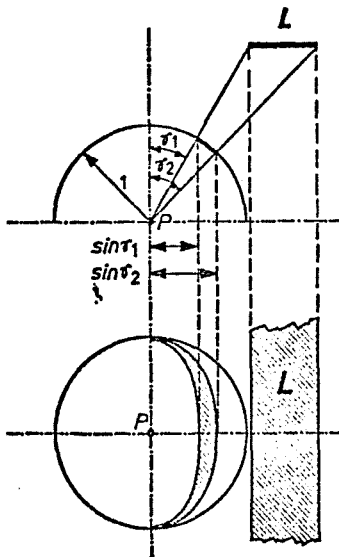


Figure 39. Determining the transmission of daylight slits.
(After Higbie, 1934, pp. 158-159). L = luminous plane. (Source:
Schreuder, 1964, p. 36).

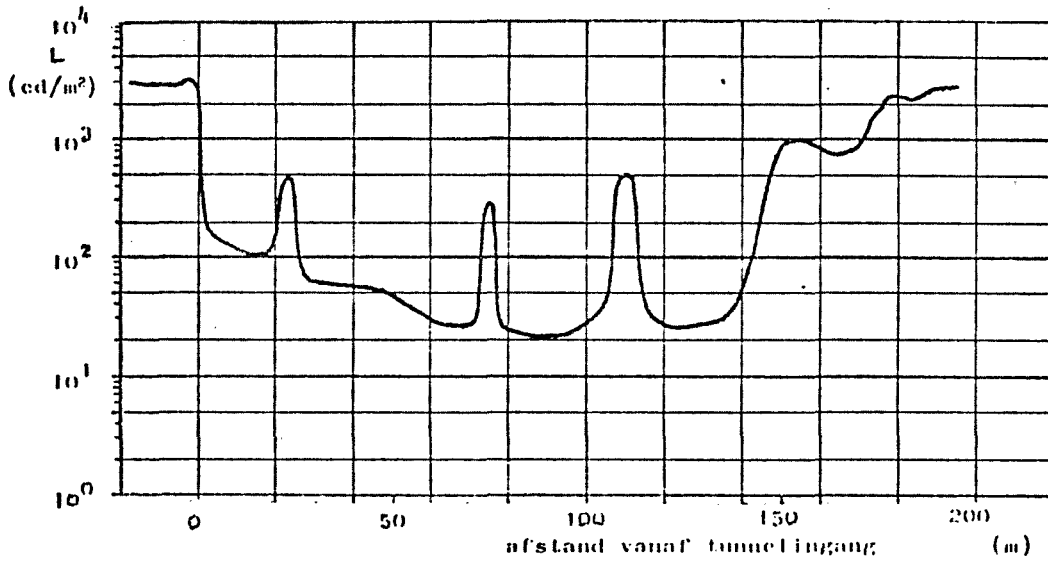


Figure 40. Verloop van de wegdekkluminantie in een onderdoorgang, bepaald met een meetveld van $2 \times 4,5$ m. $\bar{L}_{\text{wegdek}} = 220 \text{ cd/m}^2$. (Source: Holten & Meulders, 1979).

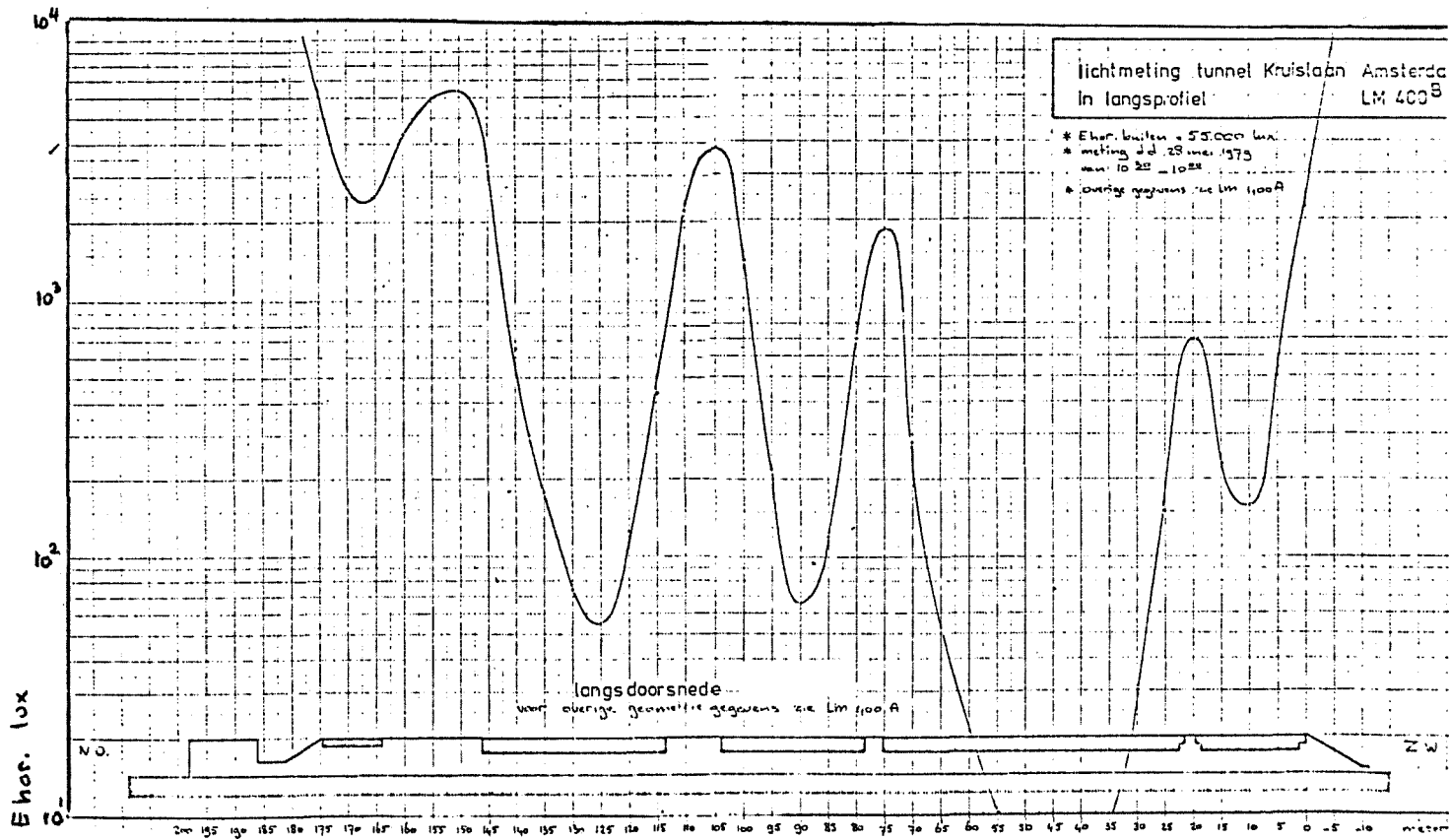


Figure 41. Lichtmeting tunnel Kruislaan, Amsterdam, in langspriet. E_{hor} buiten = 55.000 lux. (Source: Swart, 1979).

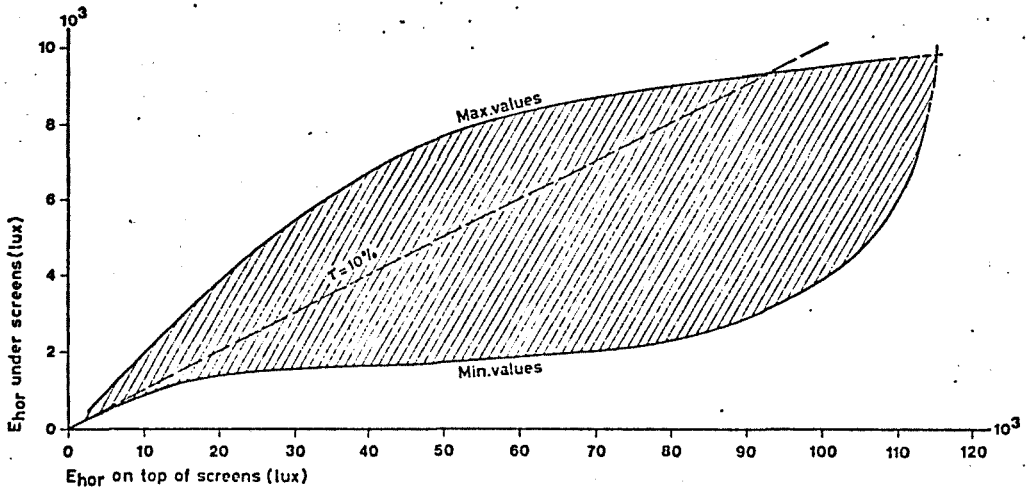
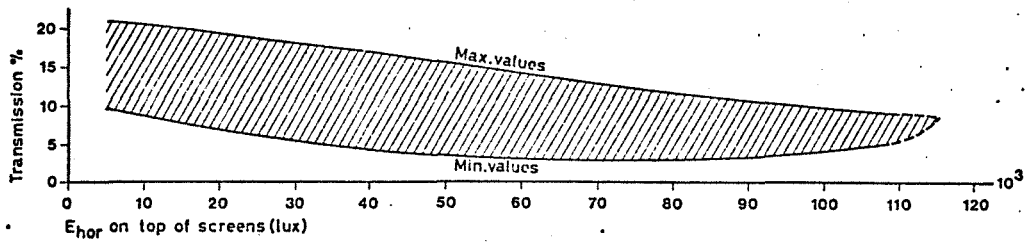


Figure 42. Top figure: the transmission for different screen constructions in relation to the outdoor illuminance (E_{hor}). Bottom figure: the relation between the horizontal illuminance on top of the screen and on the road under the screen. In both figures the hatched areas indicate the variation within the values measured in practice. (Source: Swart, 1979).

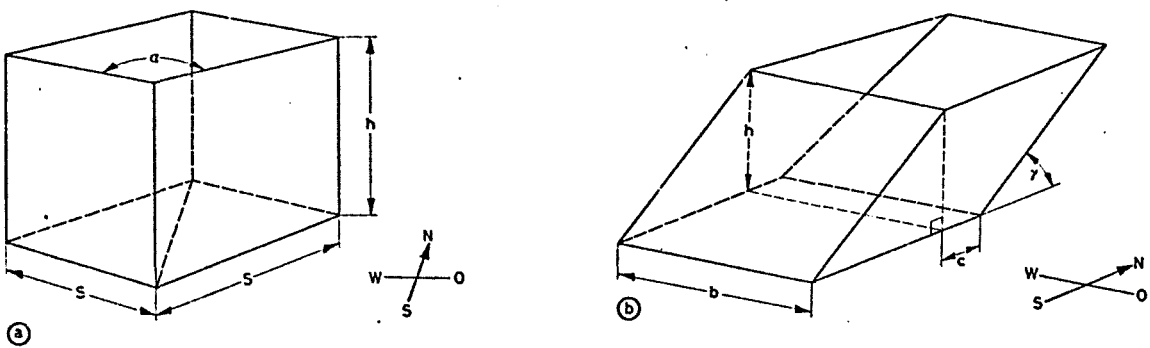


Figure 43. Formen der untersuchten Rasterelementen. (Source: Schreuder, 1965).

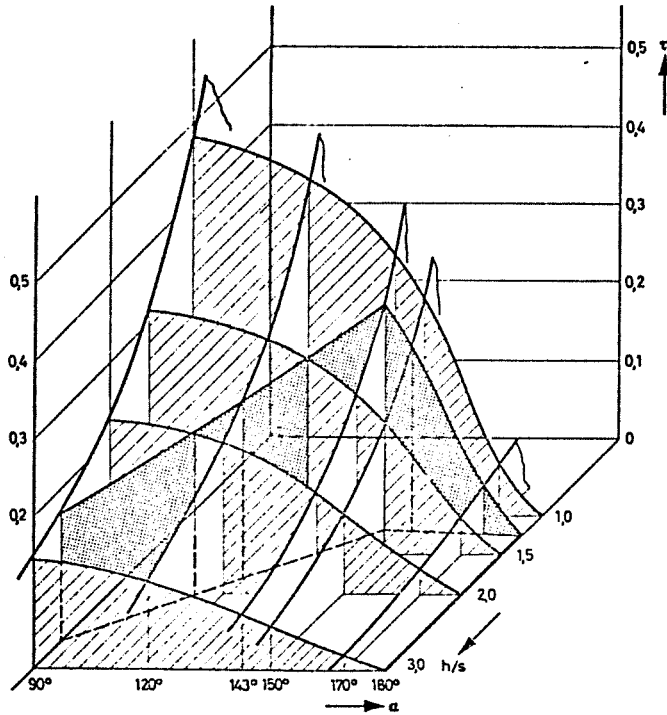


Figure 44. Lichtdurchlässigkeit τ eines "geraden" Rasters (Sehe Figure 43.a.) mit Öffnungswinkel α und relativer Höhe h/s . Die voll ausgezogene Linie gibt die Grenze des "sonnendichten" Gebietes an. Gultig für 52° N.Br. und eine Wandreflexion $\rho = 0.78$. (Source: Schreuder, 1965).

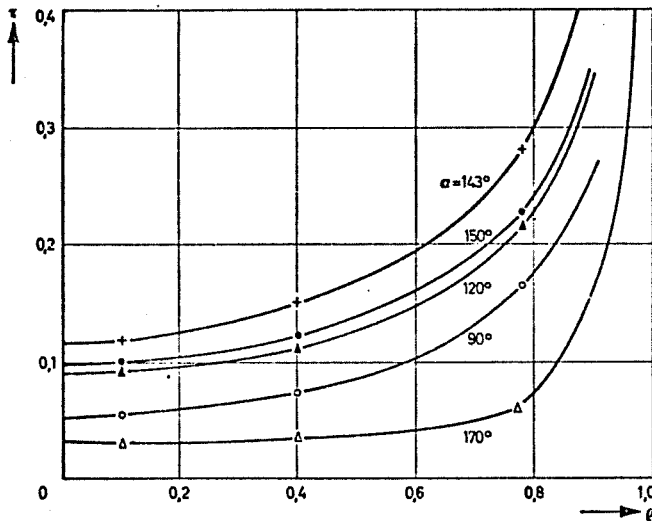


Figure 45. Zusammenhang zwischen Lichtdurchlässigkeit τ eine geraden, sonnendichten Rasters und der Wandreflexion ρ in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel α (h/s variabel). (Source: Schreuder, 1965).

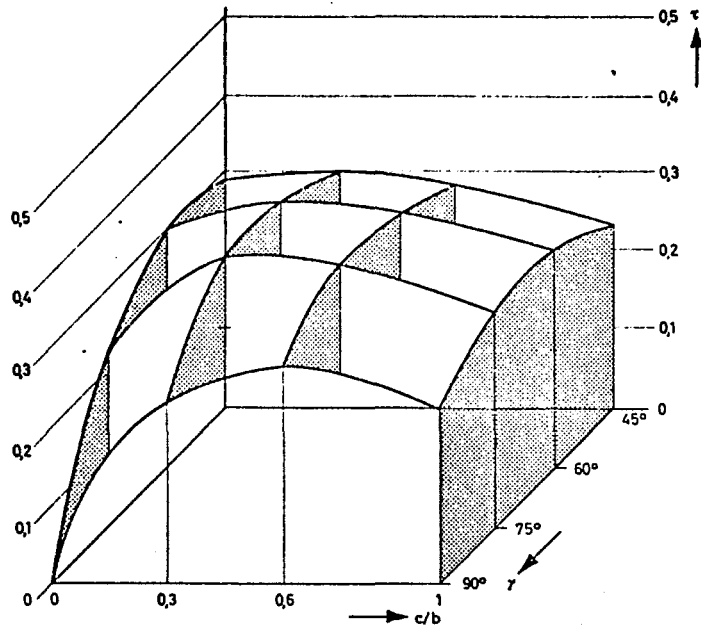


Figure 46. Lichtdoorlässigkeit τ eines "schrägen" Rasters (Sehe Figure 43.b.), Neigungswinkel γ und der Form c/b der auf die Basis projizierten Öffnung $\rho = 0.78$. (Source: Schreuder, 1965).

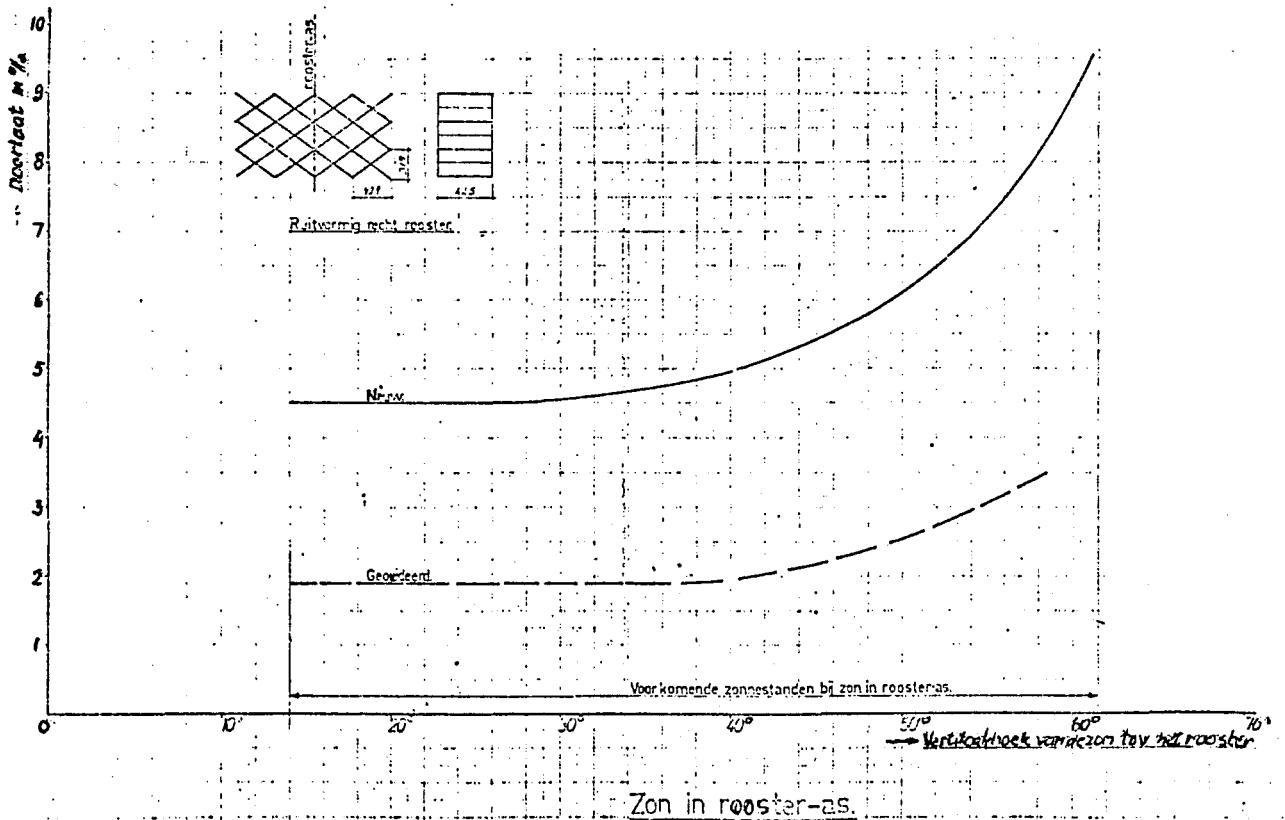


Figure 47. Vergelijking tussen de lichtdoorlaat van een nieuw en een geoxideerd ruitvormig recht rooster (bij helder blauwe hemel). (Source: Anon, 1972c).

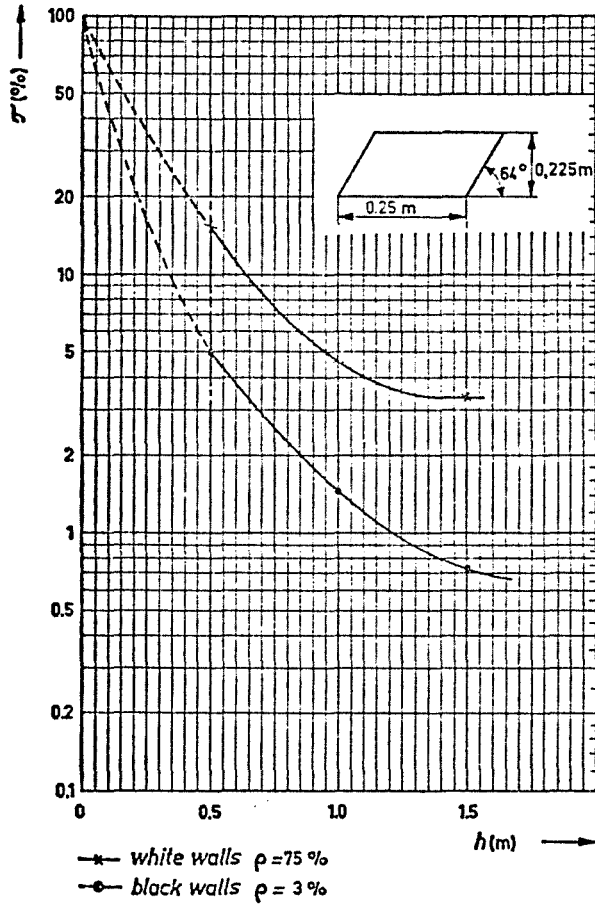


Figure 48. Relationship between transmission τ and height h of grids. (Source: Schreuder, 1964, p. 35).

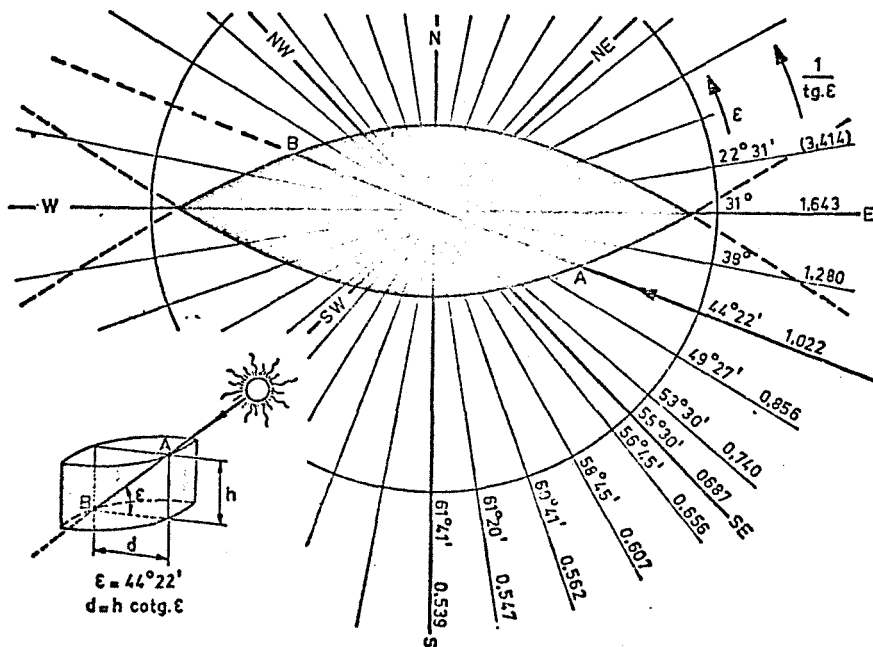


Figure 49. Diagram of solar altitudes. ϵ = maximum elevation of the sun; d = width of grid opening for height $h = 1$; $(\cotg. \epsilon)$. Diagram is valid for June 21st at 52° Latitude North. (After Swierstra, 1951, 1952). (Source: Schreuder, 1964, p. 34).

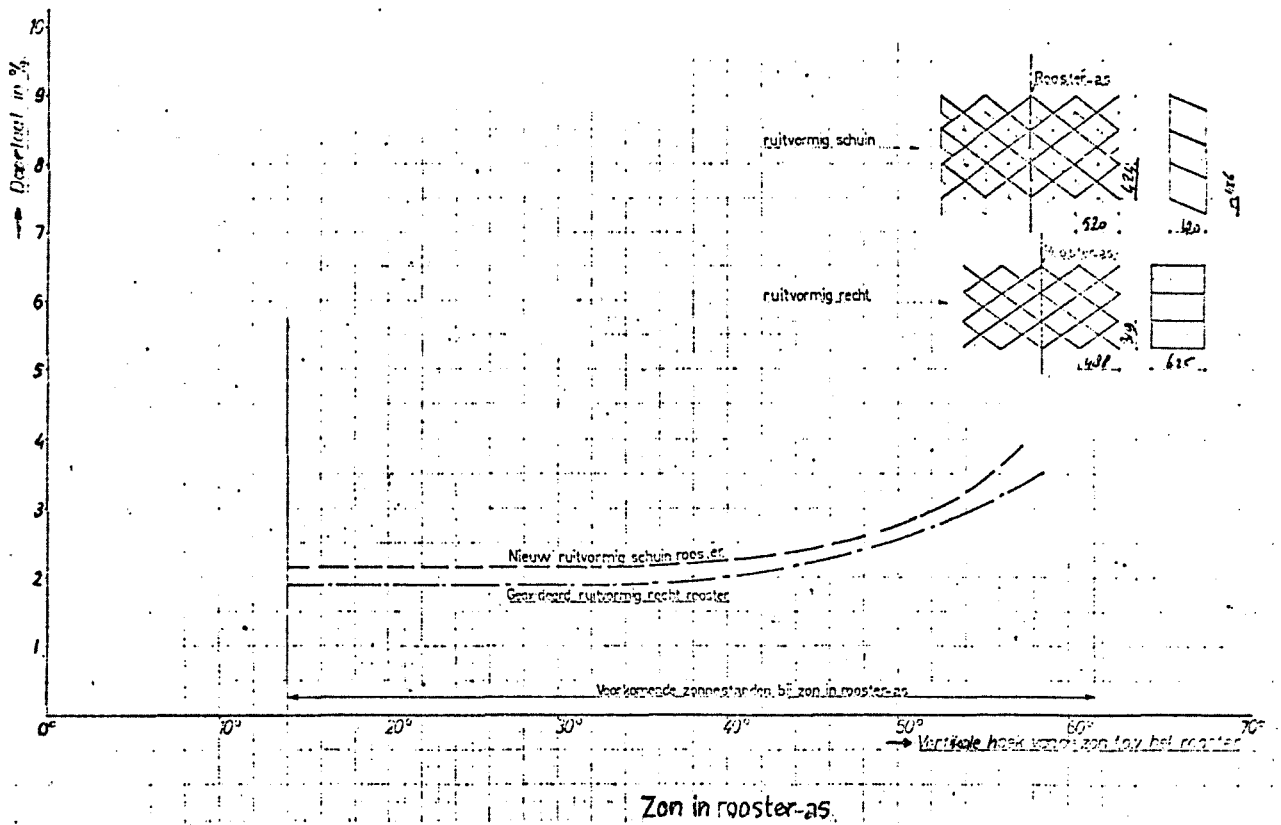
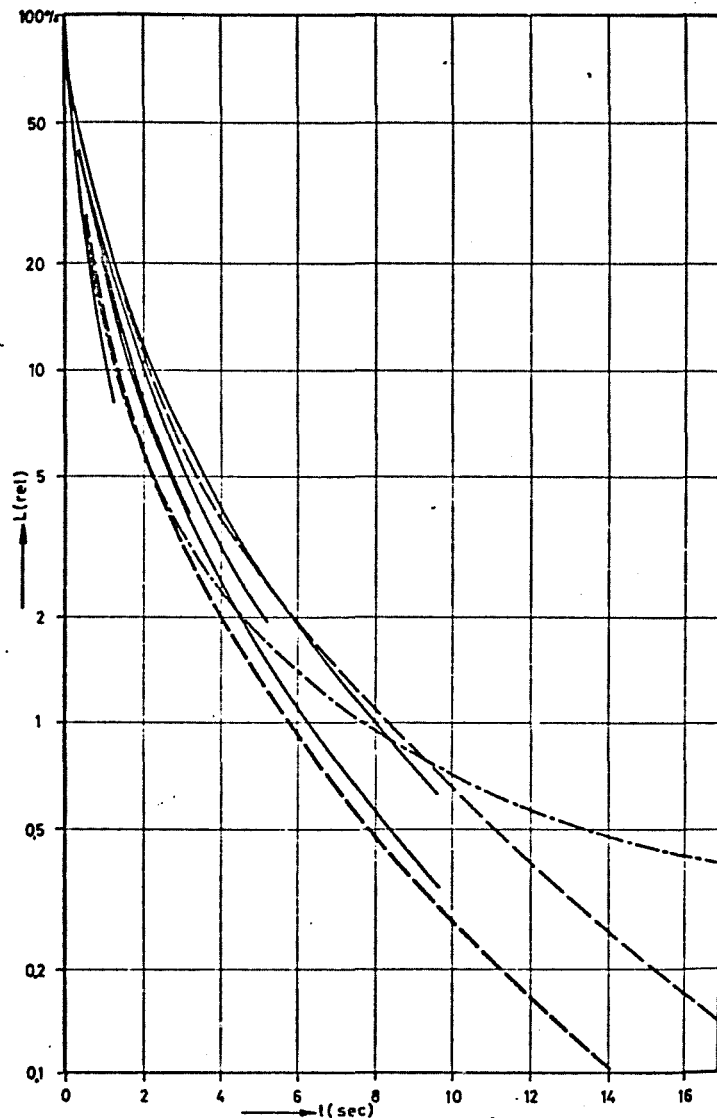


Figure 50. Vergelijking tussen de lichtdoorlaat van een nieuw ruitvormig schuin en een geoxideerd ruitvormig recht rooster (bij helder blauwe hemel). (Source: Anon, 1972c).



- after Kabayama (1963),
table 3; L_0 : 100...1600 cd/m^2 .
- - - after Schreuder (1964),
table 24; L_0 : 8000 cd/m^2
(50% and 75% of observations):
- · - · after Mader and Fuchs (1966),
formula 3 (with $K = Ba/7$,
 $m = -1.5$) L_0 : 80...6000 cd/m^2 .

Figure 51. The relation between the luminance of a screen that is still accepted by observers and the adaptation time. The luminance of the beginning (L_0) of the experiments is taken as 100%. (Source: Schreuder, 1968).

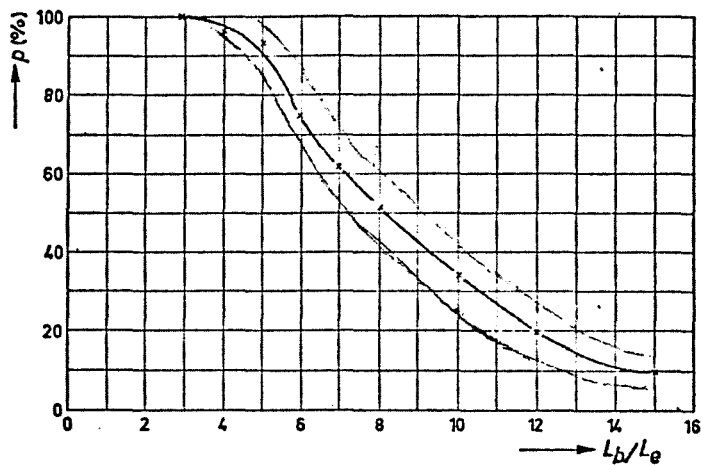


Figure 52. Evaluating a sudden luminance transition. p = percentage of transitions found acceptable; L_b = beginning value; L_2 = end value of luminance. (Source: Schreuder, 1964, p. 84).

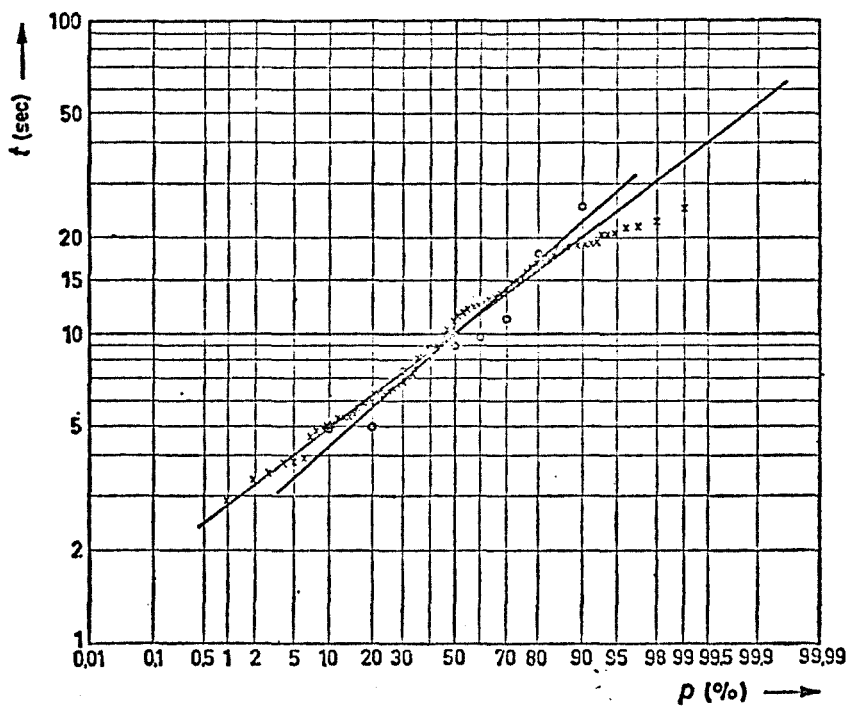


Figure 53. Cumulative frequency distribution of the adaptation times. x = Group 2; o = Group 3. (Source: Schreuder, 1964, p. 87).

ANNEX A t/m F

bij

DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN

Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels

INHOUD

Annex A. Het remvermogen.

Annex B. Een eenvoudige bepalingsmethode voor de sluieryluminantie.

Annex C. Voorbeelden van gemeten waarden van de luminantie bij tunnelingangen.

Annex D. Beschrijving van de proefnemingen (Schreuder, 1964).

Annex E. Samenvatting van "Tunnel entrance lighting" (CIE, 1981).

Annex F. Gegevens over tunnels met contrastverlichting.

Annex AHET REMVERMOGEN

De in Nederland geldige minimale waarden voor de grootst mogelijke remvertraging zijn neergelegd in het Wegenverkeersreglement (Anon, 1975e). Volgens de laatste wijziging - 1975 - worden in artikel 73 de volgende minimale waarden gegeven:

Bromfietsen	3,86 m/s ²
Personenauto's	5,2 m/s ²
Zware bussen	4,5 m/s ²
Bedrijfswagens	4,0 m/s ²

Voor auto's van een bouwjaar 1965 of ouder geldt: 3,86 m/s².

Voor hulpremmen van vrachtauto's bestaan er EEG-richtlijnen. Deze komen erop neer dat bij een snelheid van 70 km/h de maximale waarde van de kortste remweg 95,7 m bedraagt (zie hiervoor SWOV, 1978, blz. 13).

De meeste metingen van het remvermogen betreffen ook de maximale haalbare remvertraging of de minimaal haalbare remweg. Een paar voorbeelden:

1. Vrachtauto's (trekker + oplegger) (SWOV, 1978)

trekker solo 4,6 m/s²

trekker + lege oplegger 4,6 m/s²

trekker + beladen oplegger 4,1 m/s².

2. Personenauto's met en zonder anti-blokkeerinrichting (ABI, op natte wegen) (Engels, 1980) (zie Tabel A.1.).

Wanneer de remweg wordt omgerekend op 100 km/h (zonder ABI), dan volgt 62,44 m en 77,08 m voor de Mercedes, resp. de BMW.

3. Door het TRRL zijn een aantal metingen bijeengebracht (Neilson et al., 1979). In Figuur A.1. zijn een aantal van de gegevens overgenomen. Daaruit blijkt dat bij 100 km/h op een droge weg de remweg van personenauto's tussen de 45 en 60 m ligt; voor vrachtauto's ligt (bij 80 km/h) de remweg tussen 50 en ca 80 m. Dit geldt dan voor de minimale remweg!

Ook zijn simulatorberekeningen uitgevoerd. Zo vindt Aleswerth (1978) voor een trekker + oplegger bij het rijden in een cirkel met een straal van 150 m de volgende resultaten:

- op een natte, gladde weg bij 60 km/h: leeg 40,5 m, beladen 41 m;
- op een natte, stroeve weg bij 80 km/h: leeg 45 m, beladen 56,5 m.

Dit alles betreft de minimale remweg bij zo sterk mogelijk remmen. In het normale verkeer is dit een grote uitzondering. Daar zijn heel andere waarden van belang.

Zo vindt Bloembergen (1972) de volgende remvertragingen wanneer alleen de gaspedaal wordt losgelaten (zie Tabel A.2.).

Voorts zijn de observaties tijdens rijproeven van belang: Blaauw (1977) geeft een aantal waarden voor "normaal" en "hard" remmen (in Tabel A.3.). Daarbij zijn gegevens verschaft over dwarsversnelingen; die liggen uiteraard veel lager (zie daarvoor ook Merrin & Neuhardt, 1974 en Ritchie et al., 1968).

Agent (1980) geeft aan dat $0,9 \text{ m/s}^2$ overeenkomt met zeer licht remmen; snelheid verminderen door remmen op de motor ("in gear alone") resulteert in vertragingen van ongeveer $0,4$ tot $0,7 \text{ m/s}^2$. Deze gegevens zijn ontleend aan Anon (1965a).

Tenslotte kunnen we nog de metingen van Mortimer (1971a) citeren. Deze metingen betreffen de frequentieverdeling van de remvertragingen, gemeten in normaal verkeer. Twee auto's zijn gebruikt, een met een handbediende en een met een automatisch bediende versnellingsbak. De resultaten zijn gegeven in Figuur A.2.

De conclusie uit dit materiaal is dat onder gunstige omstandigheden de benodigde remweg zeer kort kan zijn, maar dat bij ongunstige omstandigheden, bij natte weg en bij beladen vrachtauto's met vrij lange remwegen gerekend moet worden. Wanneer men met normaal verkeer, en met confortseisen rekening houdt, wordt de toelaatbare remvertraging zeer veel geringer.

Zonder ABI	Mercedes 280 SE	BMW 733i
50 km/h	6,70	5,60
60 km/h	6,49	5,37
80 km/h	6,19	5,01
Met ABI		
50 km/h	7,96	6,56
60 km/h	7,91	6,65
80 km/h	8,12	6,55

Tabel A.1. Gemiddelde remvertraging m/s^2). (Source: Engels, 1980).

Mechanisch		Mercedes 250 C	Mercedes 280 C
1e versnelling v =	50 km/h	2,3	1,9
2e	85 km/h	1,85	1,6
3e	140 km/h	1,65	1,5
4e	160 km/h	1,35	1,4
Automaat			
Drive	50 km/h	0,5	0,5
	85 km/h	0,6	0,8
	140 km/h	1,1	1,2
	160 km/h	1,4	1,35
Slow	50 km/h	0,7	0,7
	85 km/h	1,0	1,0
	140 km/h	1,4	1,55

Tabel A.2. Remvertragingen bij uitsluitend loslaten gaspedaal (m/s^2), mechanisch en automatisch. (Source: Bloembergen, 1972).

Beginsnelheid (km/h)	Hard ₂ remmen (m/s^2)	"Normaal" remmen (m/s^2)
30	0,49	0,21
50	0,64	0,27
80	0,65	0,34
100	0,57	0,40

Tabel A.3. Maximale langsvertragingen (m/s^2). (Source: Blaauw, 1977).

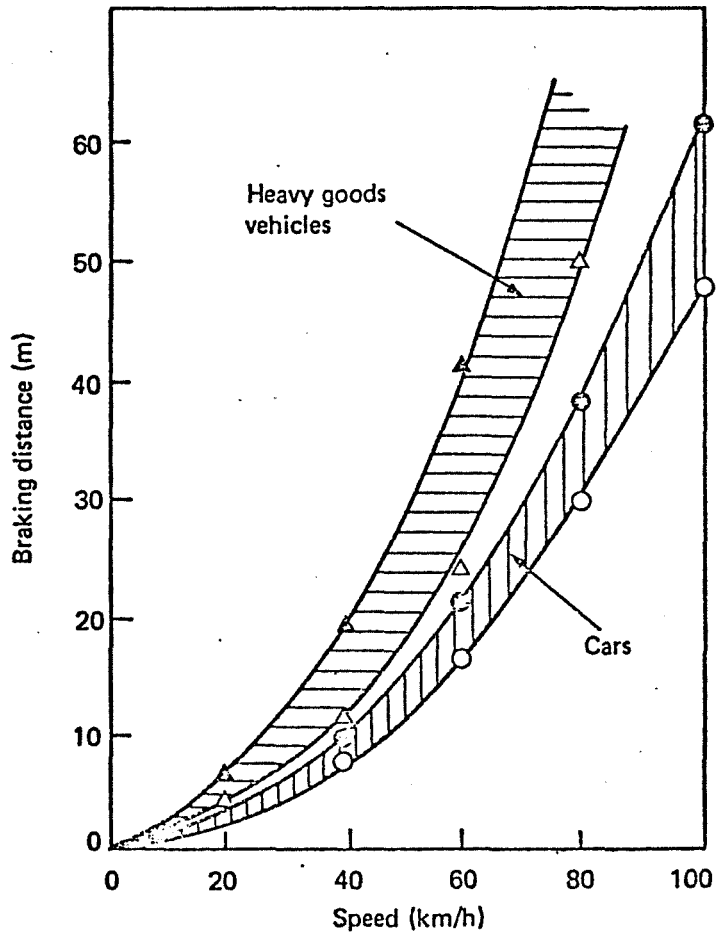


Figure A.1. Braking distances from different speeds of cars and heavy goods vehicles on a dry road. (Source: Neilson et al., 1979).

Annex BEEN EENVOUDIGE BEPALINGSMETHODE VOOR DE SLUIERLUMINANTIE

Uitgangspunten:

- het gezichtsveld is cirkelsymmetrisch; de symmetrie-as valt samen met de kijkrichting.
- het gezichtsveld bestaat uit twee gedeelten. Het binnenste gedeelte is donker ($L=0$). Het wordt begrensd onder een hoek θ_g^0 met de symmetrie-as. Daarbuiten (tot $\theta^0=90^0$) is de luminantie constant en gelijk aan L_b . De hoek θ uitgedrukt in graden wordt aangegeven met θ^0 ; in radialen met θ .
- de betrekking van Stiles-Holladay in zijn integrale vorm kan worden toegepast (voor dit geval nemen we aan dat dit mag tot $\theta^0=90^0$).

Volgens Stiles-Holladay is:

$$\Delta L_{seq} = 10 \frac{E_{\perp}}{\theta^0 2}; E = E \cos \theta^0; E = \frac{I}{R^2}; I = L_b dA$$

Hierin is L_{seq} de equivalente sluieryluminantie; E_{\perp} de verlichtingssterkte op het vlak van het oog; E de verlichtingssterkte ter plaatse van het oog; I de lichtsterkte van een oppervlakte-element dA (van het lichtgevende gedeelte) en R de afstand van dat element tot het oog.

Uitgedrukt in radialen wordt dat:

$$\Delta L_{seq} = \frac{\pi^2 \cdot 10}{180^2} \frac{E_{\perp}}{\theta^2} = 0,00305 \frac{E_{\perp}}{\theta^2}$$

Verder is

$$dA = R^2 d\theta \sin\theta d\varphi$$

waarin φ de azimuthhoek is.

$$\Delta L_{\text{seq}} = 0,00305 L_b \frac{R^2 d\theta \sin\theta \cos\theta d\varphi}{R^2 \theta^2}$$

Zoals te verwachten is, valt R uit de formule weg.

Integratie over het gezichtsveldgedeelte waarvan θ groter is dan een grenswaarde θ_g :

$$L_{\text{seq}} = 0,00305 L_b \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\theta=\theta_g}^{\pi/2} \frac{\sin\theta \cos\theta}{\theta^2} d\theta$$

De eerste integraal (naar $d\varphi$) levert 2π op.

Om het tweede gedeelte van de integraal op te lossen, substitueren we: $2\theta = \alpha$. Aangezien $\theta > 0$ is ook $\alpha > 0$.

Dit levert

$$L_{\text{seq}} = 0,01914 L_b \int_{2\theta_g}^{\pi} \frac{\sin\alpha}{\alpha^2} d\alpha$$

Deze integraal kan alleen via benadering worden opgelost. Daartoe wordt $\sin\alpha$ in een reeks ontwikkeld.

$$\sin\alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \frac{\alpha^9}{9!} \dots\dots$$

$$\text{Hieruit volgt } \frac{\sin\alpha}{\alpha^2} = \frac{1}{\alpha} - \frac{\alpha}{3!} + \frac{\alpha^3}{5!} - \frac{\alpha^5}{7!} + \frac{\alpha^7}{9!} \dots\dots$$

$$\int \frac{\sin\alpha}{\alpha^2} d\alpha = \int \frac{d\alpha}{\alpha} - \frac{1}{3!} \int \alpha d\alpha + \frac{1}{5!} \int \alpha^3 d\alpha - \frac{1}{7!} \int \alpha^5 d\alpha + \frac{1}{9!} \int \alpha^7 d\alpha \dots\dots$$

$$= \left(\ln\alpha - \frac{1}{2 \cdot 3!} \alpha^2 + \frac{1}{4 \cdot 5!} \alpha^4 - \frac{1}{6 \cdot 7!} \alpha^6 + \frac{1}{8 \cdot 9!} \alpha^8 \dots\dots \right) \Bigg|_{2\theta_g}^{\pi}$$

Dit levert op:

$$L_{\text{seq}} = 0,01914 L_b \left[\left(\ln \Pi - \frac{\Pi^2}{12} + \frac{\Pi^4}{480} - \frac{\Pi^6}{30240} + \frac{\Pi^8}{2903040} \dots \right) - \left(\ln(2\theta_g) - \frac{4\theta_g^2}{12} + \frac{16\theta_g^4}{480} - \frac{64\theta_g^6}{30240} \dots \right) \right]$$

Beide termen zijn alternerende reeksen waarvan de termen zeer snel naar 0 naderen. Wat betreft de bovengrens is de som 0,497; voor de ondergrens is het voldoende om alleen de eerste term - dus in $(2\theta_g)$ - in beschouwing te nemen. Alleen wanneer θ_g meer dan 10° bedraagt, levert de tweede term een paar procent bijdrage. Het eindresultaat wordt dus:

$$L_{\text{seq}} = 0,01914 L_b \left(0,497 - \ln(2\theta_g) + \frac{4\theta_g^2}{12} \right)$$

In onderstaande tabel zijn een aantal waarden voor L_{seq} opgegeven voor verschillende waarden van θ_g ; uitgedrukt in L_b .

θ_g° (in graden)	θ_g (in rad)	$\ln(2\theta_g)$	$\frac{(2\theta_g)^2}{12}$	$\frac{L_{\text{seq}}}{L_b}$
0,5 ^{*)}	0,00873	-4,0478	0,00003	0,087
1 ^{*)}	0,01745	-3,3553	0,00010	0,074
2	0,03491	-2,6618	0,00041	0,060
3	0,05236	-2,2565	0,00091	0,053
4	0,06981	-1,9688	0,00162	0,047
6	0,10472	-1,5663	0,00365	0,039
8	0,13962	-1,2757	0,00650	0,034
10	0,17453	-1,0525	0,01015	0,030
12	0,20944	-0,8702	0,01462	0,026
16	0,27925	-0,5825	0,02599	0,021

*) Het is te betwijfelen of de betrekking van Stiles-Holladay voor dergelijke kleine hoeken nog precies geldt.

Annex CVOORBEELDEN VAN GEMETEN WAARDEN VAN DE LUMINANTIE BIJ TUNNELINGANGEN

We zullen volstaan met een paar voorbeelden.

Allereerst metingen met Schreuder (1964, Tabel 27 = hier Tabel C.1.). Dit zijn puntmetingen. Uit de tabel blijkt dat afgezien van glimstroken op het wegdek, meestal de hemel het helderste gedeelte van het gezichtsveld is.

Dit blijkt ook uit de meeste van de metingen die door Holten & Meulders (1979) zijn gedaan in het kader van studies ten behoeve van de NSVV (zie Figuren C.1. t/m C.6.). Verder blijkt uit die metingen dat de horizontale verlichtingssterkte niet veel te maken heeft met de luminantie in het gezichtsveld.

Tenslotte zijn de metingen gegeven die door Adrian (1980) zijn verzameld. Dit zijn rechtstreeks gemeten waarden van de L_{seq} (met behulp van het zgn. Darmstadtapparaat, een handig, klein, maar niet erg nauwkeurig apparaat (zie Gerdes, 1977) om L_{seq} te meten) voor 200 m en 20 m afstand (resp. T en T'). L_2 is de gemeten luminantie in het begin van de tunnel (zie Figuur C.7.).

Place	Eindhoven	Eindhoven	's-Gravenhage	Rotterdam	Velsen	Velsen	Paris	Eindhoven	Oirschot
Tunnel	Bezuiden- houtseweg	Vestdijk	Vaillantlaan	Maastunnel			Orly n° 2	Demer	Flyover
Horizontal ill. (lux)	60 000	ca 40 000	60 000	77 000	ca 85 000	ca 85 000	ca 80 000	34 000	58 000
Time	15.00 h	15.30 h	11.00 h	13.00 h	13.00 h	13.30 h	13.00 h	11.00 h	10.15 h
Date	30-8-'62	30-8-'62	18-10-'62	22-2-'62	8-10-'62	8-10-'62	13-6-'62	3-3-'61	2-2-'62
Direction of observation .	SE → NW	S → N	NW → SE	N → S	S → N	N → S	N → S	S → N	SE → NW
Air (horizon)	—	2 300	—	29 000	6 400	15 000	11 000	8 000	9 000
Tunnelfacade, light area .	12 700	3 600	3 100	1 800	11 000	2 300	—	22 000	12 300
Tunnelfacade, dark area .	—	650	2 600	410	—	850	—	11 000	—
Road surface in sun	2 400	1 400	4 700	2 200	7 300	7 600	2 900	2 800	7 600
Road surface in direction of reflection of the sun	—	4 500	32 000	12 300	14 500	18 000	10 000	—	12 300
Road surface in shade . . .	460	—	2 000	1 400	—	2 400	—	—	—
Tunnel entrance	320	80	—	110	670	350	430	230	—
Grass or other dark area of surround	650	—	—	500	2 200	2 200	2 300	3 300	1 900 - 2 400

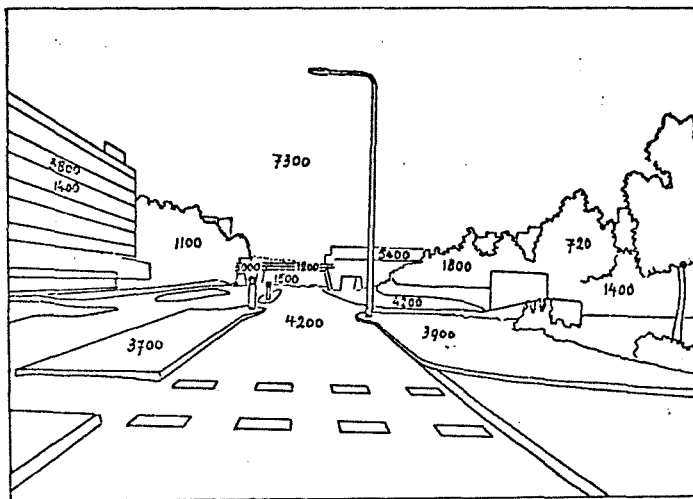
Tabel C.1. Voorbeelden van gemeten waarden van de luminantie bij tunnelingangen. (Bron: Schreuder, 1964, p. 106).

DELFLANDLAAN

viaduct, tunnel

7-8-1979 ca. 14.30 h vrijwel geheel bewolkt
datum tijd weersomstandigheden

ca. 150 m 85 000 lux 5500 cd/m²
afstand tot horizontale gemiddelde luminantie
onderdoorgang verlichtingssterkte in 2 x 10⁰ meethoek



locale luminanties in cd/m²

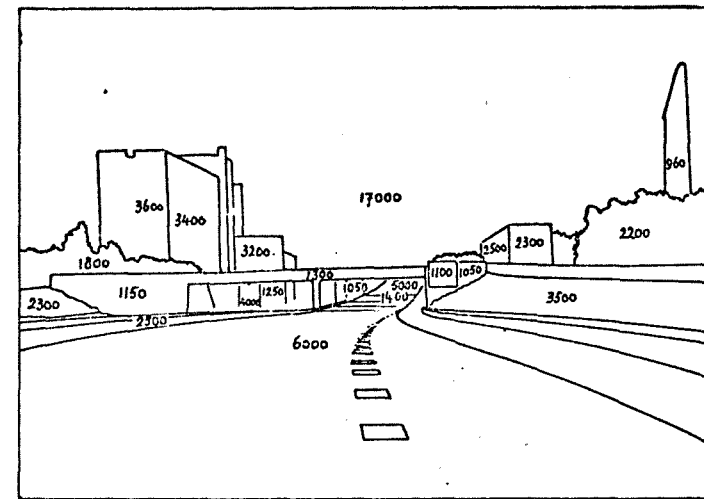
Figure C.3. (Source: Holten & Meulders, 1979).

BOS EN LOMMERWEG

viaduct, tunnel

7-8-1979 ca. 14.00 h zonnig, dun wolkendek
datum tijd weersomstandigheden

ca. 150 m 94 000 lux 8500 cd/m²
afstand tot horizontale gemiddelde luminantie
onderdoorgang verlichtingssterkte in 2 x 10⁰ meethoek



locale luminanties in cd/m²

Figure C.4. (Source: Holten & Meulders, 1979).

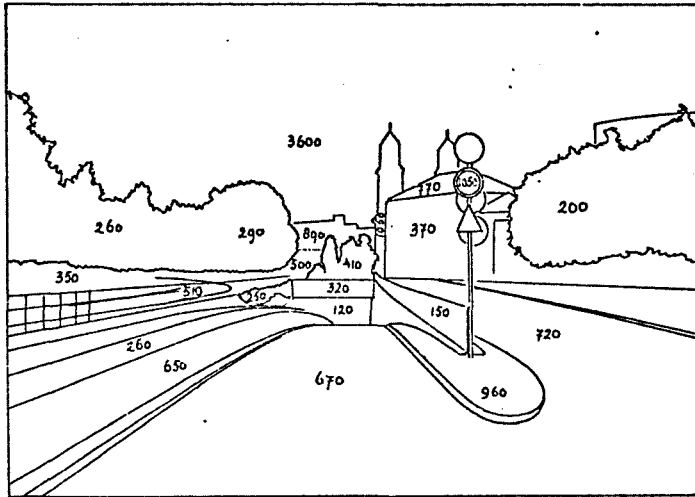
VISSERPLEIN

viaduct, tunnel

7-8-1979 ca. 12.30 h geheel bewolkt

datum tijd weersomstandigheden

ca. 140 m 16 000 lux 1400 cd/m²
afstand tot horizontale gemiddelde luminantie
onderdoorgang verlichtingssterkte in 2 x 10⁰ meethoek



locale luminanties in cd/m²

Figure C.5. (Source: Holten & Meulders, 1979).

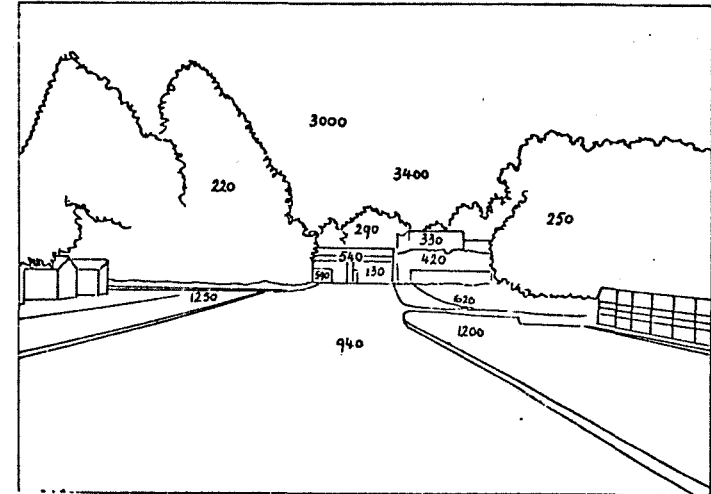
KRUISLAAN

viaduct, tunnel

7-8-1979 ca. 11.30 h geheel bewolkt

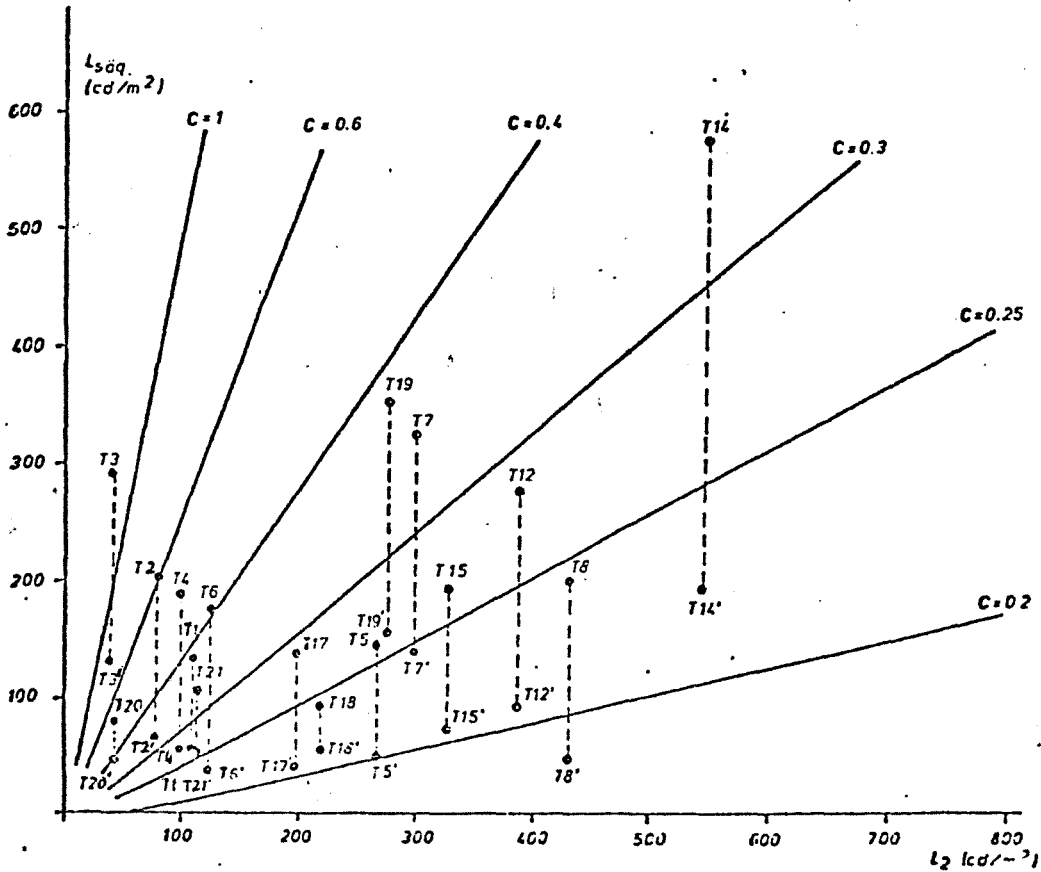
datum tijd weersomstandigheden

ca. 150 m 19 000 lux niet gemeten
afstand tot horizontale gemiddelde luminantie
onderdoorgang verlichtingssterkte in 2 x 10⁰ meethoek



locale luminanties in cd/m²

Figure C.6. (Source: Holten & Meulders, 1979).



T1	Tennozen Tunnel	Japan	T12	Heinenoord Tunnel	Netherlands
T2	Shin-Kobe Tunnel	Japan	T13	Blaak Tunnel	"
T3	Hami Tunnel	Japan	T14	Schiphol Tunnel	"
T4	Senri Unterfuhrung	Japan	T15	Coen Tunnel	"
T5	Underpass	South Africa	T16	Städtunnel (Amsterdam)	"
T6	Underpass	"	T17	Tunnel bei Castellar	France
T7	Tunel de la Plaza de Fernando	Spain	T18	Wiltener Tunnel	Austria
T8	Vlake Tunnel	Netherlands (O-W)	T19	Arlberg Tunnel	Austria
T9	Vlake Tunnel	" (W-O)	T20	Schonegg Tunnel	Switzerland
T10	Drecht Tunnel	" (NW-SO)	T21	Schloßpitz Tunnel	Germany
T11	Drecht Tunnel	" (SO-NW)		(Karlsruhe)	

Required luminances L_2 to perceive a 10' target in the entrance zone. The photometric contrast of the target which has to stay just visible is parameter to the curves. L_{seq} denotes the straylight luminance caused by the environmental field.

The full circles are data obtained from different tunnels, T indicates L_{seq} taken from 200m and T' from 20 m distance to the entrance.

Figure C.7. (Source: Adrian, 1980).

Annex DBESCHRIJVING VAN DE PROEFNEMINGEN (Schreuder, 1964)

De grondgedachte van de proefnemingen was dat waarneming in de tunnel moet worden gedaan terwijl het oog nog geheel aan de buitenluminantie is aangepast. Dit is benaderd door aan een waarnemer een groot scherm met constante luminantie te presenteren. Dit scherm besloeg een hoek, gezien vanuit de plaats van de waarnemer, van $2 \times 10^\circ$. De luminantie was binnen een hoek van $2 \times 5^\circ$ goed gelijkmatig; naar de randen nam de luminantie iets af; zie Narisada (1980), Schreuder (1964, 1965a, 1965c, 1967b). Op een voor de waarnemer bekend moment wordt in dit scherm voor een korte tijd een luikje geopend waardoor de gesimuleerde tunnelingang en het gesimuleerde object daarbinnen, gepresenteerd worden. In Figuur D.1. is een schets gegeven van de bedoelde meetopstelling. De adaptatie vindt plaats gedurende tenminste twee minuten aan het geheel gelijkmatig verlichte scherm. De gedachte was dat deze adaptatiestoestand niet zou veranderen gedurende de korte tijd dat het luikje (de sluiters) werd geopend. De luminantie van het scherm (L_p) zou dan, ook tijdens de presentatie van de gesimuleerde tunnelingang gelijk zijn en blijven aan de adaptatieluminantie L_1 die immers de gemiddelde waarde op de open weg voorstelt. Onder deze aannamen kan direct de van belang zijnde waarde van L_2 worden bepaald. De procedure was als volgt: bij een bepaalde L_p werden L_2 en C (het contrast tussen het object met luminantie L_3 en de achtergrond, dus $C = \frac{L_2 - L_3}{L_2}$) gevarieerd. De waarnemer gas steeds na iedere expositie - die 0,1 seconde duurde - aan of hij het object had gezien. De meetmethode is in detail beschreven in Schreuder (1964, par. 5.1.). De resultaten zijn gegeven in Tabel D.1.

De resultaten van het belangrijkste gedeelte van de onderzoeken kunnen worden weergegeven in formulevorm voor twee waarden van de waarnemingswaarschijnlijkheid p : (voor $300 < L < 10.000$ en $15 < C < 97$)
 voor $p = 50\%$ $\log L_2 = 1,04 + 0,50L_p^{0,2} + 39,1C^{-1,25}$
 voor $p = 75\%$ $\log L_2 = 0,97 + 0,51L_p^{0,2} + 39,1C^{-1,25}$

C wordt in % uitgedrukt. (Hier is, om redenen die verderop nog duidelijk zullen worden, L_p gebruikt voor de luminantie van het scherm in plaats van L_1 zoals in de oorspronkelijke publikatie). De resultaten zijn, voor $p = 75\%$ weergegeven in Figuur D.2. Daarbij is eveneens de door interpolatie gevonden waarde voor $C = 20\%$ uitgezet. Tevens zijn resultaten opgenomen die voor lagere waarden van L_p zijn bepaald.

Over deze proefnemingen, en met name over hun relevantie voor de verlichting van tunnelingangen is het één en ander te doen geweest. Het feit of een object van 7' dat correspondeert met 20 cm op 100 m kan worden gebruikt om de visueel kritische aspecten van de rijtaak te beschrijven, is reeds behandeld (zie par. 5.1.2.). De bij de proeven gebruikte expositietijd was 0,1 s; deze waarde is gekozen omdat als uitgangspunt gebruikt werd de gedachte dat de adaptatie ook tijdens de expositie niet zou dienen te veranderen. Daarom is een zo kort mogelijke tijd gebruikt.

Anderzijds was bekend dat bij exposities aanzienlijk korter dan 0,1 s geheel andere visuele processen een rol gaan spelen.

Tenslotte leek 0,1 s een goede waarde omdat in het verkeer de fixatieprocessen in deze orde van grootte liggen (eeder iets langer). Om een indruk te kunnen krijgen van de invloed van die keuze van deze parameters op het resultaat had, zijn enige aanvullende proeven gedaan waarbij de afmetingen van het object (tussen 7' en 28') en de expositietijden (tussen 0,1 en 0,3 s) zijn gevarieerd (zie Figuren D.3. en D.4.).

Volgens Schreuder (1964, blz. 81) hebben deze veranderingen inderdaad enige invloed, die in het algemeen gesproken niet erg groot zijn. Maar er moet wel degelijk rekening mee worden gehouden wanneer de resultaten met die van andere onderzoekingen worden vergeleken. Een verandering van 0,1 s naar 0,3 s correspondeert met een verandering van ongeveer 0,15 in $\log L_2$. Dit is in redelijke overeenstemming met analoge resultaten van Blackwell (zie Schreuder, 1971a; Narisada & Yoshikawa, 1974).

Bij de verandering van de afmetingen van het object treedt een complicatie op. Deze verandering in hoekmaat is bewerkstelligd

voor de afstand van de waarnemer tot de meetopstelling te veran-
 deren. Niet alleen de hoek waaronder het object werd gezien,
 veranderde, maar ook de hoek waaronder het vlakje met luminantie
 werd gezien (en ook het grote achtergrondscherf). Bij de proef-
 nemingen werd daaraan geen aandacht besteed, omdat het uitgangs-
 punt was een zeer langzame adaptatie. Dan zou een verandering in
 (zie Figuur D.1.) er niet toe doen. Maar wanneer het adaptatie-
 effect kan worden verwaarloosd, en dus op ieder moment, dus ook
 tijdens het open staan van de sluiters, volledige (of ongeveer
 volledige) adaptatie bestaat, is de invloed van α_2 niet te ver-
 waarlozen. Dit blijkt uit de tabel gegeven in Annex B. Hoewel
 de tabel is opgesteld voor een rond binnenveld, mag toch wel
 worden aangenomen dat de verandering van $2 \times 0,5^\circ$ naar $2 \times 1,5^\circ$
 een aanzienlijke invloed kan hebben. Bij een groter vlak is de
 "verblindings" minder, (L_{seq} is kleiner) zodat een kleiner contrast
 nog zichtbaar is. Nu is er bij bedoelde proefnemingen gevonden
 dat bij een overgang van 7' naar 28' het contrast gemiddeld met 21%
 afnemen om zichtbaar te blijven (Schreuder, 1964, blz. 81 en 82).
 Het is in dit geval dus niet te maken welk gedeelte van deze veran-
 deringen geacht moet worden het gevolg te zijn van de toename in
 grootte van het object, en hoeveel van de toename in grootte van
 het achtergrondveldje. Het bedoelde effect (de grootte van het
 object) kan echter nooit meer dan deze 21% (of, omgerekend, 37% in
) uitmaken; waarschijnlijk dus aanzienlijk minder. Het lijkt dus
 gerechtvaardigd om, in eerste benadering en voor zover het het
 visueel kritische object betreft, niet te veel aandacht te beste-
 den aan de afmetingen ervan. Het kan echter wel van belang zijn nog
 eens nadere studie uit te voeren over de invloed van de afmetingen
 van werkelijke objecten. In dit verband is het interessant om te
 vermelden dat Narisada heeft berekend dat de economische winst om
 het grote objecten te rekenen, gering is. Immers, een groter
 object vereist een grotere achtergrond (CIE, 1981).
 Een ander punt betreft de grootte van het gebied met L_p . Het scherm
 van de bedoelde proefnemingen was zo groot tenminste dat een hoek
 van $2 \times 10^\circ$ zowel in horizontale als in verticale richting werd
 overgeslagen. Zou men de proeven uitvoeren met een scherm dat het

gehele gezichtsveld zou beslaan (dus $2 \times 90^\circ$ of nog meer) dan zou een wat grotere L_{seq} te verwachten zijn. Uit de tabel van Annex B kan worden geschat dat deze toename ongeveer 3% zou bedragen.

Adrian (1980) heeft voor dit geval 8,5% berekend.

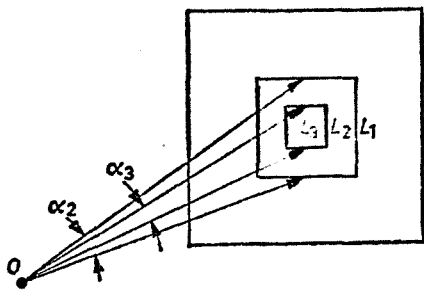
Zoals we al eerder hebben opgemerkt is dit verschil te groot om zonder meer te verwaarlozen. Vermoedelijk gaat het hier om een verwarring tussen verschillende grootheden, maar een nadere studie lijkt gewenst (zie verder par. 6.3.4. en 8.3.1.d.).

Relationship between L_1 and L_2 , both in cd/m^2
(from Table 20a)

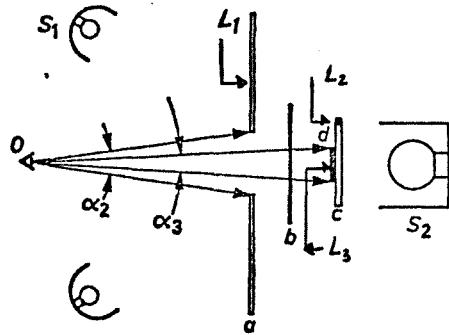
L_1	C(%)			
	15	26.8	56.7	96.8
9 550	3 250	710	280	205
3 000	815	180	71	51
2 400	560	105		37
1 000	260	56	23	16
320		16.5		
300	81	17.5	7.1	5.1
100		6.9		
10		1.3		
3.2		0.89	0.42	0.31
1		0.42		

$p = 75\%$ $\alpha_2 = 1^\circ$ $\alpha_3 = 7'$ $t = 0.1 \text{ sec}$

Tabel D.1. Average values of results of experiments. (Source: Schreuder, 1964, p. 76).



$\alpha_2 = 1^\circ$
 $\alpha_3 = 7^\circ$



a = screen d = object
 b = shutter S_1, S_2 = lamps
 c = glass slide O = observer

Figure D.1. Outline (a) and diagram (b) of the experimental set-up for test on induction. (Source: Schreuder, 1964, p. 67).

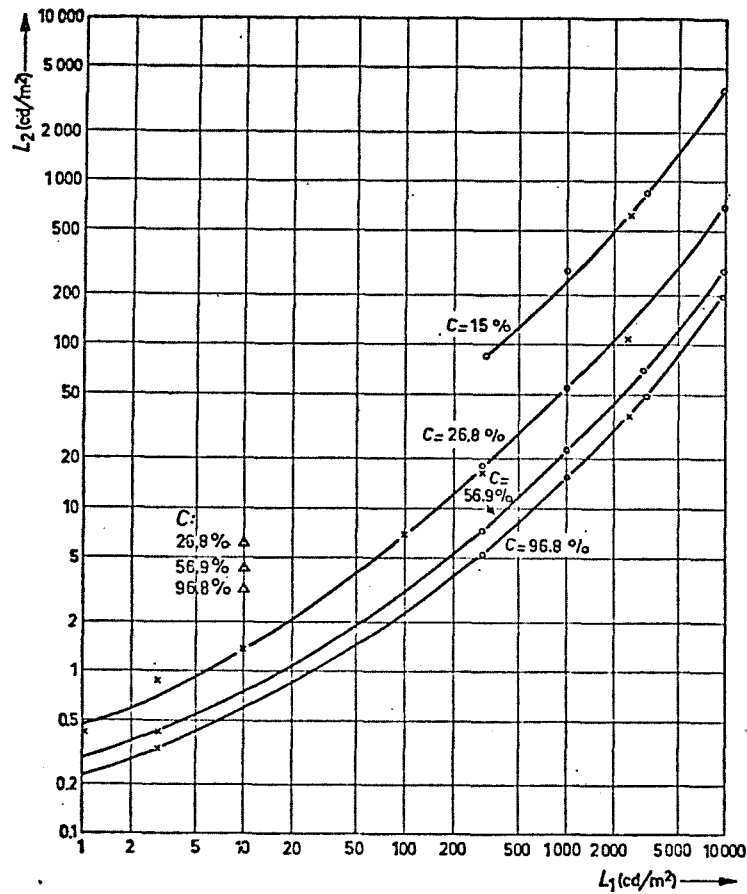


Figure D.2.a. Relationship between the outer luminance L_1 and the minimum luminance L_2 in the tunnel for different values of the contrast C . o Group 1; x Group 2; Δ Group 4. (Source: Schreuder, 1964, p. 77).

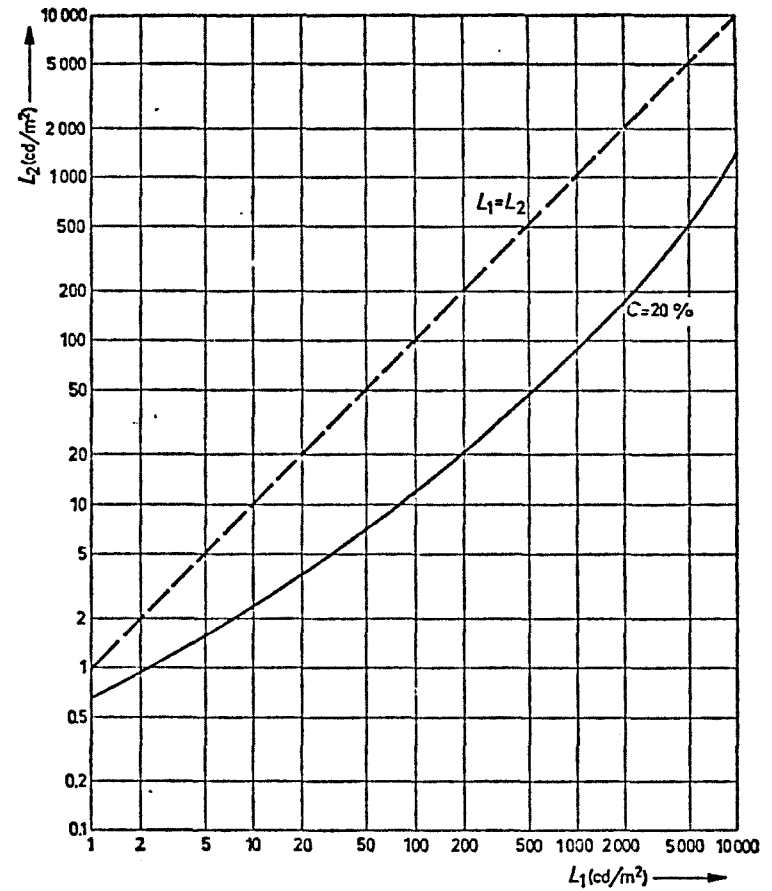


Figure D.2.b. Relationship between L_1 and L_2 for an object of 7' with a contrast of 20% to be visible in 75% of cases when it is displayed for 0,1 s ($L_3 < L_2 < L_1$). (Source: Schreuder, 1964, p. 8).

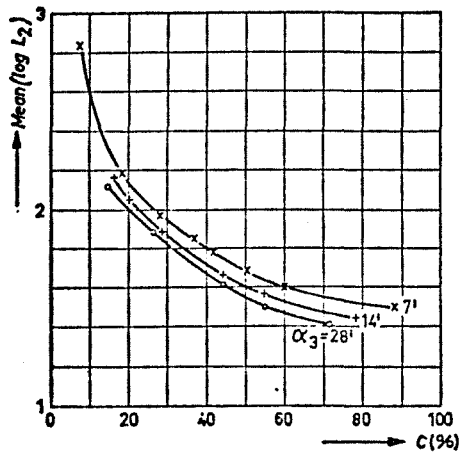


Figure D.3. Influence of variations of α_3 on the mean of $\log L_2$.
 (Source: Schreuder, 1964, p. 81).

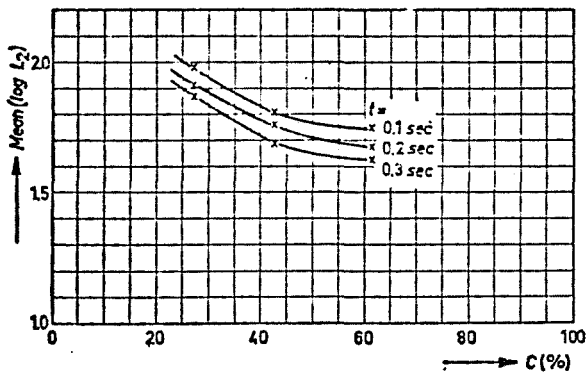


Figure D.4. Influence of variations of τ on the mean of $\log L_2$.
 (Source: Schreuder, 1964, p. 81).

Annex ESAMENVATTING VAN TUNNEL ENTRANCE LIGHTING (CIE, 1981)

De SC3 (tunnelverlichting) van de CIE TC-4.6. Road Lighting heeft een technisch rapport ter hand genomen dat de ingangsverlichting van tunnels behandelt. De titel van het tiende ontwerp is "Tunnel entrance lighting; A survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone".

Het rapport is nog niet voltooid, maar het heeft min of meer het eindstadium bereikt. In deze Annex wordt een korte samenvatting van dit rapport gegeven. Daarbij is de tekst van dit 10de ontwerp (mei 1981) gebruikt. We wijzen erop dat met name nog een aanzienlijke redactionele omwerking verwacht wordt. Hetgeen hierna volgt is dus zeer waarschijnlijk niet de definitieve tekst.

Final conclusions

1. The visual task of a driver approaching a tunnel can be described in terms of the visibility of a square object with an apparent size of 7' x 7' presented for 0.1 second or 0.2 second. This is realistic as long as the luminance contrast of the object (C) chosen lies between about 20% and 30%.

This object is used only to describe the visual task. However, this object should not be taken as an example of the obstacles that may be critically dangerous for road traffic.

2. The experimental basis of the present CIE recommendations is applicable. Probably due to physiological effects associated in the experiments, the values for L_2 given by the CIE experimental basis, however, might be slightly higher for high values of L_1 ($= L_1'$). As these high values of L_1' (with respect to L_0) hardly ever occur in practice, it might be justifiable to leave this point as it is. The subject, however, must be discussed in TC-4.6 in the future.

3. Based on the above, the luminance ratios can be suggested as follows, according to the 'class' of the tunnel, by combining the duration of the object presentation (t_1) and the luminance contrast (C) mentioned above. The following ratios can be suggested as two extreme examples.

'Class A'; $L_2/L_1 = 12.5\%$ (or 10%), $t_1 = 0.1$ second, $C = 20\%$ for tunnels with very important, very heavy and very fast traffic,

'Class B'; $L_2/L_1 = 4.5\%$ (or 5%), ($t_1 = 0.2$ second, $C = 30\%$), for tunnels with less important, light and low speed traffic.

4. In order to derive the equivalent luminance of the standard field (L'_1) of the driver's eyes during approach, a method utilizing measured values of L_{af} and L_{seq} , based on the relationship between the measured values and the luminance difference thresholds, can be used.

To determine the necessary luminance in the threshold zone (L_2), the experimental basis above can be applied.

5. The luminance in the access zone (L_0), defined as the luminance measured in the direction of travel with a circular measuring field of 2×10 in such a way that the centre of the measuring field coincides with the centre of the tunnel mouth, can be applied as an approximation of the equivalent luminance of the standard field (L'_1) at the point of measurement, when this L_0 is multiplied by a factor of 1.5.

6. The relatively dark tunnel in the central part of the field of vision of the driver influences considerably the equivalent luminance of the standard field during approach. The luminance in the threshold zone must be determined, taking the braking distance for designated driving speed into account.

7. The veiling effect caused by atmospheric haze in the access zone is considerable. It is therefore dangerous to reduce the luminance in the threshold zone from the required level to a lower one, taking only economics into consideration.

The accuracy of the highest luminance in the access zone according to which the luminance in the threshold zone is assessed does not greatly influence the operational cost of a tunnel lighting installation but only the initial installation cost, as long as an appropriate dimming and/or switching system controlled by a luminance detector which measures the luminance in the access zone is incorporated.

Annex FGEGEVENS OVER TUNNELS MET CONTRASTVERLICHTING

Op de vergadering van SC3 van de CIE TC-4.6 in mei 1981 zijn door de Zwitserse delegatie een aantal gegevens verschaft over de verlichting van een aantal moderne tunnels met contrastverlichting (Gegenstrahlbeleuchtung). Het gaat hier om de zuidelijke ingang van de Gotthard-tunnel, om de Quinto- en Stalvedrotunnels die in de zuidelijke toegangsweg van de Gotthard-tunnel liggen, om de Seelisbergtunnel tussen Luzern en de Gotthard, en om de Rugen-tunnel in de autosnelweg die om Interlaken heen gaat. Behalve de Gotthard-tunnel gaat het in alle gevallen over tunnels met twee buizen en 2 x 2 rijstroken in autosnelwegen.

De meetgegevens zijn bijeengebracht in Tabel F.1.

Tunnel		Gotthard tunnelingang	Quinto	Stalvedro	Seelisberg	Rugen
wegdek	q_o	0,066	0,0495	0,0611	0,120	0,10
	S1	-	-	-	-	1,37
	S2	4,5	2,49	1,76	3,2	3,19
vermogen	W/m^2	78	40	47	59	32
wandverlichting	lux	1000	854	1012	1320	-
	cd/m^2	150	138	152	220	-
wegdekverlichting	E_h	2745	2530	2105	2260	1240
	E_v	700	419	481-156	720	141
	L_f	237	96	152-210	228	130
	E_h/L_f	11,6	26,3	10,0	9,9	-
luminantieopbrengst	cd/m^2 per W/m^2	3,04	2,4	4,5	3,86	4,07
idem voor $q_o = 0,1$		4,06	4,85	7,3	3,22	4,07
sluierluminantie	L_{seq}	41	28	11,7	32	-
asymmetrie	E_v/L_f	2,95	4,36	0,74	3,16	1,08
uitzichthoek	graden	75	60	10	60	-
armatuurplaatsing		opzij	opzij	boven rijbaan	opzij	boven rijbaan

Ongepubliceerde metingen gepresenteerd bij CIE TC-4.6 SC3 vergadering, mei 1981.

Tabel F.1. (Source: CIE, 1981).

BIBLIOGRAFIE

bij

DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN

Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange
tunnels

BIBLIOGRAFIE

AASHO (1954). A policy on geometric design of rural highways. AASHO, Washington, D.C., 1954. (Aangehaald door Baerwald (ed.), 1965).

Adrian, W. (1961). Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. *Lichttechnik* 13 (1961) 450-454; 508-511; 558-562.

Adrian, W. (1963). Über die Sichtbarkeit von Strassenverkehr-Signalen. *Lichttechnik* 15 (1963) 115-118.

Adrian, W. (1964). Zur Blendungsbewertung bei der Beleuchtung von Strassen. *Lichttechnik* 16 (1964) 541-546.

Adrian, W. (1965). Neuere Untersuchungen der spektralen Sehschärfe und ihre Bedeutung für das Farbensehen. Luzern, 1965.

Adrian, W. (1969). Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Bewertung. *Lichttechnik* 21 (1969) 2A-7A.

Adrian, W. (1976). Method of calculating the required luminances in tunnel entrances. *Lighting Res. & Technol.* 8 (1976) 103-106.

Adrian, W. (1978). Method for calculating the luminance difference threshold. Universität Karlsruhe (jaartal geschat: 1978).

Adrian, W. (1978a). Bericht über Messungen des Schönegg-Tunnels. Universität Karlsruhe, 1978. (Not published).

Adrian, W. (1979). Zur Frage der notwendigen Leuchtdichte in der Einfahrtzone von Tunneln. *ÖZE* 26 (1979) 4: 2-4.

Adrian, W. (1980). Investigations on the required luminance in tunnel entrances. Conference paper CIBS Annual Conference, Canterbury, 1980. (Not published).

Adrian, W.; Eberbach, K. (1969). On the relationship between the visual threshold and the size of the surrounding field. *Lighting Res. & Technol.* 1 (1969) 251-254.

Adrian, W.; Kokoschka, S. (1965). Zur Abhängigkeit der fovealen Sehschärfe von der Wellenlänge des Lichtes. *Lichttechnik* 17 (1965) 32A-38A.

Adrian, W.; Schreuder, D.A. (1968). The assessment of glare in street lighting. *Light & Lighting* 61 (1968) 360-361.

Adrian, W.; Schreuder, D.A. (1970). A simple method for the appraisal of glare in street lighting. *Lighting Res. & Technol.* 2 (1970) 61-73.

Adrian, W.; Schreuder, D.A. (1971). A modification of the method for the appraisal of the glare in street lighting. CIE, Barcelona, 1971.

Agent, K.R. (1980). Transverse pavement markings for speed control and accident reduction. TRB-Record 773, pp. 11-14. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1980.

Aleswerth, R. (1978). Anordnung von Blockierverhinderern bei Sattelkraftfahrzeugen; Eine Simulationsrechnung. *Automobiltechnische Z.* 80 (1978) 213-220.

Alexander, F.G.; Selesnik, S.T. (1966). The history of psychiatry. Mentor Book MW 812. NAL, New York, 1966.

Allen, M.J. (1969). Automobile windshield surface deterioration. *Am. Journ. of Optometry* (1969) 594-598.

Allen, M.J. (1970). Vision and highway safety. Chilton Book Cie, New York, 1970.

Allen, M.J. (1974). Windscreen dirt and surface damage effects. *Australian Road Res.* 5 (1974) 6: 7-19.

Alpern, M.; Campbell, F.W. (1962). The behaviour of the pupil during dark-adaptation. J. Physiol. (London) (1962) 165: 5P-6P.

Ambrose, J.M.; Hayhoe, M.M. (1980). Surround configuration and cone dark adaptation. Vision Research 20 (1980) 883-890.

ANON (1938). Ceiling louvres graduate light at tunnel approach. Electrical World 110 (1938) 861, 928.

ANON (1955). Essais comparatifs internationaux. Rapport GTB 182. GTB, Bruxelles, 1955.

ANON (1958). Code de bonne pratique de l'éclairage public. Electricité de France, 1958.

ANON (1960). Comité des tunnels routiers, Exposé et observations. Ass. Int. Perm. des Congrès Route PIARC (jaartal geschat: 1960).

ANON (1963). Aanbevelingen voor tunnelverlichting. Electrotechniek 41 (1963) 23; 46.

ANON (1965). Highway capacity manual 1965. Highway Research Board, Washington, D.C., 1965.

ANON (1965a). A policy on geometric design of rural highways. AASHO, Washington, D.C., 1965.

ANON (1967). Report of the Technical Committee on road tunnels. XIII Congress PIARC, Tokyo, 1967.

ANON (1967a). De verlichting van drie nieuwe verkeerstunnels. Licht (1967) 89/90: 1-24.

ANON (1968). Leitsätze für öffentliche Beleuchtung. 2. Teil. Strassentunnel und -unterführungen. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Zürich, 1968.

- ANON (1970). Tenth international study week in Traffic and safety engineering OTA, Rotterdam, 1970.
- ANON (1971). Comité des tunnels routiers, Documentation et études. XIV Congrès PIARC, Prague, 1971.
- ANON (1971a). Beurteilung einer Tunnelbeleuchtungsanlage durch Verkehrsteilnehmer. Licht und Beleuchtung 18 (1971) 5-20.
- ANON (1971b). The perception and application of flashing lights. Hilger, London, 1971.
- ANON (1972). Intertraffic '72, Internationaal Congres over Verkeers-techniek, 25 mei 1972. RAI, Amsterdam, 1972.
- ANON (1972a). Lighting of tunnels. Journal of IES (1972) 247-255.
- ANON (1972b). Handbook of sensory physiology. Springer, Berlin, 1972.
- ANON (1972c). Notulen Commissie Openbare Verlichting. 30 maart 1972. (Bijlage: Niet gepubliceerd). NSVV, Arnhem, 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 (1974a). Wegontwerp en wegverlichting tegen de achtergrond van de verkeersveiligheid; Pre-adviezen Congresdag 6 december 1974. Het Nederlandse Wegencongres, Den Haag, 1974.
- ANON (1974b). Intertraffic '74. Internationaal Congres over Verkeers-techniek: "Beheerst verkeer". RAI, Amsterdam, 1974.
- ANON (1974c). Wegverlichting en oppervlaktetextuur. Mededeling No. 34. SCW, Arnhem, 1974.

ANON (1974d). Das Prinzip der Gegenstrahlbeleuchtung für Strassentunnels. Alumagazin (1974) 28 (April).

ANON (1975). Woonerven. Groene reeks No. 21. VNG, Den Haag, 1975.

ANON (1975a). Tunnel onder Elbe slaat vele records. Leids Dagblad (1975) 9 januari.

ANON (1975b). Sicheres Fahren durch den Hamburger Elbtunnel. Lichttechnik 27 (1975) 97.

ANON (1975c). Strassen-Unterflur-Leuchten dirigieren den Autofahrer zur richtigen Einfahrt des Neuen Elbtunnels von Hamburg. Lichttechnik 27 (1975) 98-99.

ANON (1975d). Report of the Technical Committee on Road tunnels. XV Congress PIARC, Mexico, 1975.

ANON (1975e). Wegenverkeersreglement, Artikel 73 (wijziging 1975). Staatsuitgeverij, Den Haag, 1975.

ANON (1975f). Proceedings of the First International Congress on Vision and road safety, Paris, 1975.

ANON (1976). Statement of the Commission Internationale de l'Eclairage on vehicle front lighting used on urban traffic routes. CIE Bull. (1976) (Jan.) 6-7.

ANON (1977). Lighting of the Gotthard-tunnel. Public Lighting 42 (1977) 142: 157.

ANON (1977a). Subways, expressways, tunnels: Hong Kong's transit explosion. Transportation Research News (1977) 71: 21-24.

ANON (1977b). Thorold tunnel visibility study. Final edition. Ministry of Transport and Communication & Fenco Ltd. Ontario, 1977.

ANON (1977c). Tunnelbeleuchtungsanlagen. Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft, Fachgruppe Tunnelbeleuchtung, Zürich, 1977.

ANON (1977d). Kongressbericht 1977 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e.V. Unfall- und Sicherheitsforschung. Strassenverkehr. Heft 10. Bundesanstalt für Strassenwesen, Köln, 1977.

ANON (1978). Tunneltagung - Innsbruck, 12 oktober 1978. Österreichische Lichttechnische Arbeitsgemeinschaft, 1978.

ANON (1978a). Beoordeling korte tunnels, 6 oktober 1978. NSVV, Arnhem, 1978. (Niet gepubliceerd).

ANON (1978b). Bericht über Messung der Schöneegg-Tunnels vom 17-2-1978. (Not published).

ANON (1979). Drecht-tunnel, Dordrecht. ILR 30 (1979) 74-75.

ANON (1979a). Mont-Blanc tunnel. ILR 30 (1979) 78-79.

ANON (1979b). Report of the Technical Committee on Road tunnels. XV Road World Congress PIARC, Vienna, 1979.

ANON (1979c). Definitions and general consideration. Unpublished report to SC 3 of CIE TC-4.6.

ANON (1979d). Politie-varia. Algemeen Politieblad (1979) 11: 272.

ANON (1979e). Road safety at night. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1979.

ANON (1979f). Study of the visual environment, Introduction: IERI (1979) 5-22.

ANON (1980). Nationaal Verkeersveiligheidscongres 1980, Congresverslag. ANWB, Den Haag, 1980.

- ANON (1980a). Nadelöhr beseitigt. Automobilrevue 75 (1980) 51: 4.
- ANON (1980b). 2nd. International Congress on Vision and road safety, 20-22 November 1980. Prevention Routière, Paris, 1980.
- ANON (1980c). Die Technik des Gotthard-Strassentunnel, Teil 2. Int. Verkehrswesen 32 (1980) 372-373.
- ANON (1980d). Die Technik des Gotthard-Strassentunnel, Teil 3. Int. Verkehrswesen 32 (1980) 456-457.
- ANON (1980e). World's longest road tunnel opened. World Highways 31 (1980) 11: 1-2.
- ANON (1980f). First underground route between Africa and Asia nears completion. World Highways 31 (1980) 10: 3.
- ANON (1980g). Rotterdamse Botlektunnel geopend en overgedragen aan het rijk. Wegen 54 (1980) 115-116.
- ANON (1980h). Snelheidsmetingen uitgevoerd in de Drecht-tunnel. Universiteit Aken, 1980. (Niet gepubliceerd).
- ANON (1980j). Visuele gevoeligheid. De macht van het kleine 83 (1980) 2: 6.
- ANON (1980k). Die Technik des Gotthard-Strassentunnel, Teil 1. Int. Verkehrswesen 32 (1980) 3.
- ANON (1981). Road materials and construction. Documentation TS 4. IVth IRF World Meeting, 1-5 June 1981. International Road Federation, Stockholm, 1981.
- ANON (1981a). Schrägstrahl-Gegenstrahl-Tunnelbeleuchtungsprinzip. Bernische Kraftverkehr AG, Bern, 1981.

ANON (1981b). Suez Canal road tunnel opens new era for Egypt. World Highways 32 (1981) 3: 10.

Antis, S.M. (1979). Interactions between simultaneous contrast and adaptation to gradual change in luminance. Perception 8 (1979) 487-495.

ANWB (1976). De inrichting van een woonerf. ANWB, Den Haag, 1976.

Arild, A. (1975). Submerged floating tunnel as possible deep water crossing in Norway. PIARC, Mexico, 1975. (Aangehaald door Flaate & Janbu (1981)).

Armington, J.C.; Krauskopf, J.; Wooten, B.R. (eds.) (1978). Visual psychophysics and physiology. Academic Press, New York, 1978.

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 verkeersdeelnemer als uitgangspunt voor het gebruik van hulpmiddelen in het verkeer. In: ANON (1972).

Asmussen, E. (1974). Functionele eisen van een toekomstig verkeerssysteem. R-74-15. SWOV, Voorburg, 1974. Ook in: ANON (1974b).

Asmussen, E. (1976). Beleid onderbouwd. R-76-25. SWOV, Voorburg, 1976. Ook in: SWOV (1976).

Asmussen, E. (1979). Systeemonveiligheid: een inventarisatie van de toestand. Publikatie 1979-2N. SWOV, Voorburg, 1979.

Asmussen, E. (1980). Ongelijkheid en ongelijkwaardigheid in het verkeer; De risico's van confrontatie tussen verkeersdeelnemers van verschillende categorie. R-80-10 en R-80-43. SWOV, Voorburg, 1980.

Asmussen, E.; Schreuder, D.A. (1977). Forschungsgesellschaft für Verkehrssicherheit SWOV: Ein Porträt. R-77-30. SWOV, Voorburg, 1977. Ook in: Z. f. Verkehrssicherheit 24 (1978) 3-10.

Attwood, D.A. (1976). Review of rear lighting research with emphasis on studies which examined the effects of colour and/or functional separation. RSU Technical Memo No. 77 X 2. Transport Canada, Ottawa, 1976.

Audier, J.C.; Prevot, M.; Sarteel, F. (1970). Mesure des luminances dans les zones d'approche de tunnels de l'agglomération Bruxelloise. Ministère des Travaux Publics, Bruxelles, 1970.

Baba, T.; Nakamichi, F.; Konda, T. (1967). Visibility and lighting characteristics of vehicular traffic tunnels. Paper 67-13. CIE, Washington, D.C., 1967.

Baerwald, J.E. (ed.) (1965). Traffic engineering handbook. 3rd edition. ITE, Washington, D.C., 1965.

Baker, H.D.; Doran, M.; Miller, K.E. (1959). Early dark adaptation to dim luminances. Journ. Opt. Soc. Amer. 49 (1959) 1065.

Baker, J.S.; W.R. Stebbing; E.M. Johnson (1960). Dictionary of Highway Traffic. Northwestern University, Evanston, Ill., 1960.

Balder, J.J. (1956). Stadslichten op goed verlichte wegen. Wegen 30 (1956) 83.

Balder, J.J.; Fortuin, G.J. (1955). The influence of time of observation on the visibility of stationary objects. CIE, Zürich, 1955.

Balder, J.J.; Schreuder, D.A. (1959). Problems in tunnel lighting. ILR 10 (1959) 24-26.

Barlow, H.B. (1972). Dark and light adaptation: Psychophysics. Vol. VII/4, Chapter 1 in ANON (1972b).

- Barlow, H.B.; Sparrock, J.M.B. (1964). The role of after-images in dark adaptation. *Science* 144 (1964) 1309-1314.
- Barnett, S.A. (1970). *Instinct and intelligence*. Revised edition. Penguin Books, Harmondsworth, 1970.
- Barthès, E. (1966). L'Éclairage des tunnels longs. *Lux* (1966) 38: 245-251.
- Bartley, S.H.; Nelson, T.M. (1961). Further study of pulse-to-cycle fraction and critical flicker frequency. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 51 (1961) 41-45.
- Baumann, E. (1980). NZ Beckenried - Flüelen: Strecke frei. *Automobilrevue* 75 (1980) 51: 1-3.
- Baumann, E. (1980a). Grünes Licht im Gotthard. *Automobilrevue* 75 (1980) 37: 2-3.
- Benz, C. (1966). Untersuchungen über die psychologische Blendung bei Umfeldleuchtdichten im mesopischen Bereich. Diss. Universität Karlsruhe, 1966.
- Berek, M. (1943). Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen. *Z. f. Instrumentenkunde* 63 (1943) 297.
- Beyer, E. (1980). Lärmbekämpfung durch neuartige Formgebung bei Verkehrsbauten. *TIS* 1/80.
- Bhise, V.D.; Farber, E.I.; McMahan, P.B. (1975). Prediction target-detection distance with headlights. *TRR No. 611* (jaartal geschat: 1975).
- Bindels, J.T.H. (1973). Factoren die de visuele waarneming bij autoverlichting beïnvloeden. *De Ingenieur* 85 (1973) 65-70.
- Binnie, C.D. (1980). Private communication.

Binnie, C.D.; De Korte, R.A.; Wisman, T. (1979). Fluorescent lighting and epilepsy. *Epilepsia* 20 (1979) 725-727.

Blaauw, G.J. (1977). Persoonlijke mededeling.

Blaauw, G.J. (1979). Het autorijden als cybernetische taak. Rapport 1979-6. IZF, Soesterberg, 1979.

Blaauw, G.J. (1980). Cybernetics and car driving; A driver model and its experimental validation. Report 1980-13. IZF, Soesterberg, 1980.

Blaauw, G.J. (1980a). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car, Progress report II. Report 1980-9. IZF, Soesterberg, 1980.

Blaauw, G.J. (1980b). Nighttime visibility of roadway delineation on wet roads. In: ANON (1980b).

Blaauw, G.J.; Leebeek, H.J. (1974). Aquaduct in RW4. IZF, Soesterberg, 1974.

Blaauw, G.J.; Riemersma, J.B.J. (1975). Interpretation of roadway designs by an analysis of driver's visual scanning and driving behaviour on straight and curved roadway sections. Report C5. IZF, Soesterberg, 1975.

Blaauw, G.J.; Van der Horst, A.R.A. (1981). Rijgedrag bij tunnelwanden: Voorstel voor onderzoek. IZF, Soesterberg, 1981. (Niet gepubliceerd).

Blackwell, H.R. (1946). Contrast thresholds of the human eye. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 36 (1946) 624-643.

Blackwell, H.R. (1955). The use of visual brightness discrimination data in illuminating engineering. CIE, Zürich, 1955.

Blackwell, H.R. (1959). Development and use of a quantitative method for specification of interior illumination levels on the basis of performance data. *Illum. Engng.* 54 (1959) 317-353.

Blackwell, H.R. (1966). Light and vision. In: Lighting Handbook. 4th edition, pp. 2-8. IES, New York, 1966.

Blackwell, H.R. (1969). Fixation accuracy and task visibility as indices of required illumination levels. Illum. Engng. 64 (1969) 214-216.

Blackwell, H.R. (1969a). A more complete quantitative method for specification of interior illumination levels on the basis of performance data. Illum. Engng. 64 (1969) 289-295.

Blackwell, H.R. (1976). Energy conservation by selective lighting standards, graded in terms of task and observer characteristics. Lighting Design & Appl. 6 (1976) 17-29.

Blackwell, H.R. (1979). A proposed method for establishing quantitative standards of task illuminance based upon visual performance criteria. Ohio State University, Columbus, 1979.

Blackwell, O.M.; Blackwell, H.R. (1971). Visual performance data for 156 normal observers of various ages. Journ. IES (1971) 3-13.

Blackwell, O.M.; Blackwell, H.R. (1977). A proposed procedure for predicting performance aspects of roadway lighting in terms of visibility. Journ. IES (1977) 148-166.

Blackwell, H.R.; Blackwell, O.M. (1977a). Population data for 140 20-30 year olds for use in assessing the effects of lighting upon visual performance. Ohio State University, Columbus, 1977.

Blackwell, H.R.; Blackwell, O.M. (1977b). A basic task performance assessment of roadway luminous environments. In: CIE (1977).

Blackwell, O.M.; Blackwell, H.R. (1979). Individual responses to lighting parameters for a population of 234 observers of varying ages. Ohio State University, Columbus, 1979.

Blackwell, H.R.; Scott, D.E. (1976). Analysis of visual performance data obtained as a Landolt-ring task without response limitation. Journ. IES (1976) 445-460.

Blackwell, H.R.; Tsou, B.H.P. (1976). A mathematical model for visual adaptation during exposure to luminance transients. Ohio State University, Columbus, 1976.

Blakemore, C.B.; Rushton, W.A.H. (1965). Dark adaptation and increment threshold in a red monochromat. J. Physiol. (London) (1965) 181: 612-628.

Blakemore, C.B.; Rushton, W.A.H. (1965a). The red increment threshold during dark adaptation in normal and red monochromat. J. Physiol. (London) (1965) 181: 629-640.

Blaser, P. (1981). Die Gegenstrahlbeleuchtung in der Einfahrzone von Strassentunnel. Eidgenössisches Amt für Messwezen, 1981. (To be published in Bull. SEV).

Bloembergen, P. (1972). Ongepubliceerde mededeling.

Bodmann, H.W. (1973). Visibility assessments in lighting engineering. Journ. IES (1973) 437-443.

Boettner, E.A.; Reimer, J. (1962). Transmission of the ocular media. Invest. Ophth. 1 (1962) 776.

Bonomo, M. (1980). Lighting of the threshold zone in motorway tunnels. (Unpublished report to SC 3 of CIE TC-4.6.).

Boon, J.W.; Breedveld, P. (1980). De corrosie van aluminium in de Nederlandse atmosfeer. Polytechnisch Tijdschrift B 35 (1980) 17-28.

Botma, H. (1976). Het basisdiagram, een macroscopisch verkeersstroommodel. Verkeerskunde 27 (1976) 392-397.

Botma, H. (1977/78). State of the art rapport "Verkeersstroommodellen", deel I t/m X. SWOV, Voorburg, 1977/78.

Bouma, H. (1965). Receptive systems; Mediating certain light reactions of the pupil of the human eye. TH-Eindhoven, 1965.

Bouma, H. (1978). Visual search and reading: Eye movements and functional visual field. In: Requin (ed.) (1978).

Bouman, P.J. (1936). Characteristics of the eye with special reference to road lighting. Philips Techn. Rev. 4 (1936) 102.

Boyce, P.R. (1978). Variability of contrast rendering factor in lighting installations. Lighting Res. & Technol. 10 (1978) 94-105.

Boynton, R.M. (1967). Visibility losses caused by sudden luminance changes. CIE, Washington, D.C., 1967.

Boynton, R.M.; Boss, D.E. (1971). The effect of background luminance and contrast upon visual search performance. Illum. Engng. 66 (1971) 173.

Boynton, R.M.; Enoch, J.M.; Bush, W.R. (1954). Rapid changes in foveal sensitivity resulting from direct and indirect adapting stimuli. Journ. Opt. Soc. Amer. 44 (1954) 56-60.

Boynton, R.M.; Kandel, G. (1957). On response in the human visual system as a function of adaptation level. Journ. Opt. Soc. Amer. 47 (1957) 255-286.

Boynton, R.M.; Miller, N.D. (1963). Visual performance under conditions of transient adaptation. Illum. Engng. 58 (1963) 541.

Boynton, R.M.; Rinalducci, E.J.; Sternheim, C. (1969). Visibility losses produced by transient adaptational changes in the range from 0.4 to 4000 Footlamberts. Illum. Engng. 64 (1969) 217.

- Boynton, R.M.; Corwin, T.R.; Sternheim, C. (1970). Visibility losses produced by flash adaptation. *Illum. Engng.* 65 (1970) 259.
- Brandtzaeg, A. (1972). Concrete underwater floating tunnels. *Proceedings Federation Internationale de Precontraint*, Tbilisi, 1972, pp. 42-47. Aangehaald door Flaate & Janbu (1981).
- Brass, J.R.; Skootsky, H.; Trosper, G.A. (1957). A new approach to highway tunnel lighting. *Illum. Engng.* 52 (1957) 137-143.
- Brown, J.A.C. (1967). *Freud and the Post-Freudians*. Revised edition. Penguin, Harmondsworth, 1967.
- Brown, J.L. (1965). Afterimages. Chapter 17 in Graham (ed.) (1965).
- Brunia, C.H.M. (1976). Activatie en emotie. Hoofdstuk 9 in Michon et al. (eds.) (1976).
- Buffart, H.F.J.M. (1978). Brightness and contrast. Chapter 8 in Leeuwenberg & Buffart (eds.) (1978).
- 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).
- Busson, A. (1960). Les éclairages de la traversée routière et des grands espaces de l'aéroport d'Orly. *Lux* (1960) 13: 105-117.
- Byers, H.R. (1965). *Elements of cloud physics*. Univ. Press, Chicago, 1965.

Cakir, A.; Krochmann, J. (1971). A note on the equivalent luminance and spectral luminous efficiency of the human eye within the mesopic range. *Lighting Res. & Technol.* 3 (1971) 152-157.

Caminada, J.F.; Van Bommel, W.J.M. (1980). New lighting considerations for residential areas. *ILR* 31 (1980) 69-75.

Campbell, F.W.; Gregory, A.H. (1960). Effect of pupil size on acuity. *Nature (London)* 187 (1960) 1121-1123.

Campbell, F.W.; Gubish, R.W. (1966). Optical quality of the human eye. *J. Physiol. (London)* (1966) 186: 558-578.

CIE (1970). *Vocabulaire Internationale de l'Eclairage*. Publication No. 17. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1970.

CIE (1972). A unified framework of methods for evaluating visual performance aspects of lighting. Publication No. 19. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1972.

CIE (1973). International recommendations for tunnel lighting. Publication No. 26. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1973.

CIE (1975). Colours of light signals. Publication No. 2-2. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1975.

CIE (1976). *Compte rendu 18e session*. Publication No. 36. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1976.

CIE (1976a). Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting. Publication No. 30. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1976.

CIE (1977). Measures of road lighting effectiveness. Symposium, July 5-6, 1977. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Karlsruhe, 1977.

CIE (1979). An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. (Preliminary 8th draft). Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1979.

CIE (1980). Proceedings 19th session, Kyoto, 1979. Publication No. 50. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1980.

CIE (1980a). Light signals for road traffic control. Publication No. 48. Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1980.

CIE (1981). Luminance in the threshold zone. Draft Technical Report (10th draft May 1981). Commission Internationale de l'Eclairage CIE, Paris, 1981.

Cofer, C.N.; Appley, M.H. (1964). Motivation, theory and research. John Wiley & Sons, New York, 1964.

Cohen, A.S. (1978). Eye movements behavior while driving a car; A review. ARI-TR 78-TH 4. U.S. Army Research Institute, Alexandria, Va., 1978.

Cohu, M. (1960). Tunnels et passages sousterrains. Rev. Appl. l'Electr. (1960) No. 190 et 191.

Cole, B.L.; Brown, B. (1966). Optimum intensity of red road traffic signal lights for normal and protanopic observers. Journal Opt. Soc. Amer. 56 (1966) No. 4.

Collins, J.B. (1956). The influence of characteristics of a fluctuating visual stimulus on flicker sensation. Ophthalmologica 131 (1956) 83-104.

Collins, J.B.; Hopkinson, R.G. (1957). Intermittent light stimulation and flicker sensation. Ergonomics 1 (1957) 61-76.

Cornsweet, T.N. (1970). Visual perception. Acad. Press, London, 1970.

Crawford, B.H. (1936). Proc. Phys. Soc. 48 (1936) 35.

Crawford, B.H. (1937). The change of visual sensitivity with time. Proc. Roy. Soc. B123 (1937) 69-89.

Crawford, B.H. (1947). Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli. Proc. Roy. Soc. B134 (1947) 283-302.

Damen, C.P. (1959). Verlichting in verkeerstunnels. Polytechnisch Tijdschrift 14 (1959) 290a-296a.

De Boer, J.B. (1951). Fundamental experiments on visibility and admissible glare in road lighting. CIE, Stockholm, 1951.

De Boer, J.B. (1953). Principes de l'eclairage routier conditionnés par le trafic. Instituto Polygrafico dello Stato, Roma, 1953.

De Boer, J.B. (1960). Untersuchungen über den Einfluss der Lichtfarbe auf das Sehen im Strassenverkehr. Z. für Verkehrsmedizin 6 (1960) Heft 1.

De Boer, J.B. (1967). Chapter I in De Boer (ed.) (1967).

De Boer, J.B. (ed.) (1967). Public lighting. Centrex, Eindhoven, 1967.

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.; Morass, W. (1956). Berechnung der Sehweite aus der Lichtverteilung von Automobilscheinwerfer. Lichttechnik 8 (1956) 433-437.

De Boer, J.B.; Schreuder, D.A. (1967). Glare as a criterion for quality in street lighting. Trans. Ill. Engng. Soc. (London) 32 (1967) 117-135.

De Boer, J.B.; Schreuder, D.A. (1969). Betrachtungen über die Anwendung von Halogenscheinwerfer für die Kraftfahrzeugbeleuchtung. Lichttechnik 21 (1969) 88A-92A.

De Boer, J.B.; Vermeulen, D. (1951). On measuring the visibility with motorcar headlights. Appl. Sci. Res. B2 (1951), 1-32.

De Boer, J.B.; Vermeulen, D. (1951a). Motorcar headlights. Philips Techn. Rev. 12 (1951) 305-317.

De Grijs, J.C. (1972). Visuele beoordeling van verlichtingscriteria in Den Haag en Amsterdam. Electrotechniek 50 (1972) No. 14.

De Lange, H. (1957). Attenuation characteristics and phase-shift characteristics of the human fovea-cortex systems in relation to flicker fusion phenomena. Thesis TH-Delft, 1957.

Demetz, H.W. (1978). Die Beleuchtung des Arlberg-Strassentunnels aus der Sicht der Planung. In: ANON (1978).

Demetz, H.W. (1979). Die Beleuchtung des Arlberg-Strassentunnels aus der Sicht der Planung. ÖZE 26 (1979) 2: 4-5.

Devaux, P. (1970). Signalling and lighting; State of the art. FISITA, Brussels, 1970.

De Wit, T.; De Jong, R.A. (1980). Filevorming voor de Coentunnel. De Ingenieur 92 (1980) 14: 12-15.

DIN (1972). Beleuchtung von Strassentunnels und Unterführungen. Vornorm DIN 67 524. Deutsche Normenausschuss, 1972.

Dogniaux, R. (1960). Données météorologiques concernant l'ensoleillement et l'éclairage naturel. Contr. Inst. Roy. Metereol. Belg. No. 60, Uccle-Bruxelles, 1960.

Douglas, C.A.; Booker, R.L. (1977). Visual range; Concepts, instrumental determination, and aviation applications NBS Monograph 159. National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1977.

- Dowling, J.E. (1960). Chemistry of visual adaptation in the rat. *Nature* 188 (1960) 114-118.
- Drent, T. (1978). De langste autotunnel ter wereld. *Arts en Auto* 44 (1978) 1876-1879.
- Dubuisson, J.S. (1973). Synthèse sur la détermination de la luminance d'adaptation (Document provisoire). PIARC, 1973.
- Dubuisson, J.S. (1974). Luminances aux entrées de tunnels routiers Français (Document provisoire). PIARC, 1974.
- Dubuisson, J.S. (1978). Etude de la visibilité; Applications aux tunnels routiers. *Lux* (1978) (Fév.) 56-65.
- Du Croz, J.J.; Rushton, W.A.H. (1966). The separation of cone mechanisms in dark adaptation. *J. Physiol.* (1966) 183: 481-496.
- Dunbar, C. (1938). Necessary values of brightness contrast in artificially lighted streets. *Trans. Ill. Engng. Soc. (London)* 3 (1938) 187.
- Economopoulos, I.A. (1977). Relationship between lighting parameters and visual performance in road lighting. In: CIE (1977).
- Economopoulos, I.A. (1978). Photometric parameters and visual performance in road lighting. Thesis TH-Eindhoven, 1978.
- Eddie, L.C. (1961). Car-following and steady-state theory for non congested traffic. *Operations Research* 9 (1961) 66-76.
- Eddie, L.C.; Foote, R.S. (1958). Traffic flow in tunnels. 37th Ann. Meeting Highway Research Board, pp. 334-344. HRB, Washington, D.C., 1958.
- Einhorn, H.D. (1975). Simple calculation methods for the lighting of passages and tunnels. *Lighting Res. & Technol.* 7 (1975) 30-34.

Engel, F.C. (1976). Visual conspicuity, eye movements and selective attention. Thesis TH-Eindhoven, 1976.

Engels, K. (1980). Das Notbremsvermögen von Pkw mit und ohne automatischen Blockierverhinderern (ABV) auf nasser Strasse. Der Verkehrsunfall (1980) 11: 235-240.

Enzmann, J. (1977). Über die Sichtbarkeit von Objekten bei der Beleuchtung von Strassen. Thesis Universität Karlsruhe, 1977.

Enzmann, E.; Adrian, W. (1977). The influence of glare and visual performance and lighting parameters on roads of equal luminance uniformity. In: CIE (1977).

Erikson, B.; Hörberg, U. (1980). Eye movements of drivers in urban traffic. Report No. 283. University Uppsala, Dept. of Psychology, 1980.

Erikson, B.; Hörberg, U. (1980a). The influence of speed reducing bumps on the search behavior of roadusers. Report No. 284. University Uppsala, Dept. of Psychology, 1980.

Ernens, P. (1960). Un tunnel routier sous l'aérodrome de Cointrin Et. Routières (1960) (Oct.) 2-6.

Eymers, J.G. (1935). Fundamental principles for the illumination of a picture gallery. Thesis RU-Utrecht, 1935.

Felzer, C.A. (1952). Mercury vapor for tunnel lighting. Illum. Engng. 47 (1952) 422.

Feuchtinger, M. (1956). Hochbrücke oder Tunnel? Strasse und Autobahn (1956) 227-233; 267-276; 393-400.

Finch, D.M.; Jewell, J.E.; Leite, M.J.; Nelson, B. (1979). Atmospheric light pollution. P79-60 in CIE (1980).

Fischer, A.J. (1968). Visibility of objects against dark backgrounds with street and vehicle lighting. Proc. 4th Conference Australian Road Research Board, Melbourne, 1968.

Fisher, A.J.; Christie, A.W. (1964). An examination of the applicability of disability glare formulae to street lighting condition. Lab. Note LN 1748. RRL, Crowthorne, 1964.

Fisher, A.J.; Christie, A.W. (1965). A note on disability glare. Vision Research 5 (1965) 565-571.

Fisher, A.J.; Cole, B.L. (1974). The photometric requirements of vehicular traffic signal lanterns. Proc. Aus. Road Research Board 7 (1974) No. 5.

Fisher, A.J.; Hall, R.R. (1970). Road user reaction to the town driving headlight beam. Proc. Australian Road Research Board, 1970. No. 5, pt. 3, pp. 252-263.

Fisher, A.J.; Hall, R.R. (1976). Road luminance based on detection of change of visual angle. Lighting Res. & Technol. 8 (1976) 187.

Fisher, A.J.; Hall, R.R. (1978). The effect of presence lights on the detection of change in vehicle headway. Australian Road Research 8 (1978) 2: 13-16.

Flaate, K.; Janbu, N. (1981). Soil exploration in a 500 m deep fjord, Western Norway. Meddelelse No. 54, Mai 1981, pp. 33-49. Statens Vegvesen, Oslo, 1981.

Fletcher, R. (1968). Instinct in man. Second edition. Unwin, London, 1968.

Flury, F.C. (1969). Kinematische en verkeerskundige begrippen. SWOV, Voorburg, 1969. (Intern rapport, niet gepubliceerd).

- Flury, F.C. (1976). Policy making on road design standards. In: OECD (1976).
- Flury, F.C. (1977). Economische schade door verkeersongevallen 1970 t/m 1976. R-77-23. SWOV, Voorburg, 1977.
- Flury, F.C. (1977a). Cost-effectiveness aspects of road lighting. In: CIE (1977).
- Flury, F.C. (1978). Wegmeubilair, verkeersveiligheid in relatie tot economische aspecten. Verkeerskunde 29 (1978) 286-290.
- Flury, F.C.; Schreuder, D.A. (1977). Cost-effectiveness considerations. SWOV, Voorburg, 1977.
- Folles, E. (1975). Sportveldverlichting en de hinder voor het verkeer. Polytechnisch Tijdschr. B.W. 30 (1975) 511-514.
- Forbes, T.W.; Zagorski, H.J.; Holshouser, E.L.; Deterline, W.A. (1958). Measurement of driver reaction to tunnel conditions. Proc. Highway Research Board 37 (1958) 345-357.
- Fortuin, G.J. (1951). Visual power and visibility. Philips Res. Rep. 6 (1951) 251-287; 347-371.
- Frederiksen, E. (1972). The quality of street lighting installations under changing weather conditions. Electrotechniek 50 (1972) 506-514.
- Frederiksen, E. (1976). New Danish road lighting code. In: OECD (1976).
- Frederiksen, E.; Gudum, J. (1972). The quality of street lighting installations under changing weather conditions. Lighting Res. & Technol. 4 (1972) 90.
- Freiburghaus, E. (1975). Neuzzeitliche Lösungen in der Strassenbeleuchtungstechnik. In: ANON (1975f), pp. 317-325.

Fritschy, P.D.J. (1961). Tunnel onder spoorwegemplacement Nijmegen. Nijmegen, 1961.

Fry, G.A. (1954). A re-evaluation of the scattering theory of glare. Illum. Engng. 49 (1954) 98-102.

Fry, G.A. (1955). Distribution of focussed and stray light on the retina produced by a point source. Journ. Opt. Soc. Amer. 45 (1955) 333-335.

Fry, G.A. (1962). Assessment of visual performance. Illum. Engng. 57 (1962) 426-437.

Fry, G.A. (1964). Measurement, specification and prediction of transient states of adaptation. Illum. Engng. 59 (1964) 453-460.

Fry, G.A.; Alpern, M. (1953). The effect of a peripheral glare source upon the apparent brightness of an object. Journ. Opt. Soc. Amer. 43 (1953) 189-195.

Fry, G.A.; Bridgman, C.S.; Ellerbrock, V.J. (1947). The effect of atmospheric scattering upon the appearance of a dark object against a sky background. Journ. Opt. Soc. Amer. 37 (1947) 635-641.

Fry, G.A.; Pritchard, B.S.; Blackwell, H.R. (1963). Design and calibration of a disability glare lens. Illum. Engng. 58 (1963) 120-123.

Gallagher, V.P.; Freedman, M. (1979). Visibility requirements for entering highway tunnels. (Draft). Franklin Research Center, Philadelphia, 1979.

Gallagher, V.P.; Freedman, M.; Schwab, R. (1979). Visibility requirements for highway tunnels. P79-66. in CIE (1980).

Gallagher, V.P.; McGuire, P.G. (1975). Contrast requirements of urban driving. Special Report 156. Highway Research Board, Washington, D.C., 1975.

Gaymard, L. (1958). Eclairage des tunnels routiers. Rev. Générale des Routes et des Aérodrômes (1958) No. 313.

Geenans, L.; Reid, K.M. (1950). The lighting of Brooklyn-Battery tunnel. Illum. Engng. 45 (1950) 697-703.

Geisler, W.S. (1979). Evidence for the equivalent-background hypothesis in cones. Vision Research 19 (1979) 799-805.

Geisler, W.S. (1980). Comments on the testing of two prominent dark-adaptation hypotheses. Vision Research 20 (1980) 807-811.

Geisler, W.S. (1980a). Increment threshold and detection latency in the rod and cone systems. Vision Research 20 (1980) 981-994.

Gerdes, H.R. (1977). Adaptionsleuchtdichte, physiologische Blendung; Erfahrungen mit dem Blendungsmessgerät System Darmstadt. In: ANON (1977d), pp. 363-367.

Gibson, J.J. (1950). The perception of the visual world. Houghton Mifflin, Boston, 1950.

Giorgi, A. (1970). Psychology as a human science. Harper & Sons, New York, 1970.

Godthelp, J. (1977). De waarneembaarheid van verkeersborden bij nacht; Een theoretische beschouwing (Perception of traffic signs at night; Theoretical considerations). Report C4. IZF, Soesterberg, 1977.

Godthelp, J. (1978). Besturen en handelen (Steering behaviour and manual control actions). Report 1978-3. IZF, Soesterberg, 1978.

Godthelp, J. (1980). Levels of steering control: Reproduction of steering-wheel movements. Paper 16th Annual Conference on Manual Control, Boston, 1980.

Godthelp, J.; Riemersma, J.B.J. (1981). Werk in uitvoering; Deel II .
IZF, Soesterberg, 1981. (In druk).

Gordon, D.A. (1966). Experimental isolation of the driver's visual
input. TRB Record No. 122, pp. 19-34. Highway Research Board, Washington,
D.C., 1966.

Gould, J.D.; Carn, R. (1973). Visual search, complex backgrounds, mental
counters, and eye movements. Perception & Psychophysics 14 (1973) 125-
132.

Graf, U.; Ghielmetti, M. (1978). Beleuchtung und Unfallhäufigkeit in
Strassentunneln. Mitteilung No. 40. Eidgenössische Technische Hochschule,
Zürich, 1978.

Graham, C.H. (ed.) (1965). Vision and visual perception. Wiley & Sons,
Inc., New York, 1965.

Gregory, R.L. (1966). Visuele waarneming, de psychologie van het zien.
De Haan-Meulenhoff, 1966.

Gregory, R.L. (1970). The intelligent eye. Weidenfeld & Nicolson,
London, 1970.

Griep, D.J. (1970). Analyse van het rijgedrag; Enkele begrippen.
Verkeerstechniek 21 (1970) 463-468.

Griep, D.J. (1971). Analyse van de rijtaak 1-4. Verkeerstechniek 22
(1971) 303-306; 370-378; 423-427; 539-542.

Griffioen, A. (1966). The lighting of the Coentunnel. Electrotechniek
44 (1966) 536-541.

Gudum, J.; Vestergaard, P. (1971). Planung der Tunnelbeleuchtung auf
Grund der Anforderungen an die Leuchtdichte und die Leuchtdichtever-
teilung auf der Fahrbahn im Tunnel. Lichttechnik 23 (1971) 553-554.

Guth, S.L. (1965). Luminance addition: General considerations and some results at foveal threshold. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 55 (1965) 718-722.

Haber, R.N. (1968). *Contemporary theory and research in visual perception*. Holt, Rinehart & Winston, London, 1968.

Hahn, V.; Widmann, H. (1980). Der Lärmschutztunnel. *Strasse und Autobahn* (1980) 396-400.

Haight, F.A. (1963). *Mathematical theories of traffic flow*. Academic Press, London, 1963.

Harding, G.F.A.; Herrick, C.E.; Jeavons, P.M. (1978). A controlled study of the effect of sodium valproate on photosensitive epilepsy and its prognoses. *Epilepsia* 19 (1978) 555-565.

Harding, G.F.A. (1980). Photosensitive epilepsy. In: Osborne et al. (eds.) (1980).

Hargroves, R.A. (1971). A survey of the use of flashing lights on roads and road vehicles. In: ANON (1971b).

Harries, D. (1981). The construction of the Ahmed Hamdi road tunnel at Suez. In: ANON (1981) 267-284.

Harris, A.J. (1956). Tunnel lighting and specular reflection. *Light and Lighting* 49 (1956) 210.

Hartmann, E. (1963). Die Schwelle der physiologischen Blendung. *Lichttechnik* 15 (1963) 503-505.

Hartmann, E.; Moser, E.A. (1968). Das Gesetz der physiologischen Blendung bei sehr kleinen Blendwinkeln. *Lichttechnik* 20 (1968) 67A-69A.

Hartmann, E.; Ucke, C. (1974). Der Einfluss der Blendquellengrösse auf die physiologische Blendung bei kleinen Blendwinkeln. *Lichttechnik* 26 (1974) 20-23.

- Hartridge, H. (1932). Visual acuity and resolving power of the eye. J. Physiol. (London) (1932) (Dec.).
- Hattwick, R.G. (1954). Dark adaptation to intermediate levels and to complete darkness. Journ. Opt. Soc. Amer. 44 (1954) 223-228.
- Haubner, P. (1969). Zur Skalierung von Empfindungsstärken. Optica Acta 16 (1969) 781-794.
- Hebb, D.O. (1958). A textbook of psychology. Saunders, Philadelphia, 1958.
- Hecht, S. (1928). The relation between visual acuity and illumination. Journ. General Physiol. 11 (1928) 255.
- Helbig, E. (1972). Grundlagen der Lichtmesstechnik. Geest & Portig K.G., Leipzig, 1972.
- Hemion, R.H. (1968). The effect of headlight glare on vehicle control and detection of highway vision targets. Report AR-640. Southwest Res. Inst., San Antonio, 1968.
- Hendriks, J.H. (1978). Openbare verlichting in de bebouwde kom. Electrotechniek 56 (1978) 917-920.
- Herbert, D.H. (1975). Sunderland - the illuminating facts. Public Lighting 40 (1975) 168: 28-36.
- Herbst, C.H. (1978). Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit der Tunnelbeleuchtung; Ein Systemvergleich. In: LITG (1978).
- Herrin; Neuhardt (1974). An empirical model for automobile driver horizontal curve negotiation. Human Factors 16 (1974) 129-133.
- Hess, R.F.; Harding, G.F.A.; Drasdo, N. (1974). Seizures induced by flickering light. Am. Journal of Optom. & Physiol. Optics 51 (1974) 517.

Higbie, H.H. (1934). Lighting calculations. Wiley, New York, 1934.

Holladay, L.L. (1926). The fundamentals of glare and visibility. Journ. Opt. Soc. Amer. 12 (1926) 271-319.

Hollins, M.; Alpern, M. (1973). Dark adaptation and visual pigment regeneration in human cones. Journ. General Physiol. 62 (1973) 430-447.

Holmes, J.G. (1971). Seeing in an underpass. Traffic Engng. & Control (1971) 260-261.

Holten, P.A.J.; Meulders, G.J. (1979). Lichtmetingen aan verkeersonderdoorgangen in Amsterdam. Applicatielab. Licht 174/879/2a. Philips, Eindhoven, 1979. (Niet gepubliceerd).

Holten, P.A.J.; Meulders, G.J. (1980). Lichtmetingen in de roosterzone van de Beneluxtunnel voor een experimentele uitvoering van de roosterconstructie. Applicatielab. Licht 141/880/2a. Philips, Eindhoven, 1980. (Niet gepubliceerd).

Hood, D.C. (1978). Psychophysical and physiological tests of proposed physiological mechanisms of light adaptation. Chapter 12 in Armington et al. (eds.), 1978.

Hopferwieser, W. (1977). Beleuchtung von Strassentunneln. Strassenforschung Heft 85. Bundesministerium f. Bauten u. Technik, Wien, 1977.

Hopkinson, R.G. (1940). Discomfort glare in lighted streets. Trans. Ill. Engng. Soc. (London) 5 (1940) 1-30.

Hopkinson, R.G.; Pethersbridge, P.; Longmore, J. (1966). Daylighting. Heinemann, London, 1966.

Horeman, H.W. (1963). Inductive brightness depression as influenced by configurational conditions. Vision Research 3 (1963) 121-130.

Horeman, H.W. (1965). Relations between brightness and luminance under induction. *Vision Research* 5 (1965) 331-340.

Huet, M. (1956). L'Eclairage des tunnels routiers du Havre. *Rev. Gén. des Routes et Aérodrodromes* (1956) 297: 93-97.

Hughes, O.G.; Roberts, A. (1980). Re-lighting of the Penmaenbach tunnel. *Public Lighting* 45 (1980) 2: 75-79.

Hulburt, E.O. (1935). Attenuation of light in the lower atmosphere. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 25 (1935) 125-130.

Hulburt, O.E. (1941). Optics of atmospheric haze. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 31 (1941) 467-476.

Hulburt, O.E. (1946). Optics of searchlight illumination. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 36 (1946) 483-491.

Hulscher, F.R. (1974). Practical implements of performance objectives for traffic signal lights. *Proc. Aust. Road Research Board* 7 (1974) No. 5.

Hulscher, F.R. (1975). Photometric requirements for long range road traffic light signals. *Aust. Road Res.* 5 (1975) No. 7.

IERI (1979). Annual Report 1979. Illuminating Engineering Research Institute, New York, 1979.

Ikeda, M.; Takeuchi, T. (1975). Influence of foveal load on the functional visual field. *Perception & Psychophysics* 18 (1975) 255-260.

Inditsky, B. (1975). Transmittance and luminance characteristics of shading systems. P75-50 in *CIE* (1976).

Inohara, M.; Yosimura, Y.; Takeuchi, T. (1980). Luminance contrast threshold of human eyes adapted to a luminance differentiated from that of the object's background. In: *CIE* (1980).

Jahnke, P.; Müller, W. (1980). Autobahnüberbauung Slangenbader Strasse. Berliner Bauwirtschaft 31 (1980) 456-460.

Jainski, P. (1959). Tunnelbeleuchtung zur Verkehrssicherung. Lichttechnik 11 (1959) No. 2.

Jainski, P. (1961). Die Beleuchtung des Strassentunnels Rendsburg. Lichttechnik 13 (1961) 551-555.

Jainski, P.; Hochstädt, E. (1974). Über die Beleuchtung kurzer Tunnel. Lichttechnik 26 (1974) 51-55.

Janoff, M.S., et al. (1970). Daytime motorcycle headlight and tail-light operation. Franklin Institute, Philadelphia, Pa., 1970.

Janoff, M.S. (1975). Evaluation of experimental tunnel lighting in 30th Street Underpass on I-676 in Philadelphia. Franklin Institute, Philadelphia, Pa., 1975.

Janoff, M.S. (1977). Effect of improved illumination on traffic operations. Transportation Research Record No. 628, pp. 37-43. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1977.

Janssen, W.H. (1972). The perception of manoeuvres of moving vehicles; Part IV. IZF, Soesterberg, 1972.

Janssen, S.T.M.C. (1974). Verkeersveiligheid als criterium voor het wegontwerp. In: ANON (1974a).

Janssen, W.H. (1974a). The perception of moving vehicles. Final report No. C12. IZF, Soesterberg, 1974.

Janssen, W.H.; Michon, J.A.; Harvey, L.O. (1976). The perception of lead vehicle movement in darkness. Acc. Anal. Prevention 8 (1976) 151-166.

Janssen, S.T.M.C.; Schreuder, D.A. (1974). Karakteristieken van het wegverkeer. In: ANON (1974a).

Jantzen, R. (1960). Flimmerwirkung der Verkehrsbeleuchtung. Lichttechnik 12 (1960) 211.

Jeavons, P.M.; Harding, G.F.A.; Panayiotopoulos, C.P. (z.j.). Photosensitive epilepsy and driving. (Geen nadere gegevens).

Jeavons, P.M.; Maheshwari, M.C.; Herrick, C.F.; Harding, G.F.A. (z.j.). Epilim and photosensitivity. (Geen nadere gegevens).

Jehu, V.J. (1965). Vehicle front lights. Traffic Engng. & Control 7 (1965) 450-453.

Joachimi, P. (1975). Grundlagen einer nicht-monetären Bewertung von Massnahmen zur Hebung der Verkehrssicherheit. Köln, 1975.

Johansson, G.; Rumar, K. (1968). Visible distances and safe approach speeds for night driving. Ergonomics 11 (1968) 275-282.

Kabayama, H. (1963). Study on adaptive illumination for sudden changes of brightness (In Japanese with English summary). J. Illum. Engng. Inst. Japan 47 (1963) 488-496.

Kahneman, D. (1973). Attention and effort. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1973.

Kalberlah, K. (1970). Untersuchungen zur Beleuchtung von Tunneln und Unterführungen. Lichttechnik 22 (1970) 348-352.

Kebschull, W. (1968). Die Reflexion trockener und feuchter Strassenbeläge. Diss., Berlin, 1968.

Keitz, H.A.E. (1967). Lichtberechnungen und Lichtmessungen. Philips Techn. Bibl., Eindhoven, 1967.

Kelly, D.H. (1961). Visual responses to time-depended stimuli. Journ. Opt. Soc. Amer. 51 (1961) 422-429.

Kern, E. (1952). Der Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei festgehaltenen Adaptationszustand. Z. f. Biologie 105 (1952) 237-245.

Ketvirtis, A. (1967). Highway lighting engineering. Foundation of Canada Engineering Co. Ltd., Toronto, 1967.

Ketvirtis, A. (1972). Illumination design for vehicular tunnels (Abridged). Highway Research Circular (1972) 137: 33-43.

Ketvirtis, A. (1975). Visibility study for long vehicular tunnels. Journal of IES 4 (1975) 120-128.

Ketvirtis, A.; Cooper, P.J. (1977). Detection of critical-size object as criterion for determining driver's visual needs. Proc. 56th Ann. Meeting TRB. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1977.

King, E.L.; Finch, D.M. (1969). Daytime running lights. HRB Record No. 275, pp. 23-31. Highway Research Board, Washington, D.C., 1969.

Kittler, R. (1962). Luminance distribution on cloudless sky after measurements and theoretical relations. Metereologicke Zpravy 15 (1962) 2: 34. (Aangehaald door Mäder, 1966).

Knudsen, B. (1968). De mørke punkter i vejbelysning (Dangerous points in street lighting). Dansk Vejtidskrift (1968) 8: 153-164.

Kocmond, W.C.; Perchonok, K. (1970). Highway fog. NCHRP report 95. Highway Research Board, Washington, D.C., 1970.

Kokoschka, S. (1971). Spektrale Hellempfindlichkeit und äquivalente Leuchtdichte zentraler Gesichtsfelden im mesopischen Bereich. CIE, Barcelona, 1971.

König, A. (1897). Sitzungsbericht der Kö. Preuss. Akad. Wissensch. (1897).
(Geciteerd door Adrian & Kokoschka, 1965).

König, A.; Brodhun, E. (1888). Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel in Bezug auf den Gesichtssinn. Sitzungsbericht der Kö. Preuss. Akad. Wissensch., Berlin (1888) 917.
(Geciteerd door Moon, 1961).

Kooymans, A.C.; Steneker, F.W.M.; Smeets, J.L.R.M. (1978). Effect of a background on foveal and parafoveal cone dark adaptation. Vision Research 18 (1978) 1381-1385.

Kraay, J.H. (1973). Objective and subjective risk of detection. In: SWOV (1973).

Kraay, J.H.; Mattie, P.C. (1973). Speed limits and enforcement by police supervision. In: SWOV (1973).

Krech, D.; Crutchfield, R.S.; Livson, N. (1969). Elements of psychology (2nd edition). Knopf, New York, 1969.

Krendel, E.S.; McRuer, D.T. (1968). Psychological and physiological skill development; A control engineering model. Proc. 4th Annual Conference on Manual Control, 1968.

Krochmann, J. (1963). Über die Horizontalbeleuchtungsstärke der Tagesbeleuchtung. Lichttechnik 15 (1963) 559.

Krochmann, J.; Özver, Z.; Stockmar, A. (1974). Über die Leuchtdichte von Fahrbahndecken während der Dämmerung. Lichttechnik 26 (1974) 318-319.

Kruithof, A.M. (1948). Enige beschouwingen in verband met het verlichten van verkeerstunnels. Philips Tech. Tijdsch. 10 (1948) 299-306.

Lanz, R. (1980). Die Signalisation im St. Gotthard-Strassentunnel. Strasse und Verkehr (1980) 323-327.

Lea, S.E.G. (1978). The psychology and economics of demand. Psychol. Bull. 85 (1978) 441-466.

Leeuwenberg, E.L.J.; Buffart, H.F.J.M. (eds.) (1978). Formal theories of visual perception. Wiley & Sons, Chichester, 1978.

Lévy, M. (1980). Les travaux du tunnel routier du Fréjus. Revue Gén. Routes Aérodomes (1980) 567: 37-55.

Lie, I. (1980). Visual detection and resolution as a function of retinal locus. Vision Research 20 (1980) 967-974.

Lindae, G. (1969). Sichtweite des Abblendlichtes und Belastungsabhängigkeit. Z. f. Verkehrssicherheit 15 (1969) 182-186.

Lingenfelser, H. (1937/1938). Ein Vorschlag zur Beleuchtung von Strassenunterführungen und Tunnel. Licht 7 (1937) 43; 8 (1938) 154.

LITG (1978). Lichttechnische Gemeinschaftstagung, 13-16 Juni 1978, Amsterdam, 1978.

LITG (1980). Lichttechnische Gemeinschaftstagung, Oktober 1980, Berlin, 1980.

Lossagk, H. (1936). Versuche über Adaptationszeiten. Licht 6 (1936) 126.

Lossagk, H. (1955). Sehsicherheit bei Tageslicht in Unterführungen. Lichttechnik 7 (1955) 49-53.

Lossagk, H. (1967). Seh-Irrtümer und Sinnestäuschungen im Kraftverkehr. Moderne Unfall Verhütung (1967) No. 11.

Lorenz, K. (1968). Over agressie bij mens en dier. Ploegsma, Amsterdam, 1968.

Löwe, G. (1980). Dass Autobahnnetz Berlin. Berliner Bauwirtschaft 31 (1980) 452-455.

Luckiesh, M.; Moss, F.K. (1937). The science of seeing. Van Nostrand, New York, 1937.

Lythgoe, R.J. (1932). Measurements of visual acuity. Medical Res. Council. Special Report 173. HMSO, London, 1932.

Mackworth, N.H. (1976). Stimulus density limits the useful field of view. In: Monty & Senders (eds.), 1976.

Mäder, F. (1968). Die Leuchtdichte der Strassenoberfläche an hellen Tagen. Bull. S.E.V. 57 (1968) 809-817.

Mäder, F. (1969). Verwendung von besonderen asymmetrischen Leuchten (Schrägstrahlern) zur Beleuchtung von Tunneln. Bull. S.E.V. 60 (1969) 1177.

Mäder, F. (1978). Fahrversuche im Schöneegg-Tunnel. Eidgenössisches Amt für Messwesen, Bern, 1978.

Mäder, F.; Fuchs, O. (1966). Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln. Bull. S.E.V. 57 (1966) 359-366.

Mäder, F.; Fuchs, O. (1966a). Die Leuchtdichte der Strassenoberfläche an hellen Tagen. Bull. S.E.V. 57 (1966) No. 18.

Magill, P.L. et al. (eds.) (1956). Air pollution handbook. McGraw-Hill, New York, 1956.

Mainwaring, G. (1974). Cost-effective public lighting. Public Lighting 39 (1974) 167: 198-209.

Mann, I.; Pirie, A. (1950). The science of seeing. Revised edition. Penguin Books, Harmondsworth, 1950.

Marburger (1977). Bericht über Forschungsarbeiten zur Anwendbarkeit öffentlicher Entscheidungshilfe-instrumenten im Bereich des Strassenverkehrssicherheits. Köln, 1977.

- Maslov, A.H. (1954). Motivation and personality. Harper, New York, 1954.
- Maslov, A.H. (1968). Towards a psychology of being. 2nd edition. Van Nostrand/Reinholt, New York, 1968.
- McRuer, D.T. et al. (1977). New results in driver steering control models. Human Factors 19 (1977) 381-397.
- Melzack, R. (1973). The puzzle of pain. Penguin, Harmondsworth, 1973.
- Menkhaus, T. (1981). Diss. Universität Karlsruhe, 1981. (In voorbereiding).
- Michon, J.A. (1979). Dealing with danger. Report VK 79-01. Rijksuniversiteit Groningen, Verkeerskundig Studiecentrum, Groningen, 1979.
- Michon, J.A. (1980). Beïnvloeding van de mobiliteit. ANWB, Den Haag, 1980.
- Michon, J.A.; Eijkman, E.G.J.; De Klerk, L.F.W. (eds.) (1976). Handboek der psychonomie. Van Loghum Slaterus, Deventer, 1976.
- Michon, J.A.; Eijkman, E.G.J.; De Klerk, L.F.W. (eds.) (1979). Handbook of psychonomics. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1979.
- Middleton, W.E.K. (1952). Vision through the atmosphere. University Press, Toronto, 1952.
- Millodot, M. (1978). Effect of the aberrations of the eye on visual perception. Chapter 35 in Armington et al. (eds.) (1978).
- Mitchell, D.E.; Rushton, W.A.H. (1971). Visual pigments in dichromats. Vision Research 11 (1971) 1033-1043.
- Mitchell, D.E.; Rushton, W.A.H. (1971a). The red/green pigments of normal vision. Vision Research 11 (1971) 1045-1056.

Moffitt, K. (1980). Evaluation of the fixation duration in visual search. *Perception and Psychophysics* 27 (1980) 370-372.

Monié, B.; Novellas, F.; Perrier, J. (1981). L'éclairage des tunnels routiers. *Rev. Gén. Routes Aérodrômes* (1981) 574: 19-32.

Monkowitz (1978). Rasterstrecke Tunnel Insbrucker Platz in Berlin-Schöneberg; Messung der Beleuchtungsstärke. Bericht No. 3/78. BEWAG, Berlin, 1978.

Monnier, M.; Mouton, M. (1939). La technique de l'éclairage des automobiles. Dunod, Paris, 1939.

Monty, R.A.; Senders, J.W. (eds.) (1977). Eye movements and psychological processes. Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1976.

Moon, P. (1961). The scientific basis of illuminating engineering. Revised edition. S 242. Dover, New York, 1961.

Moon, P.; Spencer, D.E. (1943). The specification of foveal adaptation. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 33 (1943) 444-456.

Morgan, C.T. (1965). *Physiological psychology*. 3rd edition. McGraw-Hill, New York, 1965.

Moirin, J.A. (1979). La Société des Autoroutes Rhône-Alpes. *Rev. Gén. Autoroutes Aérodrômes* (1979) 553: 45-48.

Mortimer, R.G. (1971). Car and truck rear lighting and signalling. In: *SWOV* (1971).

Mortimer, R.G. (1971a). Hard braking is more common than you might think. *Automotive Engng.* (1971) (Aug.) 32.

Mortimer, R.G. (1979). Field test evaluation of rear lighting deceleration signals; Part I. Univ. of Illinois, Champaign, Ill., 1979.

Moses, R.A. (ed.) (1975). Physiology of the eye. Mosby, St. Louis, 1975.

Mourant, R.R.; Rockwell, T.H. (1970). Mapping eye-movement patterns to the visual scene in driving. Human Factors 12 (1970) 81-88.

Mourant, R.R.; Rockwell, T.H. (1970a). Paper 700397 FISITA Congress, Brussels, 1970.

Mourant, R.R.; Rockwell, T.H.; Rackoff, N.J. (1963). Driver's eye movements and visual workload. Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 1963.

Mourant, R.R.; Rockwell, T.H.; Rackoff, N.J. (1969). Driver's eye movements and visual workload. HRB Record No. 292. Highway Research Board, Washington, D.C., 1969.

Müller, E.; Riemenschneider, W. (1975). Tunnel lighting in Switzerland. Lighting Res. & Technol. 7 (1975) 99-101.

Murata, T.; Nakamura, Y. (1970). Fixation points of car drivers (In Japanese). Kotsu-Kosaku 5 (1970) 5: 3-12.

Myers, R.W. (1939). Light transition louvres for high speed vehicular tunnels. Trans Illum. Engng. Soc. (Am.) 34 (1939) 621-626.

Nakamichi, F.; Narisada, K.; Yoshikawa, K. (1967). (Japanese with English summary). Journ. Illum. Engng. Inst. Japan 51 (1967) 10: 566-581.

Narisada, K. (1972). Latest research in tunnel lighting in Japan. Highway Research Circular (1972) 137: 9-27.

Narisada, K. (1975). Survey of Japanese traffic tunnels. (Unpublished report to CIE TC-4.6).

Narisada, K. (1975a). Applied research on tunnel entrance lighting in Japan. Lighting Res. & Technol. 7 (1975) 87-90.

Narisada, K. (1980). Effect of the size of the standard field. (Unpublished report to CIE TC-4.6).

Narisada, K. (1981). Persoonlijke mededeling.

Narisada, K.; Inoue, T.; Bjørset, H.H. (1977). Tunnel lighting; Luminous intensity of luminaires to guide approaching drivers. *Journ. Light & Vis. Env.* 1 (1977) 45-50.

Narisada, K.; Takeuchi, T.; Kosako, S. (1980). Luminance measurements in the access zones of tunnels in daytime; Associated errors. Matsushita Electric Industrial Co., Osaka, 1980.

Narisada, K.; Yoshikawa, K. (1974). Tunnel entrance lighting; Effect of fixation point and other factors on the determination of requirements. *Lighting Res. & Technol.* 6 (1974) 9-18.

Narisada, K.; Yoshikawa, K. (1975). Lighting of short tunnels; Effect of the exit luminance on the level of the lighting. P75-58. In: CIE (1976).

Narisada, K.; Yoshikawa, K. (1978). Lighting of short tunnels; Effect of exit luminance on the lighting level. *Journ. Illum. Engng. Inst. Japan* 62 (1978) 11-18.

Narisada, K.; Yoshikawa, K.; Yoshimura, Y. (1980). Adaptation luminance of driver's eyes approaching a tunnel entrance in daytime. P79-64 in CIE (1980).

Narisada, K.; Yoshimura, Y. (1974). Minimum perceptible luminance contrast of human eyes adapted for given luminances other than those of the object background. (In Japanese). *Nation Technical Report* 20 (1974) 3: 287-295.

Narisada, K.; Yoshimura, Y. (1977). Adaptation luminance of driver's eyes at the entrance of tunnel; An objective measuring method. In: CIE (1977).

Neilson, I.D.; Kemp, R.N.; Wilkins, H.A. (1979). Accidents involving heavy goods vehicles in Great Britain; Frequencies and design aspects. Supplementary Report 470. TRRL, Crowthorne, 1979.

Newman, M. (1975). Visual acuity. In: Moses (ed.) (1975).

Nilsson, G. (1980). Change of maximum speed limit from 110 to 90 km/h during the summer period 1979 in Sweden. Effect on personal injury accidents. Report 197. (In Swedish with English summary). VTI, Linköping (1980).

NNI (1970). Nomenclatuur van het verkeer (wegverkeer). NEN 3391. NNI, Rijswijk, 1970.

Noton, D.; Stark, L. (1971). Eye movements and visual perception. *Sci. American* 224 (1971) 6: 35-43.

NSVV (1949). International visibility tests with motorcar lighting. Ned. Stichting voor Verlichtingskunde, Arnhem (jaar geschat: 1949).

NSVV (1974/1975). Richtlijnen en aanbevelingen voor openbare verlichting. *Electrotechniek* 52 (1974) No. 15 en 53 (1975) No. 2 en No. 5.

NSVV (1977). Het lichtniveau van de openbare verlichting in de bebouwde kom. *Electrotechniek* 55 (1977) 90-91.

Nutting, P.G. (1920). The optical principles of illuminating engineering. *Illum. Engng.* 15 (1920) 529.

Öberg, G.; Carlsson, G. (1980). Change of maximum speed limit from 110 to 90 km/h during the summer period 1979. Effect on speed and petrol consumption. Report 190. VTI, Linköping, 1980.

OECD (1971). Lighting, visibility and accidents. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1971.

OECD (1972). Road user perception and decision making. Proc. OECD Symposium, Rome, 13-15 November 1972. (In Italian). Ministero dei lavori pubblici, Roma, 1972.

OECD (1972a). Two-lane rural roads: design and traffic flow. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1972.

OECD (1975). Road marking and delineation. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1975.

OECD (1976a). Adverse weather, reduced visibility and road safety. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1976.

OECD (1976b). Polarized light for vehicle headlamps. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1976.

OECD (1977). Geometric road design standards. Proc. OECD Symposium, Elsinore (Denmark), 10-12 May 1976. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1976.

OECD (1980). Road safety at night. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1980.

OECD (1981). Methods for evaluating road safety measures. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1981. (In preparation).

OECD (1981a). OECD Symposium on the effect of speed limits on traffic accidents and transport energy use. To be held in Dublin, October, 1981.

Olsen, R.A. (1978). Peripheral vision and driving. W.P.6. Pennsylvania State University, University Park, Pa., 1978.

Olsen, R.A. (1980). Quantifying the night driver's visual environment. Rep. FHWA/RD-80 096. Federal Highway Adm., Washington, D.C., 1980.

O'Reilly, M.P.; Munton, A.P. (z.j.). Prospects of urban highways in tunnels. (Geen verdere gegevens).

Osaka, N. (1980). Luminance range effect on brightness exponent in the fovea and periphery. *Perceptual and Motor Skills* 50 (1980) 1231-1234.

Osborne, D.J.; Gruneberg, M.M.; Eiser, J.R. (eds.) (1980). *Research in psychology and medicine*. Academic Press, London, 1980.

Oud, H. (1978). Report to joint meeting on tunnels CIE-PIARC, Brussels, September 1978. (Niet gepubliceerd).

Overington, I. (1976). *Vision and acquisition*. Pentech Press, London, 1976.

Padmos, P. (1981). *Persoonlijke mededeling*.

Padmos, P. (1981a). *Rijden bij nacht*. IZF, Soesterberg, 1981. (In bewerking).

Padmos, P.; Vos, J.J. (1979). The validity of light level recommendations; Some neglected aspects. Paper 05 in CIE (1980).

Parry, M.H. (1968). *Aggression on the road*. Tavistock, London, 1968.

Perotti, M. (1981). The "Gran Sasso" motorway tunnel in the "Fontari" transverse fault: A new experience in crossing large faults with mylonite. In: ANON (1981), pp. 399-414.

Perrier, J. (1977). *Lighting of road tunnels; Comparison between various recommendations*. Centre d'Etudes des Tunnels, Lyon, 1977.

Pfeiffer, G. (1970). Der Einfluss des Streulichts in Windschutzscheiben auf das Wahrnehmen von Gegenständen auf der Fahrbahn. *Z. f. Verkehrssicherheit* 16 (1970) 132-139.

- Pfundt (1969). Vergleichende Unfallsuntersuchungen auf Landstrassen. Vol 82. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1969.
- Postma, G.W. (1936). Daylight measurement in Utrecht. Thesis RU-Utrecht, 1936.
- Prochazka, H. (1979). Gleinalmtunnel, Österreich. ILR 30 (1979) 80-83.
- Projector, T.H., et al. (1969). Analytic assessment of motor vehicle rear signal systems. National Highway Safety Bureau, Washington, D.C., 1969.
- Ramel, ed. (1959). Exposé et observations sur la documentation recueillie dans: Belgique, France, Gr. Bretagne, Italie, Pays-Bas, Suisse. PIARC, Paris, 1959.
- Raschauer, O. (1979). Zur Eröffnung des Arlberg-Strassentunnels. Strasse und Autobahn 30 (1979) 49.
- Reeb, O. (1962). Grundlagen der Photometrie. G. Braun, Karlsruhe, 1962.
- Reesinck, J.J.M. (1943). Metingen van de schemering. Electrotechniek (1943) 61-77.
- Reesink, J.J.M. (1947). Daglicht. Electrotechniek 25 (1947) 238.
- Reid, K.M.; Shannon (1940). Daytime lighting for tunnel entrances. Illum. Engng. 35 (1940) 276.
- Reilly, R.E.; Kurke, D.S.; Buckenmaier, C.C. (1980). Validation of the reduction of rear-end collision by a high-mounted auxiliary stoplamp. DOT-HS-7-01756. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C., 1980.
- Rennhackkamp, W.H.M. (1967). Sky luminance distribution in warm-arid climates. CIE, Washington, D.C., 1967.

Requin, J. (ed.) (1978). Attention and performance, VII. Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1978.

Riemenschneider, W. (1970). The determination of the adaptation luminance L_1 in the access zone of tunnels. Novelectric, Buchs, 1970. (Unpublished report to CIE TC-4.6).

Riemenschneider, W. (1978). Die Beleuchtung des Strassentunnel St. Gotthard. In: ANON (1978).

Riemenschneider, W.; Müller, E. (1975). Vergleich der nach den CIE-Verfahren gemessenen und bestimmten Adaptationsleuchtdichten verschiedener Tunnels während ihrer Bauzeit und nach Fertigstellung der Anlagen. P75-61 in CIE (1976).

Riemersma, J.B.J. (1979). The perception of course and speed during locomotion. Report C4. IZF, Soesterberg, 1979.

Riemersma, J.B.J. (1979a). The perception of deviations from a straight course. Report C6. IZF, Soesterberg, 1976.

Riemsdijk, A.H.B.; Alpherts, J.H.A. (1946). De elektrische- en verlichtingsinstallatie van de Maastunnel. De Ingenieur 58 (1946) E1-E12.

Riggs, L.A. (1965). Visual acuity. Chapter 11 in Graham (ed.) (1965).

Rinalducci, E.J. (1970). Effects of transitional adaptation at low luminances. Final Annual Report IERI Project No. 91. University Virginia, 1970.

Rinalducci, E.J. (1971). Transitional adaptation in tunnel lighting. Proc. 50th Annual HRB meeting. Highway Research Board, Washington, D.C., 1971.

Rinalducci, E.J. (1972). Transitional adaptation in tunnel lighting. Highway Research Circular (1972) 137: 1-8.

Rinalducci, E.J. (1976). An assessment of the need for a sunscreen at the Hampton Roads Bridge-tunnel. R56. VHTRC, Charlottesville, Va., 1976.

Rinalducci, E.J.; Beare, A.N. (1974). Losses in nighttime visibility caused by transient adaptation. Journ. IES 3 (1974) 336-345.

Rinalducci, E.J.; Higgins, K.E.; Cramer, J.A. (1970). Non-equivalence of backgrounds during photopic dark adaptation. Journ. Opt. Soc. Amer. 60 (1970) 1518-1524.

Ritchie et al. (1968). A study of the relation between forward velocity and lateral acceleration in curves during normal driving. Human Factors 10 (1968) 255-258.

Roch, J. (1958). Berechnung der Beleuchtungsstärke bei Lichtbändern. Lichttechnik 10 (1958) No. 12.

Rockwell, T.H.; Ernst, R.L.; Rulon, M.J. (1970). Visual requirements in night driving. National Co-operative Highway Research Programme Report 99. Highway Research Board, Washington, D.C., 1970.

Roddewig, W.; Stockmar, A. (1977). Zur Berechnung mittlerer Fahrbahnleuchtdichten im Tunnel. Lichttechnik 29 (1977) 64-65.

Roszbach, R. (1971). Some problems in the design of improved vehicle rear lighting configuration. In: SWOV (1972).

Roszbach, R. (1974). Verlichting en signalering aan de achterzijde van voertuigen (Lighting and signalisation at the rear end of vehicles). R-74-11. SWOV, Voorburg, 1974.

Rubeli, J. (1979). Study of fog influence on the light with high mast lighting. P79-58 in CIE (1980).

Ruhfass, M. (1979). Unterführung Landshuter Allee, München. ILR 30 (1979) 76-77.

- Rumar, K. (1970). Effectiveness of old, new and future motor-car lighting. In: ANON (1970).
- Rumar, K. (1972). Obstacle visibility with European Halogen H4 and American Sealed Beam Headlights. In: OECD (1972).
- Rumar, K. (1973). Obstacle visibility with European Halogen H4 and American Sealed Beam Headlights. Report 133. University Uppsala, Dept. of Psychology, 1973.
- Rumar, K. (1973a). Dirty headlights; Frequency and visibility effects. Report 136. University Uppsala, Dept. of Psychology, 1973.
- Rumar, K. (1974). Dirty headlights; Frequency and visibility effects. *Ergonomics* 17 (1974) 529-533.
- Rumar, K. (1980). Visual tasks and night driving. In: ANON (1980b).
- Rushton, W.A.H. (1956). The difference spectrum and the photosensitivity of rhodopsin in the living human eye. *J. Physiol. (London)* (1956) 134: 11.
- Rushton, W.A.H. (1958). Kinetics of cone pigments measured objectively on the living human fovea. *Ann. New York Acad. of Sci.* 74 (1958) 291.
- Rushton, W.A.H. (1961). Dark-adaptation and the regeneration of rhodopsin. *J. Physiol. (London)* (1961) 156: 166.
- Rushton, W.A.H. (1961a). Rhodopsin measurement and dark adaptation in a subject deficient in cone vision. *J. Physiol. (London)* (1961) 156: 193-205.
- Rushton, W.A.H. (1963). A cone pigment in the protanope. *J. Physiol. (London)* (1963) 168: 345-359.
- Rushton, W.A.H. (1963a). Geciteerd door Cornsweet (1970), p. 153.

Rushton, W.A.H. (1965). Bleached rhodopsin and visual adaptation. *J. Physiol. (London)* (1965) 181: 645-655.

Rushton, W.A.H.; Gubisch, R.W. (1966). Glare: its measurement by cone threshold and by the bleaching of cone pigments. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 56 (1966) 104-110.

Rushton, W.A.H.; Westheimer, G. (1962). The effect upon the rod threshold of bleaching neighbouring rods. *J. Physiol. (London)* (1962) 164: 318-329.

Sabey, B.E. (1971). A fully automatic headlight dimming system. CIE, Barcelona (1971).

Sagouit, H. (1966). Influence de l'éclairage des tunnels sur leur construction. *Lux* (1966) 38: 261-270.

Saids, F.S.; Weale, R.A. (1959). The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. *Gerontologia* 3 (1959) 213-231.

Sanders, A.F. (1979). Performance theory. Vol. 2, Chapter 8 in Michon et al. (eds.) (1979).

Sanders, C. (1972). De behavioristische revolutie in de psychologie. Van Loghum Slaterus, Deventer, 1972.

Schlösser, L.H.M. (1976). Enige aspecten betreffende ongevallen op nat wegdek. In: SWOV (1976).

Schmidt-Clausen, H.J.; Bindels, J.T.H. (1971). Die Schwellenleuchtdichtenerhöhung als Blendungsbewertungskriterium. *Lichttechnik* 23 (1971) 547-552; 652-657.

Schober, H. (1960). Das Sehen. 3e Auflage. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1960.

Scholz, J. (1974). Die Beleuchtung des Elbtunnel im Zuge der BAB.A10 (2. Teil). Strassenverkehrstechnik 18 (1974) 202.

Schönleiter, J.; Heymann, G. (1980). Überwachung, Sicherung und Lenkung des Verkehrsablaufs im Autobahntunnel Tegel. Strassenverkehrstechnik 24 (1980) 5: 152-161.

Schouten, J. (1937). Visueele meting van adaptatie en van de wederzijdse beïnvloeding van netvlieselementen. Thesis RU-Utrecht, 1937.

Schreuder, D.A. (1963). Die Beleuchtung von Verkehrstunneln. Schweiz. Verkehrs- und Industrie-Revue 35 (1963) 74-77.

Schreuder, D.A. (1964). The lighting of vehicular traffic tunnels. Centrex, Eindhoven, 1964.

Schreuder, D.A. (1964a). Lighting in adverse weather. Traffic Engng. & Control 5 (1964) 720-723.

Schreuder, D.A. (1965). Über die Beleuchtung von Verkehrstunneln. Lichttechnik 17 (1965) 145A-149A.

Schreuder, D.A. (1965a). Contrast sensitivity in test field with bright surround. Journ. Opt. Soc. Amer. 55 (1965) 729-731.

Schreuder, D.A. (1965b). Short tunnels. ILR 16 (1965) 3: 95-99.

Schreuder, D.A. (1965c). Het verlichten van tunnelingangen, fysiologisch-optisch beschouwd. Philips Techn. Tijdschr. 27 (1965/66) 3: 67-78.

Schreuder, D.A. (1965d). Reflectie-eigenschappen van wegmarkeringsmaterialen. Wegen 39 (1965) 186-191.

Schreuder, D.A. (1966). Verlichting voor nachtelijk wegverkeer. T. Soc. Geneeskunde 44 (1966) 230-235.

- Schreuder, D.A. (1967). Theoretical basis of roadlighting design. Chapter III in De Boer (ed.) (1967).
- Schreuder, D.A. (1967a). Measurements. Chapter VIII in De Boer (ed.) (1967).
- Schreuder, D.A. (1967b). Tunnels. Chapter IV in De Boer (ed.) (1967).
- Schreuder, D.A. (1968). Ein Vergleich von Empfehlungen für Tunnelleinfahrt-Beleuchtung. *Lichttechnik* 20 (1968) 20A-21A.
- Schreuder, D.A. (1970). Road lighting and traffic safety; A functional approach. *Lux* (1970) 57: 146-147; 256-263.
- Schreuder, D.A. (1970a). A functional approach to lighting research. In: ANON (1970).
- Schreuder, D.A. (1971). The coding and transmission of information by means of road lighting. In: SWOV (1972).
- Schreuder, D.A. (1971a). Tunnel entrance lighting; A comparison of recommended practice. *Lighting Res. & Technol.* 3 (1971) 4: 274-278.
- Schreuder, D.A. (1971b). Autoverlichting binnen de bebouwde kom. *Verkeerstechniek* 22 (1971) 12: 583-591.
- Schreuder, D.A. (1972). Discomfort glare in street lighting. *Lighting Res. & Technol.* 4 (1972) 1: 47-48.
- Schreuder, D.A. (1972a). De bepaling van verblinding bij openbare verlichting. *Electrotechniek* 50 (1972) 583-589.
- Schreuder, D.A. (1972b). Tunnel lighting in Europe (Abridged). *Highway Research Circular* (1972) 137: 28-32.
- Schreuder, D.A. (1973). De motivatie tot voertuiggebruik. Leidschendam, 1973.

- Schreuder, D.A. (1973a). Practical experience with tunnel-lighting installation in The Netherlands. *Light and Lighting* 66 (1973) 7: 188-191.
- Schreuder, D.A. (1974). Empfehlungen für Blendungsbegrenzung in der Strassenbeleuchtung. *Lichttechnik* 26 (1974) 180-184.
- Schreuder, D.A. (1974a). De rol van functionele eisen bij de wegverlichting. In: ANON (1974a).
- Schreuder, D.A. (1975). Fundamental visual problems in tunnels. *Lighting Res. & Technol.* 7 (1975) 85-87.
- Schreuder, D.A. (1975a). Functional requirements of road lighting. R-75-3. SWOV, Voorburg, 1975.
- Schreuder, D.A. (1975b). Grondslagen van de verkeersverlichting. *Polyt. Tijdschrift* 30 (1975) 10: 333-338.
- Schreuder, D.A. (1976). Future lines of research in the field of toxic and psychological factors in road traffic accidents. R-76-36. SWOV, Voorburg, 1976.
- Schreuder, D.A. (1976a). White or yellow light for vehicle head-lamps? Publication 1976-2E. SWOV, Voorburg, 1976.
- Schreuder, D.A. (1977). The relation between lighting parameters and driver performance. In: CIE (1977).
- Schreuder, D.A. (1977a). Signaallichten in het wegverkeer; Mogelijkheden tot verbetering vanuit veiligheidsoogpunt. *Electrotechniek* 55 (1977) 4: 254-275.
- Schreuder, D.A. (1977b). Optische problemen bij het verlichten van tunnelingangen (Voordracht). *Lichttechnisch Instituut TU, Berlijn*, 1977.

Schreuder, D.A. (1977c). Tunnelingangsverlichting. IERI, München, 1977. (Niet gepubliceerd).

Schreuder, D.A. (1978). Verlichting en energiegebruik; Eisen te stellen aan de verkeersverlichting. Electrotechniek 56 (1978) 897-903.

Schreuder, D.A. (1978a). De verlichting van verkeerstunnels. In: Wagenaar e.a. (eds.) (1978), pp. 108-113.

Schreuder, D.A. (1978b). Woonerven en hun verlichting. R-78-4. SWOV, Voorburg, 1978. Electrotechniek 56 (1978) 633-639.

Schreuder, D.A. (1978c). The relation between lighting parameters and driver performance. R-78-6. SWOV, Voorburg, 1978.

Schreuder, D.A. (1979). Fysiologische verblinding veroorzaakt door sportveldverlichting. R-79-32. SWOV, Voorburg, 1979. Polyt. tijdschr. 34 (1979) 12: 734-737.

Schreuder, D.A. (1979a). Lighting of tunnel entrances. CIE, Kyoto, 1979. (Niet gepubliceerd).

Schreuder, D.A. (1980). Tunneleinfahrtbeleuchtung: Die dritte Generation. R-80-27. SWOV, Voorburg, 1980. In: LITG, 1980.

Schreuder, D.A. (1980a). Enige overwegingen over fietsverlichting. (Some considerations regarding the lighting of bicycles). SWOV, Voorburg, 1980. (In preparation).

Schreuder, D.A. (1980b). Visibility of road markings on wet road surfaces. SCW, Arnhem, 1980.

Schreuder, D.A. (1980c). Signalisation (Voies et véhicules). In: ANON (1980b).

Schreuder, D.A. (1980d). Verlichting voor het verkeer. R-80-4. SWOV, Voorburg, 1980.

Schröter, H.G. (1977). Research on daytime lighting of tunnel entrances. *Lighting Res. & Technol.* 9 (1977) 194-208.

Schröter, H.G. (1981). Persoonlijke mededeling.

Schwengler, S. (1978). Eine neue Beleuchtungskonzeption für Tunnelanlagen. In: ANON (1978b).

Scitovsky, T. (1976). *The joyless economy; An enquiry into human satisfaction and consumer dissatisfaction.* University Press, Oxford, 1976.

Sewig, R. (ed.) (1938). *Handbuch der Lichttechnik.* Julius Springer, Berlin, 1938.

Shackelford, B.E.; Atwater, D.W. (1924). Study of lighting for Hudson river vehicular tunnel. *Illum. Engng.* 19 (1924) 638.

Siedentopf, H.; Reeger, E. (1944). Die Beleuchtung durch die Sonne. *Meteorologische Zeitschrift* 61 (1944) 114-117.

Simkovics, W. (1978). Die Beleuchtungsanlage des Wiltener Tunnel. In: ANON (1978).

Simkovics, W. (1979). Die Beleuchtungsanlage des Wiltener Tunnel. *ÖZE* 26 (1979) 4: 1-2.

Singstad, O. (1934). Vehicular and pedestrian tunnels at Antwerp. *Civil Engineering* (1934) (Jan.).

Skinner, B.F. (1965). *Science and human behavior.* (Paperback ed.). Free Press, New York, 1965.

Skinner, B.F. (1972). *Beyond freedom and dignity.* (Bantam) Vintage, New York, 1972.

Smith, F.C. (1938). Reflection factors and revealing power. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) 3 (1938) 196-200.

Smith, S.W. (1976). Performance of complex tasks under different levels of illumination. Part I. Journ. IES (1976) 235-242.

Smith, C.C.; Waldram, J.M. (1957). The lighting of bridges and tunnels. Road & Road Construction 35 (1957) 317-324.

Snyder, H.L. (ed.) (1979). Visual search and eye movements. Special issue. Human Factors 21 (1979) 257-383.

Sørensen, K.; Nielsen, B. (1974). Road surfaces in traffic lighting. Report No. 9. Danish Illuminating Engineering Laboratory, Lyngby, 1974.

Spencer, D.E. (1943). Journ. Opt. Soc. Amer. 33 (1943) 10.

Spencer, D.E. (1960). Scattering functions for fog. Journ. Opt. Soc. Amer. 50 (1960) 584-585.

Spragins, A.B.; Lefton, L.A.; Fisher, D.F. (1976). Eye movements while reading and searching spatially transformed text. Memory & Cognition 4 (1976) 36-42.

Springer, J.F.; Labrie, D.H. (1977). Vormgeving van viaducten in verband met functie en omgeving. Publ. 25. Rijkswaterstaat, Directie Wegen, Den Haag, 1977.

Steinhauser, F.; Eckel, O.; Sauberer, F. (1955). Klima und Bioklima von Wien, 1. Teil. Sonderhaft Wetter und Leben (1955).

Stevens, S.S. (ed.) (1951). Handbook of experimental psychology. Wiley & Sons, Inc., New York, 1951.

Stiles, W.S.; Crawford, B.H. (1932). Equivalent adaptation levels in localized retinal areas. In: Report of Discussion on Vision, pp. 194-211. Physical Society, London, 1932.

Stiles, W.S.; Crawford, B.H. (1937). The effect of a glaring light source on extrafoveal vision. Proc. Roy. Soc. 122 B (1937) 255-280.

Stockmar, A.; Thygs, W. (1980). Projektierung von Tunnelbeleuchtungen unter Berücksichtigung der Indirektkomponent. Licht (1980) 518-524.

Swart, L.H. (1979). Lichtmetingen aan tunnels. (Niet gepubliceerd).

Swetland, R.M. (1940). Developments in lighting vehicular tunnels. GE Review (1940) (April).

Swetland, R.M. (1941). Sodium illumination for vehicular traffic tunnels. Illum. Engng. 36 (1941) 917.

Swetland, R.M. (1957). Lighting traffic tunnels and underpasses. Illum. Engng. 52 (1957) 325.

Swierstra, R. (1947). Licht en zicht, Deel I: Grondbeginselen. Stam, Haarlem, 1947.

Swierstra, R. (1951). Nieuwe methoden ter bepaling van bezonning en dagverlichting. Polyt. Tijdschr. 6 (1951) A 278-282; 312-318; 388-392.

Swierstra, R. (1952). De bepaling van dagverlichting in fabrieken en werkplaatsen met bovenlichten. Polyt. Tijdschr. 7 (1952) A 652-656; 689-693; 725-728.

SWOV (1969). Stads- en dimlichten binnen de bebouwde kom. Rapport 1969-6. SWOV, Voorburg, 1969.

SWOV (1971a). Snelheidslimieten buiten de bebouwde kom. Rapport 1971-2. SWOV, Voorburg, 1971.

SWOV (1972). Psychological aspects of driver behaviour; Papers of Symposium held at Noordwijkerhout, The Netherlands, 2-6 August 1971. 2 Volumes. SWOV, Voorburg, 1972.

SWOV (1973). Speed limits and enforcement. Publication 1973-2E. SWOV, Voorburg, 1973.

- SWOV (1976). SWOV-Congres Toekomst in veiligheid, Amsterdam, 18 mei 1976. Publikatie 1976-4N. SWOV, Voorburg, 1976.
- SWOV (1978). Hulpremmen voor vrachtauto's. R-78-36. SWOV, Voorburg, 1978.
- Tan, T.H. (1974). Wegverlichting in de praktijk. In: ANON (1974a).
- Tan, T.H. (1977). Unpublished Report to SC 3 (Tunnels) of CIE TC-4.6.
- Tan, T.H. (1978). Beoordelingen van de verlichting van woonstraten. Rapport t.b.v. NSVV. (Niet gepubliceerd).
- Tan, T.H. (1978a). Openbare verlichting buiten de bebouwde kom. *Electrotechniek* 56 (1978) 921.
- Tan, T.H. (1978b). Openbare verlichting buiten de bebouwde kom. *Verkeerskunde* 29 (1978) 328.
- Tan, T.H. (1978c). Measurements in tunnels in The Netherlands. Unpublished Report to SC 3 (Tunnels) of CIE TC-4.6.
- Tanabe, Y.; Hatayama, J., et al. (1977). A paper presented at the Annual conference of the Illuminating Engineering Institute of Japan. (In Japanese). Aangehaald in: CIE (1981).
- Thiry, J.P. (1971). Determination expérimentale de l'intensité lumineuse admissible des projecteurs route. CIE, Barcelona, 1971.
- Thompson, J.A.; Fansler, B.I.; Ragland, J.S. (1972). Tunnel and underpass lighting practice in the U.S.A. Highway Research Circular (1972) 137: 44-47.
- Thum, H. (1952). Das "Interflexions"-Verfahren. *Lichttechnik* 4 (1952) No. 11.

- Tooke, W.R.; Hurst, D.R. (1975). Wet night visibility study. GDOT Research Project No. 6701. Dept. of Transportation, Georgia, 1975.
- Trapp, W. (1980). Beleuchtung eines kurzen Tunnels. Licht (1980) 525-527.
- Van Bommel, W.J.M.; De Boer, J.B. (1980). Road lighting. Kluwer, Deventer, 1980.
- Van Bruggen, J.P. (1941). De Maastunnel te Rotterdam; Proefnemingen en onderzoekingen. (Maastunnel at Rotterdam; Experiments and research). De Ingenieur 56 (1941) B24.
- Van Dalen, G. (1980). Stromingstechnisch modelonderzoek van verkeerstunnels. Polyt. Tijdschrift B 35 (1980) 492-497.
- Van de Hulst, H.C. (1957). Light scattering by small particles. Wiley, New York, 1957.
- Van den Bijllaardt, D. (1975). Tunnel lighting practice in The Netherlands. Lighting Res. & Technol. 7 (1975) 95-98.
- Van den Bijllaardt, D. (1977). Praktische Aspecte der Tunnelbeleuchtung. Lichttechnik 29 (1977) 61-63.
- Van den Bijllaardt, D. (1981). Basic points of tunnel lighting. (In preparation).
- Van den Bijllaardt, D.; Narisada, K. (1980). Die Leuchtdichte in der Einsichtstrecke eines Strassentunnels. In: LITG (1980).
- Van den Bijllaardt, D.; Tan, T.H. (1975). Verlichtingssystemen van auto(snel)wegen. Electrotechniek 53 (1975) 886.
- Van der Colk, H.; Schreuder, D.A. (1981). Analyse van de rijtaak; Onderzoekachtergrond en onderzoeksplan. (Intern rapport). SWOV, Voorburg, 1981.

Van der Trappen, E. (1954). Beleuchtung von Verkehrsunterführwegen und Tunneln. *Lichttechnik* 6 (1954) 427.

Van der Voort, D.J.M.; Van Wegen, H.B.R. (1980). Aandachtspunten bij het ontwerpen van fiets/voetgangerstunnels. Centrum voor Architectuuronderzoek, TH-Delft, 1980.

Van der Voort, D.J.M.; Van Wegen, H.B.R. (1980a). Onderdoorgangen voor fietsers en voetgangers. *Verkeerskunde* 31 (1980) 399-403.

Van Norren, D. (1974). Leesbaarheid van bewegwijzering langs autosnelwegen; Een literatuur-evaluatie. Rapport C15. IZF, Soesterberg, 1974.

Van Norren, D.; Padmos, P. (1974). Dark adaptation of separate cone systems studied with psychophysics and electroretinography. *Vision Research* 14 (1974) 677-686.

Vaughan, J.; Graefe, T.M. (1977). Delay of stimulus presentation after the saccade in visual search. *Perception & Psychophysics* 22 (1977) 201-205.

Veling, I.H.; Blaauw, G.J.; Moraal, J. (1978). Anticiperen en autorijden. (Anticipation and driving). Rapport 1978-C1. IZF, Soesterberg, 1978.

Vernon, M.D. (1971). De menselijke motivatie. Aula 463. Spectrum, Utrecht, 1971.

Vlek, C.; Wagenaar, W.A. (1979). Judgement and decision under uncertainty. Vol. 2, Chapter 6 in Michon et al. (eds.) (1979).

Von Hebenstreit, B. (1961). Grundzüge einer Verkehrspsychologie. Barth, München, 1961.

Vos, J.J. (1963). On mechanisms of glare. Diss. RU-Utrecht, 1963.

- Vos, J.J. (1969). Kwaliteitsverbetering van de leeskaart bij de oogarts. TNO-nieuws 24 (1969) 337-340.
- Vos, J.J. (1976). Argumenten in de discussie over het wenselijk niveau van openbare verlichting voor wegen buiten de bebouwde kom. Rapport 1976-C8. IZF, Soesterberg, 1976.
- Vos, J.J. (1978). Hebben wij onze verlichtingseisen wat ver opgeschroefd? Electrotechniek 56 (1978) 893.
- Vos, J.J.; Bouman, M.A. (1959). Disability glare; Theory and practice. CIE, Brussels, 1959.
- Vos, J.J.; Plomp, R. (1979). Human sensory functions. Chapter 7 in Michon et al. (eds.) (1979).
- Vos J.J.; Walraven, P.L. (1971). On the derivation of the foveal receptor primaries. Vision Research 11 (1971) 799-818.
- Vos, J.J.; Walraven, J.; Van Meeteren, A. (1976). Light profiles of the foveal image of a point source. Vision Research 16 (1976) 215-219.
- Vreugdenhil, A. (1952). De Maastunnel. Stam, Haarlem, 1952.
- Wagenaar, W.A., e.a. (eds.) (1978). Proeven op de som; Psychonomie in het dagelijks leven. Van Loghum Slaterus, Deventer, 1978.
- Wahl, K. (1954). Lichttechnik. Fachbuchverlag GMBH, Leipzig, 1954.
- Waldram, J.M. (1938). The revealing power of street lighting installations. Trans. Ill. Engng. Soc. (London) 3 (1938) 173-196.
- Waldram, J.M. (1952). Street lighting. Edward Arnold & Co., London, 1952.
- Waldram, J.M. (1962). Lighting and visibility in the approaches to underpasses. GEC Journal 29 (1962) 119.

- Walraven, J. (1973). Spacial characteristics of chromatic induction. *Vision Research* 13 (1973) 1739-1753.
- Walraven, J. (1980). Visueel critische elementen bij nachtrijden; Een veldstudie. Rapport C 80-02 (concept). IZF, Soesterberg, 1980.
- Walsh, J.W.T. (1961). *The science of daylight*. MacDonald, London, 1961.
- Walsh, J.W. (1965). *Photometry*. Dover, New York, 1965.
- Walters, H.W.; Wright, W.D. (1943). The spectral sensitivity of the fovea and the extra-fovea in the Purkinje-range. *Proc. Roy. Soc. B* (131) (1943).
- Walthert, R. (1977). Tunnel lighting systems. *ILR* (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-Einfahrtzonen bei verschiedenen Beleuchtungssystemen. BAG, Turgi, 1978.
- Wentink, H.L., et al. (1957). *De Velser Tunnel*. Stam, Haarlem, 1957.
- Werkman, E. (1959). *Tunnels*. Nelissen, Bilthoven, 1959.
- Westermann, H.O. (1975). Engineering aspects of tunnel lighting. *Lighting Res. & Technol.* 7 (1975) 90-94.
- Westheimer, G. (1965). Visual acuity. *Ann. Rev. Psychol.* 16 (1965) 359-380.
- Wettlegren, G. (1981). Experience from excavating communication tunnels, above all for underground railways, in hard rock within densely built-up city areas. In: ANON (1981), pp. 479-492.

- Wichert, G. (1971). Ein neues, an wichtige Verkehrssituationen angepasstes Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. CIE, Barcelona, 1971.
- Widmer, W. (1980). Fortschrittliche Beleuchtungstechnik im Arlberg-Strassentunnel. Du Pont Magazin 1 (1980) No. 1.
- Wiesner, E. (1978). Die Durchfahrtbeleuchtung des Arlberg-Strassentunnel. In: ANON (1978).
- Wiesner, E. (1979). Die Durchfahrtbeleuchtung des Arlberg-Strassentunnel. ÖZE 26 (1979) 4: 5-8.
- Wilkins, A.J.; Darby, C.E.; Binnie, C.D. (1979). Neurophysiological aspects of pattern-sensitive epilepsy. Brain 102 (1979) 1-25.
- Willians, L.C. (1966). Target conspicuity and visual search. Human Factors 8 (1966) No. 1.
- Wimmer, K. (1979). Der Arlberg-Strassentunnel. Strasse und Autobahn 30 (1979) 50-62.
- Wolf, E.; Gardiner, J.S. (1965). Studies on the scatter of light in the dioptric media of the eye as a basis of visual glare. Arch. Ophthal. 74 (1965) 338-345.
- Woodhouse, J. (1971). Public lighting; Opportunities and responsibilities. Public Lighting 36 (1971) 152: 4-14.
- Wörner, H. (1954). Die Vorhersage der Ortshelligkeit. Abh. Meteor. Hydr. Dienst DDR 5 (1954) 33: 1-54.
- Wyszecki, G.; Stiles, W.S. (1967). Color science; Concepts and methods, quantitative data and formulas. Wiley, New York, 1967.
- Yerrell, J.S. (1971). Headlamp intensities in Europe and Brittain. Report LR 383. RRL, Crowthorne, 1971.

Yoshikawa, K.; Sumi, S.; Horii, S. (1976). A paper presented at the Annual conference of the Illuminating Engineering Institute of Japan (In Japanese). Naar: CIE (1981).

Zwahlen (1976). Zonder nadere gegevens aangehaald door Walthert (1978).

Zwahlen, H.T. (1979). Driver eye scanning at tunnel approaches. Final Report, Vol. 1, Project No. C 4114. Franklin Institute, Philadelphia, 1979.

Zwahlen, H.T. (1980). Driver eye scanning behavior in rain and during an unexpected windshield wiper failure. Z. f. Verkehrssicherheit 26 (1980) 148-155.

Zwikker, C. (1933). Beknopte verlichtingsleer. De Paltrok, Amsterdam, 1933.

Zijl, H. (1951). Manual for the illuminating engineer on large size perfect diffusors. Philips, Eindhoven, 1951.

Zijl, H. (1955). Illuminating engineering course. Philips, Eindhoven, 1955.

Zijl, H. (1958). Motor Tunnel at Velsen. ILR (1958) 26-29.