

DE VELDFACTOR BIJ DE BEPALING VAN DE VERLICHTINGSNIVEAUS BIJ TUNNEL-
INGANGEN

Verslag van experimenteel onderzoek

R-90-10

Dr. ir. D.A. Schreuder

Leidschendam, 1990

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

INHOUD

Voorwoord

1. Inleiding

2. Doel van het onderzoek

3. Theoretisch kader

3.1. De basisformule

3.2. Het intrinsieke contrast

3.3. De contrastgevoeligheid

3.4. De stoorkluminantie L_d

3.4.1. Het adaptatiedefect

3.4.2. Strooilicht aan de ruit

3.4.3. Atmosferisch strooilicht

3.4.4. Strooilicht in het oog

3.5 De veldfactor

4. Opzet en uitvoering

4.1. Algemeen overzicht van de opzet

4.2. Het contrastobject

4.3. De waarnemers

4.4. Waarnemingstaak en rijtaak

4.5. De contrastwaarnemingen

4.6. De lichtniveaus

4.7. De sluiertluminantie

5. Resultaten

6. Bepaling van de veldfactor f

7. Discussie

Literatuur

Afbeeldingen 1 t/m 4

Tabellen 1 t/m 10

Aanhangsel

VOORWOORD

Dit rapport bevat het verslag van experimenteel onderzoek dat is uitgevoerd volgens de opdracht van de Directie Sluizen en Stuwen van de Rijkswaterstaat (Nummer SS 1491 van 24 augustus 1989).

De opzet, uitwerking, begeleiding en rapportage van de experimenten was in handen van de SWOV. De opzet en de voortgang is besproken in de werkgroep Tunnelverlichting van de Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde NSvV (waarin naast de Directie Sluizen en Stuwen en de SWOV, ook de Dienst Verkeerskunde van de Rijkswaterstaat, de SWOV en Philips Nederland vertegenwoordigd zijn), alsmede in de Begeleidingsgroep Verlichtingsonderzoeken BVO (waarin naast de Directie Sluizen en Stuwen, de Dienst Verkeerskunde en de SWOV ook het Instituut voor Zintuigfysiologie IZF-TNO vertegenwoordigd zijn).

De experimenten zijn voorbereid door M.A. Biesheuvel en J.J.A. Planken, studenten aan de Hogeschool Rotterdam en Omstreken als onderdeel van hun afstudeerwerk in de richting Bedrijfskunde. Over dit werk is een apart rapport uitgebracht (Biesheuvel & Planken, 1989). Deze voorbereiding is door het Bureau Stam en Van Vuren, Organisatieadviseurs (Sliedrecht) didactisch, en door de SWOV inhoudelijk begeleid. Het experimentele onderzoek (het veldwerk) is door Stam en Van Vuren onder begeleiding van de SWOV uitgevoerd in de Drechtunnel te Dordrecht. Hierover is separaat gerapporteerd (Stam, 1989).

De voor de experimenten benodigde lichttechnische metingen in de Drechtunnel zijn uitgevoerd door Philips Lighting B.V. (Dalderup & Retera, 1989). De metingen van de contrastgevoeligheid van de proefpersonen is uitgevoerd door het Oogziekenhuis Rotterdam (Van Houwelingen, 1989). De gegevens over het meteorologisch zicht zijn beschikbaar gesteld door het Koninklijk Meteorologisch Instituut KNMI te De Bilt.

De hierboven genoemde rapporten zijn openbaar gemaakt, en ze zijn onder meer bij de SWOV ter inzage; ze zijn echter - vaak op grond van auteursrechtelijke overwegingen - niet "gepubliceerd". Om de gegevens toch, meer in het bijzonder voor de wetenschappelijke wereld, ter beschikking te stellen, bevat het eindrapport van het onderzoek een samenvatting van de

bedoelde rapporten. Na overleg met de Directie Sluizen en Stuwen is op het door de Commission Internationale de l'Eclairage CIE in samenwerking met de Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft SLG in oktober 1989 georganiseerde congres een voordracht gehouden die op een samenvatting van het onderzoek is gebaseerd (Schreuder, 1989). De tekst van deze voordracht is intussen gepubliceerd (Anon., 1989).

Dank gaat uit naar de heren Biesheuvel en Planken voor hun inzet bij de opzet van de experimenten. Voorts gaat dank uit naar de Regionale Directie van de Rijkswaterstaat in Zuid-Holland, en naar de beheerders van de Drechttunnel voor de medewerking die is verleend bij de uitvoering van de veldmetingen.

Tenslotte gaat dank uit naar ing. L. Swart (RWS, Dir. Sl&St); ing. T.D.J. Van den Brink (RWS, DVK) en drs. P.I.J. Wouters (SWOV) die door hun kritisch commentaar ertoe hebben bijgedragen de gegevens uit het onderzoek te verwerken in een voor de praktijk bruikbaar resultaat.

1. INLEIDING

Het grootste visuele probleem bij het door gemotoriseerd verkeer passeren van een lange verkeerstunnel is gelegen bij het overdag binnenrijden van de ingang. Wanneer de tunnelingang onvoldoende is verlicht, doet deze zich voor als een "zwart gat" waarin geen enkel detail te onderscheiden is (Schreuder, 1964; 1981). Het meest cruciale onderdeel van aanbevelingen en richtlijnen voor de verlichting van tunnels is dan ook steeds gelegen in de ingangsverlichting (NSvV, 1963, 1989; CIE, 1973, 1989). Dit is mede het gevolg van het feit dat de ingangsverlichting het duurste gedeelte van de verlichtingsinstallatie is.

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

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

2. DOEL VAN HET ONDERZOEK

In overeenstemming met de door de Directie Sluizen en Stuwen aan de SWOV verleende opdracht bestond het doel van het hier beschreven onderzoek uit het bepalen van de zgn. veldfactor ten behoeve van het completeren van het zgn. sluiertluminantieconcept. Deze begrippen worden in Hoofdstuk 3 nader toegelicht. De voor dit onderzoek benodigde gegevens (met name de licht-technische metingen in de Drechtunnel) zullen worden gebruikt voor twee aanvullende onderdelen:

- het in de praktijk toetsen van de minimaal vereiste verlichting voor de tunnelingang;
- het bepalen van de minimale luminantie die voor het interieur van een lange, drukke tunnel moet worden aanbevolen, als onderdeel van de door de NSvV te publiceren Aanbevelingen voor Tunnelverlichting.

Het eerste onderdeel is besproken in Hoofdstuk 7: Discussie. Het tweede onderdeel behoort niet tot het eigenlijke onderzoek, en is als een aanhangsel aan het rapport toegevoegd.

3. THEORETISCH KADER

3.1. De basisformule

Zoals in de Inleiding reeds is aangegeven, is voor de praktijk in Nederland het grootste probleem bij het passeren van een tunnel gelegen in de sluier die zich over het gezichtsveld uitstrekt. Deze sluier vermindert het contrast van alle voorwerpen die zich in de tunnelingang, dus "achter" deze sluier, bevinden. Om toch een voldoende waarneembaarheid van deze voorwerpen te kunnen waarborgen, is het nodig om de luminantie in de ingangspartij (de zgn. drempelzone van de tunnel) te verhogen. Hierdoor wordt de invloed van de sluier relatief geringer, en dus ook de afname van het contrast. Het begrip "luminantie" vertegenwoordigt hierbij de objectieve, fotometrische maat voor de helderheid. Een definitie is gegeven in het door de CIE uitgegeven woordenboek (CIE, 1988).

In een eerder rapport is in detail beschreven wat de invloed van de sluier is, hoe ze is samengesteld, en hoe de sluierluminantie kan worden bepaald (Schreuder & Oud, 1988). Hier volgt een korte samenvatting.

Het contrast is gedefinieerd als

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

Hierin is C het intrinsieke contrast; L_2 en L_3 zijn de luminanties van respectievelijk de achtergrond van het waar te nemen voorwerp en die van het voorwerp zelf. C is dus dimensieloos, en kan lopen van $-\infty$ tot $+1$. Een positieve waarde van C betekent dat het waar te nemen object donkerder is dan de achtergrond (L_3 kleiner dan L_2). Een negatieve waarde van C betekent derhalve dat het object lichter is dan de achtergrond. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt tussen "gewone", diffuus reflecterende objecten en zelf-lichtgevende of retroreflecterende objecten. Bij diffuus reflecterende objecten is L_3 weliswaar groter dan L_2 , maar niet zeer veel groter. Onder deze omstandigheden blijkt het "teken" van het contrast van ondergeschikt belang te zijn; voorwerpen die "een beetje" lichter zijn dan de achtergrond worden even gemakkelijk waargenomen als voorwerpen die "een beetje" donkerder zijn. Bij zelf lichtgevende of retroreflecterende objecten is de situatie echter geheel anders; hierbij is L_3 vaak zeer veel

groter dan L_2 . In dergelijke gevallen wordt de waarneembaarheid van de bedoelde objecten vrijwel uitsluitend door L_3 bepaald, en heeft L_2 nauwelijks enige invloed. Ofschoon het in sommige landen gebruikelijk is om retroreflectoren (bijvoorbeeld wegdekreflectoren) in tunnels aan te brengen, zullen we niet verder op deze materie ingaan, omdat dergelijke reflectoren in Nederland niet of nauwelijks in tunnels worden toegepast. Voor het verdere onderzoek kan derhalve het "teken" van het contrast buiten beschouwing worden gelaten.

In de praktijk zal men zeer vaak vinden, dat de waarneming wordt gehinderd door allerlei verstorende invloeden uit de omgeving. Zoals in de reeds genoemde studie van Schreuder en Oud (1988) is aangetoond, kan deze storing worden beschreven door een "stoorluminantie" die we met L_d (naar het engelse woord disturbance) zullen aanduiden. We komen in par. 3.4 op deze stoorluminantie terug; hier volstaan we met de opmerking dat deze stoorluminantie zich als een "lichtsluier" kan voordoen die zich over (grote delen van) het gezichtsveld kan uitstrekken. Ten gevolge van een dergelijke sluier met luminantie L_d worden alle luminanties met L_d verhoogd. Het "schijnbare" of "zichtbare" contrast C' wordt dan

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

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

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

Omdat L_d groter is dan 0, is C' steeds kleiner dan C . Een voorwerp is onder bepaalde praktijkomstandigheden alleen zichtbaar wanneer C' groter is dan het kleinste contrast dat onder die omstandigheden kan worden waargenomen. Dit kleinste waarneembare contrast wordt de bij de praktijk behorende "drempelwaarde" van het contrast genoemd. Deze drempelwaarde is groter dan de "echte" drempelwaarde zoals die in een laboratorium wordt gemeten. De laboratoriumwaarde van deze drempel wordt met C'' aangegeven. C' is dus steeds groter dan C'' . Deze ongelijkheid heeft te maken met het verschil in waarnemingscondities in het laboratorium en in "het veld". De

relatie tussen C' en C" wordt meestal aangeduid met een "veldfactor" f: met stelt dat $C' = f * C''$. Het betreffende voorwerp is dus zichtbaar wanneer C' groter is dan fC"; dus $fC'' \leq C'$. Wanneer men dit invult in [3] vindt men:

$$(L_2 - L_d) * fC'' \leq L_2 * C$$

en dus

$$L_2 * fC'' - L_d * fC'' \leq L_2 * C.$$

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

$$L_2 (C - fC'') \geq L_d * fC''.$$

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

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

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

Het genoemde rapport geeft details over de in deze formule voorkomende factoren. Ook dit wordt hier kort samengevat, en wel alleen voor zover het direct van belang is voor het onderzoek.

Het hier beschreven onderzoek heeft tot doel om de veldfactor f in de praktijk te bepalen. Daartoe worden de formules [1] en [2] omgewerkt. Deze formules waren:

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

en

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

Hieruit volgt

$$C * = C' (L_2 + L_d)$$

Met $C' = fC''$ volgt hieruit

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

Hierin is C het contrast dat nog juist kan worden gezien. Hiervoor kan worden geschreven

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

waarin p_2 en p_3 de (diffuse) reflectiefactoren zijn van respectievelijk het object en de achtergrond, en E_2 de horizontale verlichtingssterkte ter plaatse van het object.

De reflectiefactoren p_2 en p_3 kunnen eenmalig worden gemeten. C'' wordt in het laboratorium gemeten. De luminanties L_2 en L_d zijn gedurende de proefnemingen variabel, en dienen dus met bepaalde intervallen te worden bepaald. Wanneer al deze metingen worden gedaan, is f te bepalen.

3.2. Het intrinsieke contrast

C is het intrinsieke contrast van het voorwerp waarvan men vindt dat het gezien moet kunnen worden; C is dus een arbitrair gekozen waarde. Meestal kiest men 0,2 of 0,3; dit correspondeert met gangbare obstakels als stenen, dozen of uitlaatpijpen. We hebben reeds aangegeven dan voor diffuus reflecterende voorwerpen, waarbij L_3 nooit sterk van L_2 afwijkt, het feit

of het voorwerp donkerder of lichter is dan de achtergrond, verwaarloosd kan worden. Anders is het bij retroreflecterende wegmarkeringen die met een veel hogere C corresponderen (en dan met een minteken).

3.3. De contrastgevoeligheid

C" is apart bepaald. Daartoe is in het Oogziekenhuis te Rotterdam de contrastgevoeligheid van alle proefpersonen gemeten. Het onderzoek is beschreven in Van Houwelingen (1989). In het kort komt de meting op het volgende neer.

Iedere waarnemer (in dit geval zeven in getal) krijgt een aantal testkaarten aangeboden. Op de testkaarten zijn strepen met verschillende oriëntatie (verticaal, horizontaal, of volgens tussenliggende hoeken) aangebracht. De strepen hebben geen scherpe rand, maar vertonen, in dwarsrichting gezien, een sinusvormig verloop van de luminantie. Het gaat dus om een rasterpatroon, waarbij de "spijlen" niet scherp begrensd zijn, maar geleidelijk van donker naar licht verlopen - het lijkt dus op een onscherpe afbeelding. Gevarieerd wordt, naast de oriëntatie, de spatiale frequentie (de "breedte" van de strepen) en het contrast van de strepen met de achtergrond. Het contrast is hierbij anders gedefinieerd als in de verlichtingskunde gebruikelijk is (zoals bijvoorbeeld in [1] is aangegeven). De contrastgevoeligheid wordt bij dit soort onderzoek uitgedrukt in de reciproke waarde van C0, waarbij C0 gedefinieerd is als:

$$C0 = \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \quad [6]$$

Hierbij zijn L₁ en L₂ resp. de luminanties van het donkerste en het lichtste gedeelte van het patroon. L₁ representeert dus de streep, en L₂ kan als de achtergrond worden beschouwd. De relatie tussen C en C0 volgt uit de formules [1] en [6], en is als volgt te bepalen:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad [1]; \quad C0 = \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \quad [6]$$

Hieruit volgt dat

$$C = \frac{L_2 + L_1}{L_1} C_0$$

Bij een zeer gering contrast - en daar gaat het bij de drempelwaarden om - zijn L_1 en L_2 vrijwel gelijk, dus bij goede benadering is $C = 2 C_0$.

De proefpersonen moeten bij iedere presentatie aangeven wat de oriëntatie is van het vertoonde raster. Voor iedere spatiale frequentie kan het kleinste contrast worden bepaald waarbij de oriëntatie nog goed wordt aangegeven. Dit contrast vertegenwoordigt het drempelcontrast bij de bedoelde spatiale frequentie. In vrijwel alle gevallen bleek de kleinste waarde voor het drempelcontrast (de hoogste waarde voor de contrastgevoeligheid) gevonden te zijn voor een spatiale frequentie van 6 strepen per graad gezichtshoek.

Vooraf is voor iedere proefpersoon op de gebruikelijke wijze (met een leeskaart) de gezichtsscherpte bepaald. Alle proefpersonen bleken een "goede" tot "zeer goede" gezichtsscherpte te hebben, zodat met eventuele oogafwijkingen geen rekening behoefde te worden gehouden.

De contrastgevoeligheid is voor beide ogen apart bepaald. Tussen de twee ogen werd meestal een verschil gevonden. Voor de verdere verwerking is de uitkomst van het "beste" oog gebruikt, omdat mag worden aangenomen dat het "beste" oog het meest representatief is voor het waarnemen van voorwerpen die dicht tegen de drempel van de waarneembaarheid liggen.

De resultaten zijn in Tabel 1 weergegeven.

In de tabel staat het de hoogste waarde voor de contrastgevoeligheid waarbij voor een spatiale frequentie van zes strepen per graad gezichtshoek de oriëntatie nog kon worden aangegeven - waarbij de strepen dus nog juist konden worden ontwaard.

De nauwkeurigheid van de uitkomst is beperkt. Om een indruk te geven van de spreiding die men mag verwachten, is het gemiddelde en de standaarddeviatie bepaald, ofschoon niet bekend is of aan de aanname dat de ver-

deling van de gegevens op een redelijke wijze door een normale verdeling kan worden beschreven, is voldaan. Het resultaat is 179 # 42. Hieruit volgt de suggestie dat de waarde van de uitkomst met een redelijke waarschijnlijkheid ligt tussen 221 en 137. Een dergelijke spreiding rechtvaardigt niet het gebruik van het gemiddelde en de standaarddeviatie. Voor het verdere gebruik van de gegevens is daarom de modus (de uitkomst met de hoogste frequentie) gebruikt. Deze is 185.

Het verdient overweging om voor een nadere uitwerking van de meetgegevens voor iedere waarnemer zijn of haar "eigen" drempelwaarde te gebruiken. Aangezien momenteel voor een dergelijke uitbreiding geen fondsen beschikbaar zijn, zal, zoals reeds is aangegeven, verder de "gemiddelde" waarde (de modus) worden gebruikt.

Bij de geringe contrasten die bij de drempelwaarden van belang zijn, is, zoals hierboven aangegeven, met goede benadering $C = 2 C_0$. De genoemde waarde van 185 correspondeert met $C = 0,0108$ (of wel met 1,1%). Deze waarde is gebruikt voor de drempelwaarde "C" in de basisformule [4].

3.4. De stoorkluminantie L_d

Hierboven is reeds gesproken van de "stoorkluminantie" L_d . Zoals in de eerder genoemde studie in detail is aangegeven, bestaat de "stoorkluminantie" uit vier componenten (Schreuder & Oud, 1988). Zie ook Vos (1983) en Padmos & Alferdinck (1983, 1983a).

Te zamen leveren deze vier componenten de stoorkluminantie L_d :

$$L_d = L_{adef} + L_{seq} + L_{atm} + L_{ruit} \quad [7]$$

Hierin is:

L_{adef} : de component die te maken heeft met de veranderingen van helderheid en het achterblijven van de adaptatie;

L_{seq} : de bijdrage tot de sluier die afkomstig is van het in het oog verstrooide licht;

L_{atm} : de bijdrage tot de sluier afkomstig van het licht dat verstrooid is in de atmosfeer;

L_{ruit} : de bijdrage tot de sluier afkomstig van het licht dat verstrooid is in de ruit van de auto.

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

Ook bij de bespreking van de hier gepresenteerde metingen moet met L_d rekening worden gehouden. We zullen achtereenvolgens bekijken wat de invloed van de afzonderlijke componenten van L_d bij de metingen is geweest.

3.4.1. Het adaptatiedefect

Uit eerder onderzoek, samengevat in Schreuder (1984) en Schreuder & Oud (1988), blijkt dat voor de normale dagsituatie in Nederland L_{adef} kan worden verwaarloosd. We stellen: $L_{adef} = 0$.

3.4.2. Strooilicht aan de ruit

Tijdens de proefnemingen zijn de autoruiten zorgvuldig gereinigd en schoon gehouden; bovendien was het helder en droog weer. We mogen dus de bijdrage van het in de voorruit verstrooide licht tot L_d verwaarlozen. We stellen: $L_{ruit} = 0$.

3.4.3. Atmosferisch strooilicht

Tijdens de metingen was het meteorologisch zicht zeer goed tot uitzonderlijk goed. Aangezien Dordrecht halverwege op de verbindinglijn tussen de vliegvelden Rotterdam en Gilze-Rijen, is het zicht voor de Drechtunnel bepaald door de opgaven van deze twee stations te middelen. De meetgegevens staan in Tabel 2. Het gemiddelde van het meteorologisch zicht voor de twee dagen is voor Dordrecht: 18,17 km. Uit de door Padmos afgeleide betrekking

$$L_{atm} = 290 * \frac{L_{hor}}{V_m}$$

(waarin L_{hor} de luminantie van de lucht in de horizontale richting is, en V_m het meteorologisch zicht is in meters; zie Padmos & Alferdinck 1983a)

volgt dat voor een zicht van 18,17 km L_{atm} ca. 1,6% bedraagt van L_{hor} , en dus verwaarloosd kan worden. We stellen: $L_{atm} = 0$.

3.4.4. Strooilicht in het oog

Blijft dus over het strooilicht in het oog L_{seq} . Deze kan rechtstreeks worden gemeten met behulp van de daartoe geëigende meetapparatuur, bestaande uit een Pritchard-luminantiemeter en een Fry-lens. Voor details over deze methode zij verwezen naar de literatuur (Schreuder, 1981; Van Bommel & De Boer, 1980).

L_{seq} dient te worden gemeten vanuit de positie van de waarnemer, dat wil zeggen van een punt op de weg op 100 à 200 meter voor de tunnel op de weg. Aangezien de metingen van de veldfactor moeten worden uitgevoerd onder normale verkeersomstandigheden, bleek het niet mogelijk te zijn L_{seq} van een punt op de weg te meten. Verderop zal worden aangegeven hoe bij deze metingen L_{seq} is bepaald.

3.5. De veldfactor

De veldfactor f is een vermenigvuldigingsfactor die de relatie aangeeft tussen enerzijds de drempelwaarde zoals die in het laboratorium wordt gevonden, en anderzijds de drempelwaarde die op de weg in het werkelijke verkeer wordt gevonden. Deze factor vertegenwoordigt het feit dat de waarnemer tegelijk verkeersdeelnemer is: naast het waarnemen van eventuele objecten moet het voertuig worden bediend, en moet op het overige verkeer worden gelet.

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

Het hier beschreven onderzoek heeft tot doel om de veldfactor f in de praktijk te bepalen. In par. 3.1 is de volgende formule voor f afgeleid:

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

Wanneer f moet worden bepaald uit de veldexperimenten, moet voor C de waarde van het intrinsieke contrast worden genomen, die correspondeert met het nog juist zichtbaar zijn van het object.

4. OPZET EN UITVOERING

4.1. Algemeen overzicht van de opzet

De opzet van de experimenten is in detail beschreven in Biesheuvel & Planken (1989). Uitgangspunt was het feit dat de waarnemer tegelijk verkeersdeelnemer moest zijn; de metingen dienen in het normale verkeer te worden uitgevoerd. Daartoe is een opstelling gebruikt die in beginsel uit twee (personen)auto's bestond die op een vaste afstand achter elkaar door de tunnel reden (Afbeelding 1). Op de voorste auto was een contrastobject bevestigd; de achterste auto werd door de waarnemer bestuurd, waarbij op gezette tijden moest worden aangegeven welke van de objecten nog zichtbaar was.

4.2. Het contrastobject

Het contrastobject bestond uit een bord waarop de cijfers 1 t/m 6 waren afgebeeld. De hoogte van de cijfers was 0,25 meter. De cijfers waren grijs, de achtergrond was wit, zodat er tussen cijfer (object) en achtergrond geen kleurverschil bestond: de twee onderscheidden zich uitsluitend door hun luminanties (Afbeelding 2). Zowel de cijfers als de achtergrond vertoonden een diffuse reflectie, zodat er van glimmen geen sprake was, en de luminantie uitsluitend werd bepaald door de verlichtingssterkte op de objecten en op de achtergrond (die gezien de wijze van monteren op de auto gelijk was) en de diffuse reflectiefactor. Dit betekent dat de contrasten van de verschillende cijfers eens en voor al bepaald konden worden aan de hand van de reflectiefactoren, en gedurende de gehele proefneming gelijk waren - onafhankelijk van de verlichting. De contrasten die de cijfers tegen de achtergrond vertoonden zijn gegeven in Tabel 3.

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

De afstand tussen de meetauto en de objectauto werd continu gemeten met behulp van een optische afstandmeter (vaak ondersteund door een radar-afstandmeter; dit bleek niet veel toe te voegen aan de nauwkeurigheid). De gegevens werden op de videoband ingesproken, waarmee de synchronisatie gewaarborgd was. De afstand werd zo goed mogelijk constant gehouden - ofschoon dit gezien de opzet van het onderzoek niet zo kritisch is - door aan de hand van de uitkomsten van deze afstandmetingen de snelheid van de objectauto aan te passen.

4.3. De waarnemers

De contrastwaarnemingen zijn uitgevoerd door zeven waarnemers, twee vrouwen en vijf mannen, allen tussen 25 en 30 jaren oud met enige jaren rij-ervaring en - zoals in par. 3.3 is aangegeven - goede tot zeer goede gezichtscherpte. Voor alle waarnemers de drempels voor de contrastgevoeligheid gemeten (Van Houwelingen, 1989).

Voor het onderhavige onderzoek is zeven waarnemers ruim voldoende. Het gaat immers steeds om vergelijkingen in de contrastwaarneming op de open weg en in de tunnel. Het is daarmee niet van belang of de waarnemers op een of andere manier kunnen worden beschouwd als een representatieve steekproef uit de bevolking, of uit de autorijdende populatie. Wanneer dit nodig zou zijn, zou een aanzienlijk grotere steekproef noodzakelijk zijn geweest.

De ritten zijn door de zeven waarnemers/bestuurders bij toerbeurt uitgevoerd. De rijnsnelheid was steeds ca. 90 km/uur; de afstand tot de objectauto was niet precies constant, maar is steeds gemeten en bedroeg 70 à 85 meter. Uit de in de tunnel continu uitgevoerde verkeerstellingen bleek dat de verkeersdrukke tijdens de metingen voor de Drechtunnel normaal was, met het gewone aandeel vrachtverkeer. Het weer was, zoals aangegeven, zeer helder.

4.4. Waarnemingstaak en rijtaak

Bij de hier gekozen opzet wijkt de situatie in twee opzichten af van hetgeen een autobestuurder normaliter op de weg ontmoet. Ten eerste is de waarnemer - in tegenstelling tot het normale deelnemen in het verkeer -

zich zeer wel bewust van de experimentele situatie, en ten tweede is het object steeds zichtbaar.

Uit onderzoek betreffende de attentie van bestuurders, en uit onderzoek betreffende de patronen van oogbewegingen van bestuurders komt echter naar voren dat vrijwel alle bestuurders bij het naderen van een tunnel hun aandacht sterk richten op de ingang ervan. Op grond van deze gegevens is aangenomen dat in het geval van het naderen van een tunnel deze methode kan worden gebruikt om de rijtaak van een autobestuurder te benaderen. Deze onderzoeken zijn in detail beschreven in Schreuder (1981). Het is dus alleszins gerechtvaardigd om ten behoeve van het onderzoek naar de veldfactor deze methode te gebruiken. Het is echter de vraag of deze methode ook gebruikt zou kunnen worden bij het bestuderen van de rijtaak op een de "gewone" open weg.

Het continu zichtbaar zijn van het object is voor het onderhavige onderzoek al evenmin een ernstig bezwaar, omdat ten eerste vele objecten - zoals voorliggers - ook continu zichtbaar zijn, en omdat ten tweede het onderzoek in essentie een vergelijking inhoudt tussen de situatie in de toegangszone en in de drempelzone; de waarnemingscondities zijn daarbij dezelfde.

4.5. De contrastwaarnemingen

De veldexperimenten zijn uitgevoerd op 4 en 5 juli 1989. De metingen zijn op beide dagen begonnen kort na zonsopgang en gingen door tot kort voor zonsondergang. Op deze wijze zijn alle mogelijke dagsituaties bij het onderzoek betrokken, van "schemering" tot en met "volle zon". Vooral deze laatste situatie is van belang. Wat dit betreft was het weer zeer gunstig voor de waarnemingen. De hoogste waarde van de verlichtingssterkte was ruim 110 000 lux; hogere waarden zijn in Nederland vrijwel nooit gemeten.

Gedurende deze gehele tijdperiode zijn experimentele ritten uitgevoerd, in totaal meer dan 150 in getal. Iedere rit bestond uit een ronde, waarbij beide tunnelbuizen werden bereden; gekeerd werd in Dordrecht en in Zwijndrecht. Een rit was ongeveer zeven km lang; een rit nam meestal niet meer dan zeven à acht minuten in beslag (Stam, 1989). In elke rit werden beide tunnelbuizen gebruikt (steeds de "buitenste" buizen; de Drechtunnel heeft

twee buizen per rijrichting), zodat per rit twee meetseries konden worden uitgevoerd (zie Afbeelding 3).

In totaal zijn ca. 300 meetseries uitgevoerd. Daarvan is een aantal om technische redenen niet bruikbaar. Meestal was dit het gevolg van druk vrachtverkeer in de tunnel, waardoor de objectauto niet zichtbaar was. Ook zijn enige meetseries uitgevallen door problemen met de synchronisatie en met de radio's. In totaal zijn 275 bruikbare meetseries uitgevoerd.

In iedere meetserie is een aantal contrastwaarnemingen uitgevoerd. Allereerst zijn drie à vijf waarnemingen gedaan op de open weg voor de tunnelingang. Deze dienen voor iedere meetserie als uitgangspunt: de contrastgevoeligheid in de tunnelingang wordt steeds per meetserie vergeleken met de contrastgevoeligheid op de open weg. De open weg omvatte daarbij de toegangszone en een stuk weg waar de tunnel nog niet of nauwelijks te zien was. Vervolgens zijn zoveel mogelijk waarnemingen in de drempelzone uitgevoerd. Deze waarnemingen zijn uiteraard het meest van belang: het doel van het onderzoek is het bepalen van de veldfactor juist betreffende de waarneming van objecten in de drempelzone van de tunnel. Aangezien de waarnemingen met een tussenpoos van ca. 1,5 seconde werden uitgevoerd, en de snelheid van de voertuigen bij de proefnemingen ca. 75 à 100 km/uur was (25 à 35 m/s), konden per meetserie ten hoogste twee waarnemingen in de drempelzone worden uitgevoerd; meestal slechts één. Tenslotte is volledigheidshalve een aantal waarnemingen gedaan in de tunnel; deze waarnemingen waren verspreid over de overgangszone, het interieur en de uitgang. Deze waarnemingen zijn voor dit betreffende onderzoek van ondergeschikt belang, en worden vooralsnog niet verder gebruikt. Ze kunnen in de toekomst alsnog van belang zijn wanneer er onderzoek naar de verlichting van het interieur en van de uitgangszone zou worden ondernomen. In totaal zijn per meetserie vier à zes waarnemingen gedaan; het totale onderzoek omvat ruim duizend waarnemingen.

De plaatsbepaling van de objectauto is alleen kritisch bij de waarnemingen in de drempelzone: op de open weg is er geen verschil te verwachten tussen opeenvolgende "punten" op de weg, en de waarnemingen in de tunnel zelf zijn verder niet gebruikt. De plaatsbepaling van de objectauto in de drempelzone geschiedde als volgt: op de tunnelwand was iedere vier meter een markering aangebracht. De plaats van de objectauto ten opzichte van deze

markeringen werd vastgesteld door in deze auto een schijnwerper met een smalle, haaks op de rijrichting schijnende, lichtbundel aan te brengen. Deze bundel gaf een lichtvlek die op de videoband gemakkelijk kon worden herkend en ten opzichte van de wandmarkeringen kon worden gelokaliseerd. De tijdsynchronisatie vond plaats door de waarnemingen op dezelfde band - op het audiokanaal - op te nemen. Op deze wijze is de plaats van de objectauto op ongeveer één meter nauwkeurig te bepalen. Omdat steeds de afstand tussen de meetauto en de objectauto werd gemeten, was steeds ook de plaats van de meetauto - en dus van de waarnemer - bekend, en wel tot op ca. vijf meter (Stam, 1989).

4.6. De lichtniveaus

Bij de ritten werden zowel het lichtniveau buiten de tunnel als het lichtniveau in de tunnel gevarieerd.

Het lichtniveau buiten de tunnel kan uiteraard niet door de experimentatoren worden gewijzigd. Verschillende lichtniveaus buiten zijn verkregen door de waarnemingen op verschillende tijdstippen uit te voeren. Het tijdstip van de dag leverde een bepaald lichtniveau buiten op. Het lichtniveau is vastgelegd door de luminantie van het portaal te meten. Dit heeft twee voordelen ten opzichte van de meer traditionele horizontale verlichtingssterkte: ten eerste is de luminantie van het portaal meer maatgevend voor de zichtomstandigheden bij het binnenrijden van de tunnel, en ten tweede is er in de Drechtunnel een installatie aanwezig waarmee deze luminantie continu kan worden gemeten. Overigens is ter ondersteuning op een aantal tijdstippen ook nog de horizontale verlichtingssterkte bepaald. De luminantie van het portaal wordt in het normale bedrijf van de tunnel gebruikt om de verlichting in het inwendige van de tunnel te sturen. Zie verder par. 4.7.

Voor de verlichting in de tunnel staan een aantal schakelregimes ("stappen" of "schakelstanden") ter beschikking, genummerd van 0 tot 6. De verschillende standen betekenen dat er in de verschillende delen van de tunnel (drempelzone, overgangszone, interieur) lampen van verschillend typen en vermogen worden in-, resp. uitgeschakeld. De niveaus van de verlichtingssterkte die in de zes standen die voor gebruik overdag in aanmerking komen, zijn gegeven in Tabel 4. De metingen zijn vrijwel tegelijk

met de proefnemingen uitgevoerd (Dalderup & Retera, 1989). Ter vereenvoudiging van de aflezing is de meting van de luminantie van het tunnelportaal zodanig ingericht dat dezelfde nummers worden bepaald. Dit betekent dat bij een buitenluminantie van het portaal overeenkomend met stand 5 ook de tunnelverlichting op stand 5 dient te worden geschakeld. In het normale bedrijf van de tunnel zijn de twee waarden aan elkaar gekoppeld, zodat de verlichting in de tunnel de veranderingen in de buitenverlichting automatisch volgt. Voor de proefnemingen is deze verbinding losgekoppeld, zodat de verlichting in de tunnel apart (met de hand) kon worden geschakeld. De stappen waarin luminantie van het tunnelportaal worden uitgedrukt, zijn middels een vergelijking met de rechtstreekse sluiertluminantiemeting gecalibreerd in waarden van L_{seq} . Dit alles betekent dat voor de proefnemingen het lichtniveau buiten de tunnel uitgedrukt kan worden in waarden van L_{seq} .

Het lichtniveau in de tunnel werd gevarieerd door bij ieder buitenniveau zo veel mogelijk verschillende schakelstanden te kiezen. Daarbij werd voor zover mogelijk geschakeld van "hoog" naar "laag"; dit om zo min mogelijk tijdverlies op te lopen. Immers, gasontladingslampen hebben enige tijd nodig om na het inschakelen hun volle lichtstroom te bereiken omdat ze moeten opwarmen. Dit kost bij hogedruk natriumlampen - die in de drempelzone aangebracht zijn - ca. tien minuten. Na uitschakelen neemt de lichtstroom uiteraard meteen tot nul af. Door van "hoog" naar "laag" te schakelen, heeft men dit tijdverlies slechts eens in de vier à vijf ritten. Dit betekent dat een "lage" stand steeds komt na een "hoge", zodat de waarnemers tot zekere hoogte kunnen inschatten aan de hand van de ervaring in een bepaalde rit kunnen schatten wat hun bij de volgende rit wordt zal worden gepresenteerd. De opeenvolging van situaties is niet "random". Aangezien het steeds ging om een vergelijking van de situatie buiten de tunnel en er binnen, lijkt dit geen groot bezwaar op te leveren. Overigens was het binnen de omvang van de proef niet mogelijk om een andere opzet toe te passen.

De lichtniveaus in de verschillende delen van de tunnel bij de verschillende schakelstanden zijn gegeven in Tabel 4. De verhouding tussen E en L_{weg} is niet constant. Dit is het gevolg van de verschillen in het type van de verlichting.

De lichttechnische metingen zijn uitgevoerd op 3, 4 en 5 juli 1989. Ze vielen dus voor het grootste deel precies samen met de veldexperimenten. De metingen zijn uitgevoerd enige dagen nadat de tunnel en de armaturen erin zijn gereinigd, en nadat nieuwe lampen zijn aangebracht. De metingen komen daarom vrijwel precies overeen met de "100 uur-waarden", die gewoonlijk voor berekeningen worden gebruikt.

De gemeten waarden in de tunnel wijken af van de waarden zoals ze zijn gemeten toen de tunnel nieuw was (Foucart, 1979). De reden is dat in 1983 de tunnel is gerenoveerd. Daarbij is de verlichtingsinstallatie vervangen door een andere. Het heeft geen zin om de oude meetwaarden te gebruiken.

4.7. De sluieryluminantie

De sluieryluminantie is rechtstreeks gemeten met de Pritchard luminantiemeter, die daartoe was uitgerust met de Fry-lens gemeten. Deze metingen zijn aan de westbuis - de noordzijde, richting Breda op 100 m en 200 voor het portaal uitgevoerd; aan de zuidzijde - de oostbuis, richting Rotterdam op 250 m voor het tunnelportaal. Dit laatste omdat er aan de zuidzijde geen vluchtstrook aanwezig is. Details over de metingen en over de daarbij gebruikte apparatuur zijn gegeven in Dalderup & Retera (1989). De resultaten van de metingen zijn gegeven in Tabel 5. Opgemerkt zij dat er tijdens deze meetsessies ook andere gegevens zijn verzameld; aangezien ze in het onderhavige onderzoek niet zijn gebruikt, worden ze ook niet verder besproken.

Tijdens de metingen varieerde de horizontale verlichtingssterkte. We beschikken over drie situaties waar zowel L_{seq} als L_p bekend zijn (en ook E_{hor} , zodat de L_{seq} -waarden op 100 000 lux kunnen worden genormeerd). Deze drie tweetallen zijn gebruikt om de waarden van L_p die in schaaldelen zijn gemeten, de calibreren in termen van de L_{seq} en ze uit te drukken in cd/m^2 . De verhouding L_{seq}/L_p is niet in alle drie gevallen gelijk; voor de calibrering is de gemiddelde waarde gebruikt. Deze is (afgerond) 4,5. Het gemiddelde kan hier worden gebruikt, omdat de drie waarden, hoewel verschillend, toch vrij dicht bijeen liggen. Dit is te meer bemerkenswaard omdat de omstandigheden waarbij L_{seq} is gemeten, sterk verschillen (verschillende tunnelbuis, verschillende afstand, verschillende tijdstippen).

In de Drechttunnel wordt, ten behoeve van het bedienen van het automatische schakelsysteem voor de verlichting in de tunnel, aan beide ingangen continu de luminantie van het tunnelportaal bepaald. Hierbij wordt de gemiddelde luminantie binnen een rechthoek met zijden (in hoekmaat) van ongeveer 7 bij 14 graden gemeten. We zullen dit aangeven met L_p (p voor portaal). De resultaten worden in een lineaire schaal (in schaaldelen) weergegeven.

De automatische lichtregeling in de Drechttunnel is zodanig ingericht, dat bij bepaalde waarden van de luminantie van het tunnelportaal over wordt gegaan van een bepaald schakelregime (schakelstand) naar het naastliggende. Op deze wijze correspondeert iedere schakelstand met een bepaald lichtniveau buiten de tunnel. Zoals reeds is aangegeven, is deze automatische regeling bij de proefnemingen uitgeschakeld. De bepaling van L_p is echter doorgegaan; bij (bijna) iedere rit is bepaald welke stand de automatische regeling voor de tunnelverlichting zou kiezen (de L_p -waarde). Apart is bepaald bij welke waarde van L_p (in schaaldelen) deze overgangen plaats vonden. Deze waarden zijn gegeven in Tabel 6.

Het verband tussen de schakelstanden en L_p (in schaaldelen) is niet precies lineair, maar voldoende regelmatig om grafisch te extrapoleren. Gezien de spreidingen die in de proefnemingen naar voren komen, lijkt een extrapolatie "op het oog" nauwkeurig genoeg. Dit is uitgevoerd in Afbeelding 4.

Uit de "gladde" kromme van Afbeelding 4 zijn de waarden voor L_p afgelezen, die verder zijn gebruikt. Deze waarden in schaaldelen zijn met de omrekeningsfactor uit Tabel 5, omgerekend tot waarden van L_{seq} in cd/m^2 . In Tabel 7 zijn de resultaten opgegeven, zowel voor de punten waar de niveaus werden overgeschakeld, als voor de midpunten van de gebieden die bij een bepaalde schakelstand behoren. Deze midpunten worden beschouwd als een karakteristiek voor de L_{seq} voor het gehele gebied dat door de schakelstand wordt gedekt. Deze midpunten zijn voor de verdere berekening van de veldfactor gebruikt (zie Hoofdstuk 7).

5. RESULTATEN

De resultaten van de veldmetingen zijn gegeven in het rapport van Stam & Van Vuren (Stam, 1989). Ze zijn in Tabel 8 samengevat.

In deze tabel zijn de drempelwaarden gegeven van de contrasten zoals ze zijn waargenomen. De meetpunten geven de punten aan in de drempelzone van de tunnel, die zoals in par. 4.5 is beschreven, op de wand waren gemarkeerd. De verder naar buiten liggende punten alsmede de verder naar binnen liggende punten zijn, zoals reeds aangegeven, niet precies gelokaliseerd. Ze zijn in de tabel aangeduid met "buiten" en "overgang". De eerste kolom "verl" geeft de lichtniveaus aan, zoals in par. 4.7 is aangegeven, kunnen de luminantiewaarden van het portaal - en dus L_{seq} - op dezelfde wijze als het niveau in de drempelzone in "stappen" worden weergegeven. Deze stappen corresponderen voor de tunnelverlichting zelf met de in bedrijf zijnde verlichting. (3-2 betekent stand 3 buiten, stand 2 binnen). Het bleek niet mogelijk te zijn voor iedere combinatie van lichtniveau "buiten" en "binnen" even veel waarnemingen te doen. Allereerst bleek dat gedurende de ochtend en de namiddag het lichtniveau buiten de tunnel snel verandert, zodat de lage niveau's "buiten" ondervertegenwoordigd zijn. Meer in het bijzonder bleek het niet mogelijk te zijn om de hoogste niveaus "binnen" te combineren met de laagste niveaus "buiten". Voorts was het uit een oogpunt van de verkeersveiligheid niet toelaatbaar om de hoogste niveaus "buiten" te combineren met de laagste niveaus "binnen". Het aantal waarnemingen per combinatie is in de laatste kolom aangegeven met "aant." Het overgrote deel van de waarnemingen is uitgevoerd bij stand 4 "buiten". De waarden voor het contrast zijn gegeven in §; de waarden zijn gemiddeld voor iedere combinatie van lichtniveau binnen en buiten.

Ten behoeve van de bepaling van de veldfactor f is het nodig, de drempelwaarde van het contrast te kennen zoals die in de drempelzone van de tunnel gemeten is. Voor deze drempelwaarde is het gemiddelde genomen van de relevante metingen in de drempelzone. Daarbij zijn de metingen in de eerste ca. 8 meter (de eerste twee meetpunten) niet gebruikt. Het contrast wordt daar beïnvloed door het binnenvallende daglicht. Het gemiddelde is dus steeds bepaald voor de meetpunten 3 t/m 9.

6. BEPALING VAN DE VELDFACTOR f

Alle gegevens voor het bepalen van f zijn nu bekend. De formule daarvoor was

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

In deze formule kunnen nu de hierboven gegeven waarden voor L_2 , C , C'' en L_d worden ingevuld, omdat voor de omstandigheden zoals ze bij de proefneming waren, $L_d = L_{seq}$. Bedacht moet worden dat zulks in het algemeen bepaald niet het geval is: slechts zelden kunnen L_{atm} en L_{ruit} worden verwaarloosd. Zie par. 3.4.

De berekeningen zijn weergegeven in Tabel 9.

Bij de berekeningen zijn alleen die combinaties van de stappen binnen en buiten gebruikt waarbij de binnen aanwezige stap gelijk was of hoger dan de "gewenste" stap: alleen in deze gevallen kan van een redelijke tot goede ingangsverlichting worden gesproken. De metingen bij het buitenniveau corresponderend met stap 1 zijn buiten beschouwing gelaten, omdat dit buitenniveau meer met de schemer dan met het daglicht correspondeert.

De resultaten van iedere gebruikte combinatie van stap buiten en stap binnen is "gewogen" volgens het aantal waarnemingen waarop deze resultaten is gebaseerd. Dit betekent dat daarmee de stap 4 "buiten" sterk oververtegenwoordigd is in de resultaten, en dat de hier gegeven waarde van f sterk is beïnvloed door deze oververtegenwoordiging.

De eindwaarde van de veldfactor is gebaseerd op de verzameling van de gebruikte combinaties. Het eindresultaat van de berekeningen is 4,492. Gezien de onnauwkeurigheden in de metingen wordt kan resultaat worden afgerond op 4,5.

Het is, gezien de opzet van de experimenten, niet mogelijk om een formele foutenberekening uit te voeren. Om toch een indruk te krijgen over de nauwkeurigheid van het eindresultaat is de standaardwafwijking bepaald van alle "gebruikte" waarnemingen. Deze is in Tabel 9 toegevoegd, en blijkt 0,896 te bedragen. Uiteraard heeft het opgeven van deze standaarddeviatie

slechts een beperkte betekenis. Weliswaar kan de standaarddeviatie met de daarvoor in aanmerking komende formules worden berekend, maar het resultaat ervan kan alleen in termen van nauwkeurigheid van meetresultaten worden geïnterpreteerd wanneer de gebruikte gegevens volgens een normale verdeling zijn verdeeld. Dit laatste is bij de hier verzamelde gegevens niet het geval, zoals onder meer uit de relatieve oververtegenwoordiging van "stap 4 buiten" blijkt. Een statistische toets over de mate waarin de gegevens van een normale verdeling afwijken is om deze reden achterwege gelaten.

Gezien de grootte van de spreiding in de resultaten - waarvoor de berekende standaarddeviatie een eerste benadering is - kan als uiteindelijk resultaat worden opgegeven:

$$f = 4,5 \pm 0,9;$$

of, met andere woorden, de waarde van f ligt met een grote waarschijnlijkheid tussen 3,6 en 5,4.

7. DISCUSSIE

Een nadere beschouwing van Tabel 9 leert dat de veldfactor f voor de bij de proefnemingen voorkomende omstandigheden geen constante is, zoals op grond van de theoretische overwegingen verwacht wordt. Er lijkt een verband te bestaan tussen f en de relatie tussen het lichtniveau buiten en binnen de tunnel. In Tabel 10 is dit geïllustreerd. Het heeft er de schijn van dat f toeneemt bij toenemend lichtniveau in de drempelzone van de tunnel.

Gezien de beperkte omvang van het experiment is het niet mogelijk te zeggen of het hier gaat om een experimenteel "artefact" of om een werkelijk aanwezig verschijnsel. Het verloop van de waarden van f , en meer speciaal de afhankelijkheid van de lichtniveaus binnen en buiten de tunnel doen echter het laatste vermoeden. Meer in het bijzonder zou dit resultaat de suggestie kunnen opleveren dat het wellicht niet geoorloofd is om voor extreme omstandigheden de adaptatie - en dan meer speciaal het adaptatiedefect L_{adef} - te verwaarlozen. Dit was uiteraard reeds bekend; het is echter momenteel niet te zeggen of een dergelijk effect reeds kan optreden bij de omstandigheden zoals ze zich bij de experimenten in de Drechtunnel voordeden. Het lijkt de moeite waard - bijvoorbeeld middels een vervolgonderzoek - te proberen de oorzaak van dit op zichzelf merkwaardige verschijnsel te onderzoeken. Voor de praktijk is dit echter van ondergeschikt belang: die gevallen waarbij het lichtniveau in de drempelzone beduidend lager is dan "gewenst", dienen bij het ontwerp en bij het bedienen van de verlichtingsinstallatie in tunnels vermeden te worden, en lage luminanties in de toegangszone hebben eerder met het "schemer"-regime van doen dan met een van de "dag"-regimes.

In Hoofdstuk 6 is de waarde voor f afgeleid. Deze blijkt ongeveer 4,5 te bedragen. Uit de literatuur zijn geen vergelijkbare experimenten, noch vergelijkbare overwegingen bekend. Wel is op verschillende plaatsen gespeculeerd over de grootte van de veldfactor. Daarbij zijn soms waarden opgegeven die wat betreft de grootte vergelijkbaar zijn met de hier gevonden waarde.

Aan de hand van deze waarde kan worden bekeken in hoeverre de Drechtunnel onder normaal bedrijf aan te de te stellen voorwaarden voldoet. Daarvoor

worden de gegevens in de basisformule ingevuld voor de situatie dat "stand buiten" gelijk is aan "stand binnen": dat correspondeert immers met het normale bedrijf. De formule is:

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

Vult men nu in:

$$f = 4,5$$

$$C'' = 0,011$$

$$C = 0,2$$

dan vindt men voor de verschillende standen de volgende waarden voor de gewenste luminantie in de drempelzone (L_2) in relatie tot de aanwezige waarde van :

Stand	Gewenste waarde van L_2	Aanwezige waarde van L_2
2	32 (cd/m ²)	12 (cd/m ²)
3	54	23
4	88	71
5	137	125

De waarden van de aanwezige luminanties zijn alle lager, en voor lage buitenniveaus aanzienlijk lager dan de gewenste waarden. Het is echter bekend dat L_2 sterk af hangt van de gekozen waarde van C; herhaalt met de berekening voor C = 0,3 dan vindt men:

Stand	Gewenste waarde van L_2	Aanwezige waarde van L_2
2	19 (cd/m ²)	12 (cd/m ²)
3	32	23
4	53	71
5	82	125

Dit lijkt meer met de indruk die men van de verlichting van de Drechtunnel kan opdoen, overeen te stemmen. Hieruit zou men de voorzichtige sug-

gestie kunnen afleiden dat de waarden van $C = 0,2$ wellicht voor de praktijk te streng is, en dat $C = 0,3$ beter met de realiteit overeen stemt. Voor de hoogste waarden van het lichtniveau buiten de tunnel voldoet de verlichting ruimschoots, terwijl bij lagere buitenniveaus de verlichting "mager" is. Hieruit zou een suggestie voor het herzien van het schakelregime kunnen worden afgeleid. Bij de extra marge die zich bij hoge buitenniveaus lijkt voor te doen, moet men bedenken dat de omstandigheden bij de experimenten exceptioneel gunstig waren (zeer helder weer, uitzonderlijk goed zicht en niet te vergeten zorgvuldig gereinigde voorruit). Bij ongunstige omstandigheden (laagstaande zon; door zon beschenen nevel of "smog", waarbij hogere waarden van L_d kunnen voorkomen) is er van een marge waarschijnlijk geen sprake meer. De verlichting in de Drechttunnel is niet overdadig. Dit stemt overeen met de ervaring: men is over het algemeen van mening dat de verlichting van de Drechttunnel van hoog gehalte is, en ook nog voldoet onder overigens ongunstige omstandigheden.

LITERATUUR

Anon (1989). Beleuchtung von Tunnelleinfahrtzonen. CIE-SLG Symposium Agno/-Lugano, 12. Oktober 1989. SLG, Bern, 1989.

Biesheuvel, M.A. & Planken, J.J.A. (1989). Bepaling f-factor tunnelingang. Afstudeeropdracht Hoger Technisch Onderwijs HTO, Rotterdam, 1989.

Bommel, J.W.M. van & Boer, J.B. de (1980). Road lighting. Kluwer, Deventer, 1980.

CIE (1973). International recommendations for tunnel lighting. Publication No. 26. CIE, Paris, 1973.

CIE (1987). International lighting vocabulary; 4th edition. Publication No. 17.4. CIE, Paris, 1987.

CIE (1989). Guide for the lighting of road tunnels and underpasses (Draft) CIE, Paris, 1989.

Dalderup, R. & Retera, W. (1989). Lichtmetingen Drechtunnel - Dordrecht, Philips Lighting BV, Eindhoven, 1989 (Niet gepubliceerd).

Foucart, A. (1979). Verkeersregeling en automatisering van de technische diensten in de Drechtunnel te Dordrecht (Nederland). ACEC, Charleroi, 1979 (overdruk uit ACEC-Tijdschrift Nr. 78/3-4).

Houwelingen, A.W.M. van (1989). Tunnelmetingen RWS. Oogziekenhuis, Rotterdam, 1989 (Niet gepubliceerd).

NSvV (1963). Aanbevelingen voor tunnelverlichting. Electrotechniek 41 (1963) 23 - 32; 46 - 53.

NSvV (1989). Aanbevelingen voor de verlichting van lange tunnels voor het gemotoriseerde verkeer (Concept) NSvV, 1989.

Padmos, P. & Alferdinck, J.W.A.M. (1983). Verblinding bij tunnelingangen II: De invloed van atmosferisch strooilicht. IZF 1983 C-9. IZF-TNO, Soesterberg, 1983.

Padmos, P. & Alferdinck, J.W.A.M. (1983a). Verblinding bij tunnelingangen III: De invloed van strooilicht van de autovoorraad. IZF 1983 C-10, IZF-TNO, Soesterberg, 1983.

Schreuder, D.A. (1964). The lighting of vehicular traffic tunnels. Centrex, Eindhoven, 1964.

Schreuder, D.A. (1981). De verlichting van tunnelingangen. R-81-26 I+II. SWOV, Leidschendam, 1981.

Schreuder, D.A. (1989). The field factor for the determination of tunnel entrance luminance levels. In: Anon. (1989) 3.

Schreuder, D.A. & Oud, H.J.C. (1988). The predetermination of the luminance in tunnel entrances at day. R-88-13. SWOV, Leidschendam, 1988.

Stam, A. (1989). Resultaten meting tunnelverlichting Drechtunnel. Stam en Van Vuren Organisatieadviseurs, Sliedrecht, 1989 (Niet gepubliceerd).

Vos, J.J. (1983). Verblinding bij tunnelingangen I: De invloed van strooilicht in het oog. IZF 1983 C-8. IZF-TNO Soesterberg, 1983.

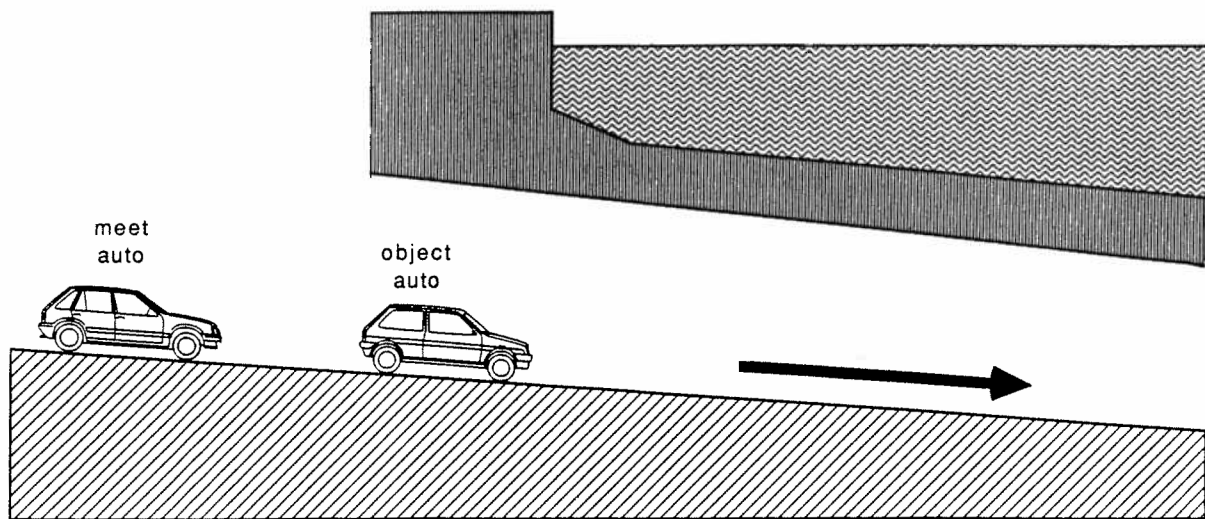
AFBEELDINGEN 1 T/M 4

Afbeeldingen 1. Meetopstelling: twee (personen)auto's reden op een vaste afstand achter elkaar door de tunnel.

Afbeelding 2. Het contrastobject met de cijfers 1 t/m 6 die zich uitsluitend onderscheiden door hun luminanties.

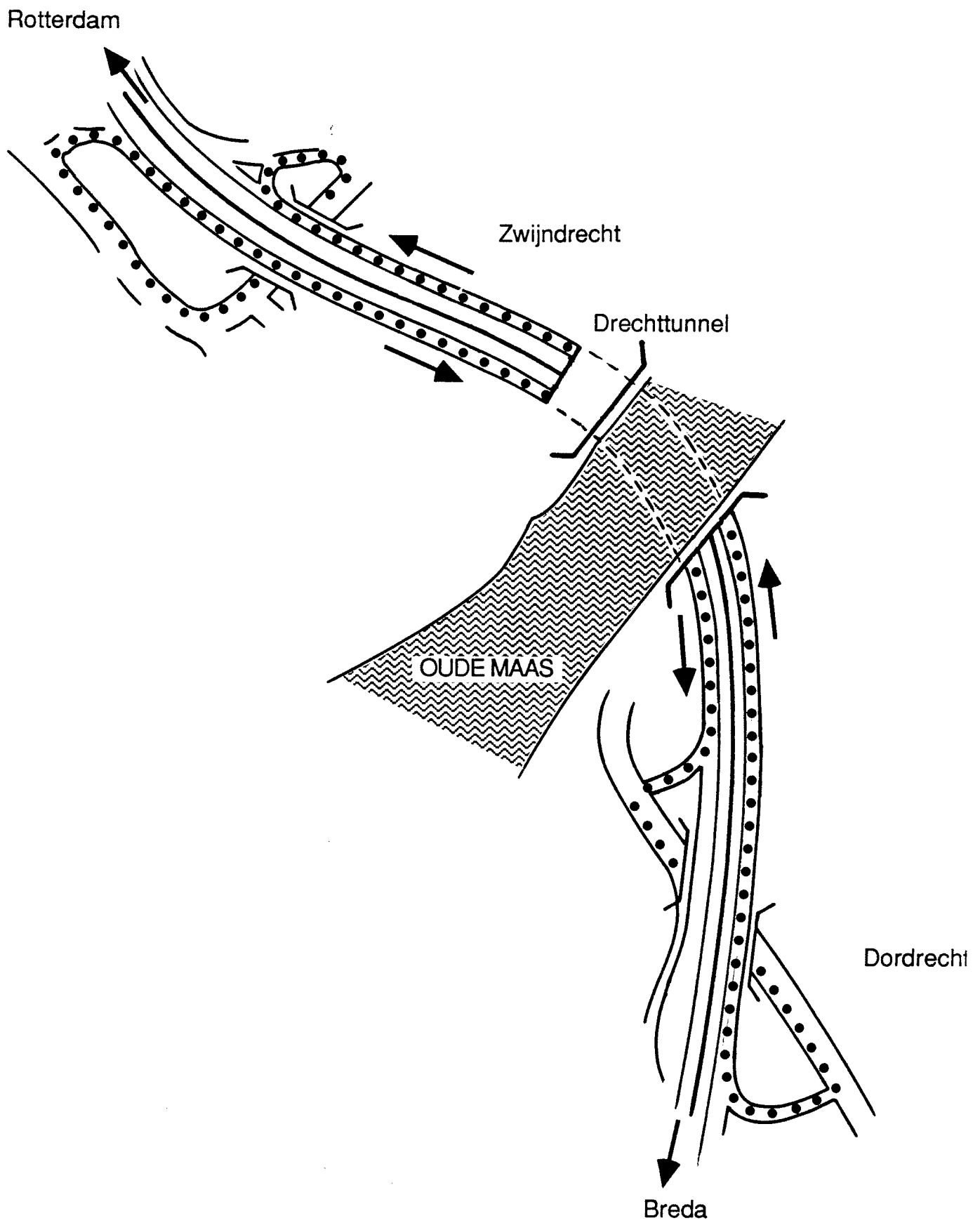
Afbeelding 3. Het meettraject door de Drechtunnel: twee meetseries per complete rit.

Afbeelding 4. Het verband tussen de schakelstanden van het verlichtingssysteem in de Drechtunnel en L_p (in schaaldelen).

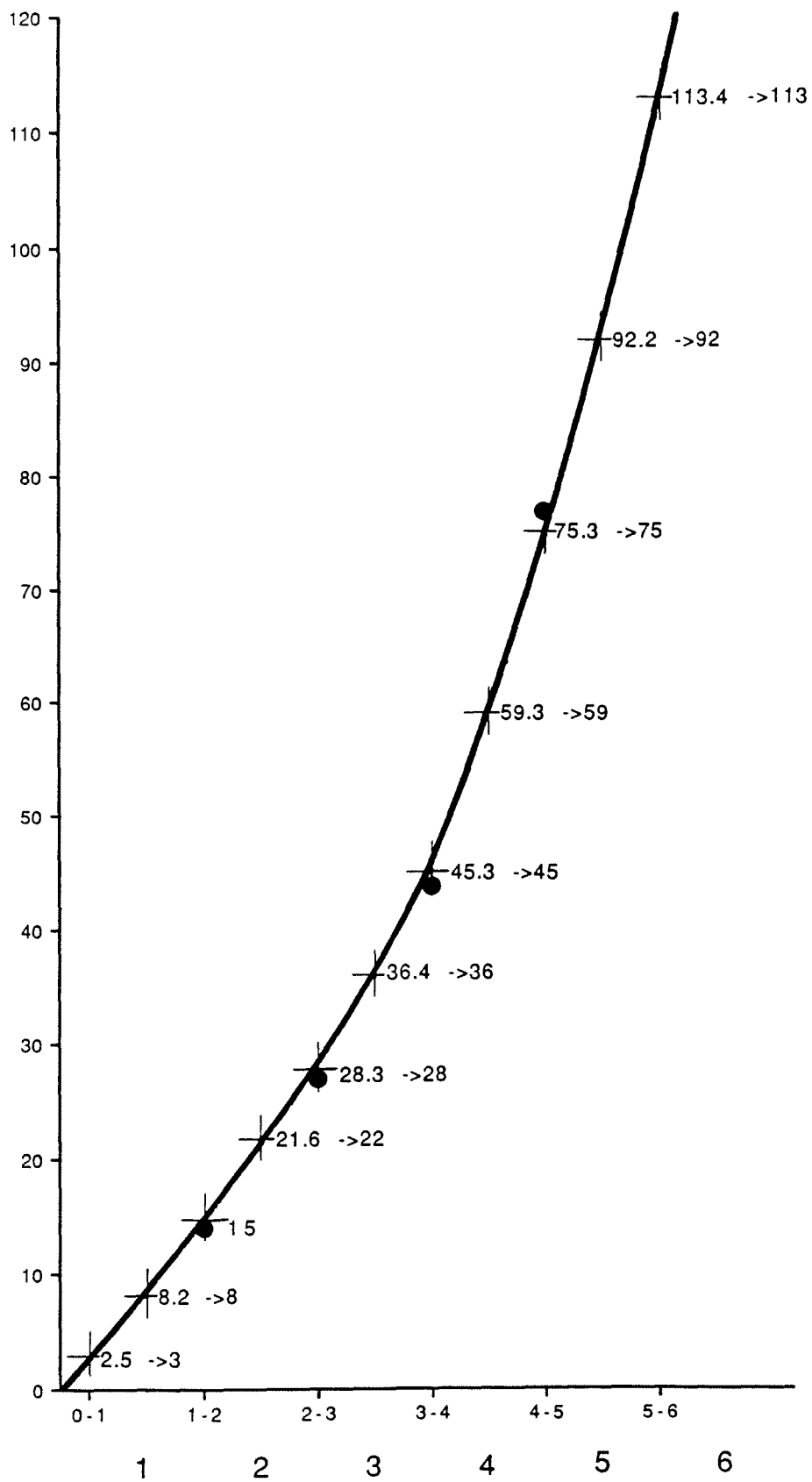


Afbeeldingen 1. Meetopstelling: twee (personen)auto's reden op een vaste afstand achter elkaar door de tunnel.

Afbeelding 2. Het contrastobject met de cijfers 1 t/m 6 die zich uitsluitend onderscheiden door hun luminanties.



Afbeelding 3. Het meettraject door de Drechttunnel: twee meetseries per complete rit.



Afbeelding 4. Het verband tussen de schakelstanden van het verlichtings-systeem in de Drechtunnel en L_p (in schaaldelen).

TABELLEN 1 T/M 10

Tabel 1. Contrastgevoeligheid van de proefpersonen.

Tabel 2. Meteorologisch zicht (in km) voor Rotterdam, Gilze-Rijen en Dordrecht (Bron: KNMI te De Bilt).

Tabel 3. De contrasten tussen de cijfers en de achtergrond (in %).

Tabel 4. Verlichtingssterkten en luminanties in de Drechttunnel. Gemiddelden van Oost- en Westbuis. Naar Dalderup & Retera (1989).

Tabel 5. Gemeten waarden L_{seq} , L_p en E_{hor} .

Tabel 6. L_p (in schaaldelen) voor de verschillende overgangen in de buitenluminantie.

Tabel 7. Calibrering van L_p in L_{seq} . Metingen volgens Tabel 6; interpolatie volgens Afbeelding 4.

Tabel 8. Meetresultaten. Gemiddelden van de drempelcontrasten voor verschillende combinaties van verlichting buiten en binnen (3-2 betekent stand 3 buiten, stand 2 binnen). Afstanden in meter van tunnelportaal.

Tabel 9. Berekening van veldfactor f .

Tabel 10. Relatie tussen het verschil in binnen en buitenniveau en f . Tussen haakjes: f waarden bepaald aan de hand van minder dan 5 meetseries.

Proefpersoon	Linker oog	Rechter oog
1	185*	125
2	185*	125
3	125*	125
4	125	185*
5	185	260*
6	125*	125
7	185*	125

* "Beste" oog

De modus van de "beste" ogen is 185.

Tabel 1. Contrastgevoeligheid van de proefpersonen.

Datum	Uur	Rotterdam	Gilze-Rijen	Dordrecht
4 juli 1989	6	18	15	17
	7	20	15	17
	8	20	18	19
	9	20	20	20
	10	20	25	22
	11	20	25	22
	12	20	30	25
	13	22	30	26
	14	22	30	26
	15	22	30	26
	16	35	30	33
	17	35	30	33
	18	35	20	27
	19	30	15	22
5 juli 1989	20	30	25	27
	21	25	13	19
	6	18	8	13
	7	20	10	15
	8	20	10	15
	9	20	10	15
	10	20	10	15
	11	20	10	15
	12	18	10	14
	13	14	9	12
	14	15	8	12
	15	14	8	11
16	12	8	10	
17	12	8	10	
18	11	9	10	
19	12	10	11	
20	12	10	11	
21	13	9	11	

Gemiddelde van alle waarnemingen: 18,17 km

Tabel 2. Meteorologisch zicht (in km) voor Rotterdam, Gilze-Rijen en Dordrecht (Bron: KNMI te De Bilt).

Cijfer	Contrast (%)
1	76
2	53
3	35
4	24
5	12
6	6

Tabel 3. De contrasten tussen de cijfers en de achtergrond (in %).

Schakel stand	Drempelzone				Overgangszone			
	E	L _{wand}	L _{weg}	E/L _{weg}	E	L _{wand}	L _{weg}	E/L _{weg}
1	120	5,75	5,0	24	120	5,75	5,0	24
2	220	13,3	10,7	20,5	220	13,3	10,7	20,5
3	427	24,8	22,3	19,2	220	13,3	10,7	20,5
4	1288	85	56	23,0	427	24,8	22,3	19,2
5	2303	150	100	23,0	821	63	53	15,4
6	4428	260	175	25,3	821	63	53	15,4

E: horizontale verlichtingssterkte

L_{wand}: wandluminantie (gem van links en rechts);

L_{weg}: wegdekluminantie.

Tabel 4. Verlichtingssterkten en luminanties in de Drechttunnel. Gemiddelden van Oost- en Westbuis. Naar Dalderup & Retera (1989).

L _{seq} (gemeten Pritchard)	Afstand	Buis	L _p (portaal) (schaald.)	L _{seq} /L _p	E _{hor} (lux)	L _{seq} (genormeerd op 10 ⁵ lux)
320	100 m	west	72,3	4,43	109.800	291
382	200 m	west	76,4	5,0	98.800	387
311	250 m	oost	75,5	4,12	112.100	277
			gemiddeld	4,517		318
			afgerond	4,5		

Tabel 5. Gemeten waarden L_{seq}, L_p en E_{hor}.

Lichtniveau buiten (stap.. naar ..)	L _p (schaald.)
1-2	14
2-3	27
3-4	44
4-5	77

Tabel 6. L_p (in schaaldelen) voor de verschillende overgangen in de buitenluminantie.

Stap buiten	Stap binnen	L ₂	C	n	L _d	C"	C"(L _d +L ₂)	L ₂ C	f	nf
1	2	12	0,35	2	37,04	0,011	0,5394	4,20	7,786	15,57
1	3	23	0,3225	4	-	-	0,6604	7,42	11,232	44,93
2	1	5,4	0,35	5	97,57	0,011	1,1327	1,89	1,6686	8,34
2	2	12	0,35	1	-	-	1,2053	4,2	3,4846	3,48**
2	3	23	0,35	1	-	-	1,3263	8,05	6,0695	6,07**
3	1	5,4	0,3633	5	164,42	0,01	1,8680	1,96	1,0502	5,25
3	2	12	0,306	6	-	-	1,9406	3,67	1,8922	11,35
3	3	23	0,35	5	-	-	2,0616	8,05	3,9047	19,52**
3	4	71	0,24	3	-	-	2,5896	17,04	6,5802	19,74**
3	5	125	0,18	3	-	-	3,1836	22,50	7,0675	21,20**
4	2	12	0,3033	33	267,86	0,011	3,0784	3,64	1,1823	39,02
4	3	23	0,2383	41	-	-	3,1995	5,48	1,1730	70,23
4	4	71	0,1817	47	-	-	3,7275	12,90	3,4609	162,66**
4	5	125	0,1683	46	-	-	4,3215	21,04	4,8681	223,93**
4	6	218	0,132	39	-	-	5,3445	28,78	5,3842	209,98**
5	3	23	0,262	13	416,47	0,011	4,8342	6,03	1,2465	16,20
5	4	71	0,16	6	-	-	5,3622	11,36	2,1185	12,71
5	5	125	0,156	7	-	-	5,9562	19,50	3,2739	22,92**
5	6	218	0,1133	7	-	-	6,9792	24,70	3,5390	24,78**

Totaal n (aangestreept) 159. Totaal nf (aangestreept) 714,28
 Gemiddelde f (aangestreept) $714,28/159 = 4,492$
 Standaarddeviatie (aangestreept) = 0,896

Tabel 9. Berekening van veldfactor f.

Stap buiten	Verschil in stappen "binnen" minus "buiten"				
	-2	-1	0	+1	+2
1				(7,8)	(11,2)
2		1,7	(3,5)	(6,1)	
3	1,1	1,9	3,9	(6,6)	(7,1)
4	1,2	1,7	3,5	4,9	5,4
5	1,2	2,1	3,3	3,5	

Tabel 10. Relatie tussen het verschil in binnen en buitenniveau en f.
 Tussen haakjes: f. waarden bepaald aan de hand van minder dan 5 meetseries.

AANHANGSEL

DE MINIMALE LUMINANTIE VOOR HET INTERIEUR VAN EEN LANGE TUNNEL

In de door de NSvV te publiceren Aanbevelingen voor Tunnelverlichting worden getallen gegeven voor de luminantie in het interieur van lange tunnels. Voor tunnels van de "hoogste" categorie wordt als luminantie in het interieur in nieuwe toestand als minimale waarde 15 cd/m^2 aanbevolen. Aangezien deze waarde niet met alle gebruikelijke installaties voor tunnelverlichting op eenvoudige wijze is te bereiken, werd het nuttig geoordeeld om een nadere bevestiging voor deze waarde te vinden. Als eerste poging is gebaseerd op de metingen in de Drechtunnel, waarbij gebruik is gemaakt van de ervaring dat de bedoelde tunnel over het algemeen als "goed verlicht" wordt aangemerkt. In gebruikstoestand - maar met schone armaturen en nieuwe lampen - is daar gemeten

$$E = 220 \text{ lux}$$

$$L = 12,3 \text{ cd/m}^2$$

(ontleend aan Tabel 4). Gezien de ervaringen worden deze waarden kennelijk gewoonlijk als voldoende beschouwd. Een nieuwwaarde van 15 cd/m^2 lijkt dus aan de ene kant gewenst, aan de andere kant in de praktijk ook uitvoerbaar. Het is dus niet nodig om het voorstel van de NSvV te wijzigen; ook lijkt een nadere wetenschappelijke onderbouwing van deze uitkomst niet nodig.