DE VERLICHTING VAN TUNNELINGANGEN: DE DERDE GENERATIE

Artikel Wegen 55 (1981) 8 (789): 242-245

R-81-21

Dr.ir. D.A. Schreuder

Voorburg, 1981

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

1. INLEIDING

Verkeerstunnels worden gewoonlijk aangelegd uit verkeerskundige overwegingen: er bestaan bepaalde belemmeringen waardoor het verkeer niet naar wens kan worden afgewerkt; door nu een tunnel aan te leggen kan men in vele gevallen de belemmeringen vermijden. Dergelijke belemmeringen zijn bijvoorbeeld drukbevaren rivieren en kanalen, startbanen van vliegvelden, spoorwegen enz., maar ook bergen en heuvels.
Het spreekt voor zich dat, aangezien de tunnel een middel is om een belemmering te vermijden, de tunnel zelf niet weer een belemmering moet vormen. Dit houdt in dat het verkeer in de tunnel met tenminste dezelfde mate van veiligheid en vlotheid moet kunnen worden afgewikkeld als op de aanliggende open wegen. De praktijk heeft geleerd dat aan de vlotheid en denkelijk ook wel aan de veiligheid, vooral overdag bij de ingang van de tunnel, sterk kan teruglopen, en dat een goede verlichting van de tunnelingang, juist overdag, een aanzienlijke verbetering kan opleveren. Het zal duidelijk zijn dat dit vooral geldt voor die verkeerswijzen waarbij de visuele factoren een grote rol spelen. De hierna volgende beschouwingen gelden derhalve bij uitstek voor tunnels ten behoeve van het gemotoriseerde snelverkeer.

De voor het veilige verkeer gewenste mogelijkheid om kleine objecten te kunnen zien wordt door twee eigenschappen van het menselijke visuele systeem beperkt. De eerste beperking is het gevolg van de onmogelijkheid om kritische details in een donker deel van het gezichtsveld te kunnen waarnemen wanneer de ooggevoeligheid ingesteld is op de hoge helderheid van het open veld. Dit verschijnsel leidt ertoe dat ook een goed verlichte tunnelingang zich aan een naderende automobilist voordoet als een "zwart gat". De tweede beperking is erin gelegen dat er vaak een aanzienlijke tijd verstrijkt voordat de ooggevoeligheid zich aan een lager lichtniveau heeft aangepast.

2. 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. Er is overigens weinig bekend over de verlichting van die oude tunnels. Het gemotoriseerde verkeer echter stelt 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. 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. Zie hiervoor bijvoorbeeld de publikaties van Myers (1939) en van Van Bruggen (1941). 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 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. De metingen van Nutting (1928) werden meestal als basis aangenomen. Daaruit volgde een overgangstijd (adaptatietijd) 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 de grote helderheid van de omgeving direct om de ingang heen.
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 roosters die het daglicht temperen was het lichtniveau veel hoger dan 1000 lux; luminanties*) van 800 cd/m^2 zijn gemeten (zie Schreuder, 1964). Bij deze tunnel is echter weinig aandacht besteed aan het feit dat tijdsafhankelijke effecten bij de oogadaptatie een rol kunnen spelen: men is uitgekomen op 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.

---

*) De luminantie is de in candela per vierkante meter (cd/m^2) uitgedrukte kwantitatieve maat voor het begrip "helderheid".

3. DE TWEEDE GENERATIE

De massamotorisering die in de meeste geïndustraliseerde 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 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), Waldram (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 voor Tunnelverlichting (CIE, 1973), aangezien die voor een belangrijk gedeelte gebaseerd zijn op de aanbevelingen uit Nederland (NSVV, 1963).
De CIE-aanbevelingen zijn de basis waarop vele nationale richtlijnen en aanbevelingen zijn gebaseerd. 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.

De CIE-aanbevelingen zijn gebaseerd op een aantal aannamen. De belangrijkste van deze aannamen zijn:

- De adaptatie van het visuele systeem kan bij een rit overdag over de open weg als constant worden beschouwd. De adaptatieluminantie wordt L_1 genoemd.
- In de open lucht komen waarden van L_1 van 8000 cd/m^2 of meer vaak voor.
- De adaptatie blijft gelijk aan L_1 tot op een geringe afstand van de tunnel. Anders gezegd: het adaptatiepunt (het punt waar de adaptatie een rol begint te spelen) ligt op korte afstand van de tunnel.
- 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 de drempelzone.
- De luminantie in de drempelzone, die 50 tot 100 m lang moet zijn, is constant.
- 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.
- 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.
- De luminantie in het interieur van lange tunnels moet ongeveer 10 tot 15 cd/m^2 bedragen.
- 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).

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 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 veel voorkomende lange onderdoorgang ook niet. Maar het belangrijkste punt is dat men sinds het opstellen van de CIE-aanbevelingen overal in de wereld op een geheel andere manier over het gebruik van elektrische energie is gaan denken, en dat tenslotte de economische situatie vrijwel overal zeer veel slechter is geworden.
Maar 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.

4. 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 besteden aan de functionele vereisten. Op basis van de proefnemingen was wel duidelijk 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 heel goed mogelijk door middel van op zich zelf vrij eenvoudige en goedkope maatregelen te bereiken dat de luminantie vrij dicht voor de tunnelingang gehalveerd werd ten opzichte van die in het vrije veld. Daarbij speelt het vroegtijdig afschermen van de vrije hemel (bijvoorbeeld door hoog naar boven toe doorgetrokken daglichtroosters) een belangrijke rol. Maar al spoedig bleek dat deze betrekkelijk kleine en op het eerste gezicht niet erg ingrijpende maatregel zeer verstrekkende gevolgen had. Zowel de ervaring in de praktijk als ook de resultaten van laboratoriumonderzoekingen geven aan dat bij de adaptatietoestand van 4000 cd/m^2 - in plaats van de 8000 cd/m^2 die voordien als criterium werd gebruikt - de langzaam verlopende (fotochemische) netvliesadaptatie nauwelijks van invloed is, en dat beperkingen van de zichtbaarheid bij tunnelingangen nog slechts - in hoofdzaak dan - het gevolg zijn van verblinding (lichtverstrooiing in het oog) teweeggebracht door de heldere omgeving van de tunnelopening. Dit nu is een verschijnsel dat niet zo erg voor de hand ligt. Immers, in de meeste gevallen die in de verlichtingstechniek aan de orde komen, heeft het verhogen of verlagen van de adaptatietoestand

met een factor 2 geen verstrekkende gevolgen van zulk een fundamentele aard. In het hier besproken geval echter gaat het om een beginniveau van 8000 cd/m^2, en het is bekend dat bij zulk een hoog niveau het visuele systeem niet meer optimaal kan functioneren. En daarom kan ook een niet zo erg grote verandering als een halvering van het adaptatieniveau, ertoe leiden dat men in feite met een geheel ander fysiologisch verschijnsel te maken krijgt.
De adaptatietoestand kan, wanneer de langzaam verlopende effecten verwaarloosd worden, op eenvoudige wijze worden beschreven met $L_a = L_f + L_{seq}$, waarbij L_a de adaptatieluminantie is, L_f de luminantie van het gezichtsveldgedeelte dat op de fovea (het middelste netvliesgedeelte waarmee scherpe waarneming mogelijk is) wordt afgebeeld, en L_{seq} de door verblinding veroorzaakte equivalente sluierluminantie.
De directe consequentie is dat het niet meer gerechtvaardigd is te beweren dat de buitenluminantie constant blijft. Ook het adaptatiepunt en zijn ligging is niet belangrijk meer.

Op ieder moment kan dus de adaptatie op deze wijze worden beschreven. Dit betekent dat het niet meer nodig is om een verschil te maken tussen de drempelzone en de overgangszone, daar de drempelzone immers was ingevoerd om rekening te kunnen houden met het feit dat de automobilist de tunnel in moet kunnen kijken, terwijl zijn ogen nog aan L_1 zijn geadapteerd. Pas bij zeer veel lagere adaptatieluminanties, zoals die in het interieur van lange tunnels voorkomen, behoeft men met adaptatie-effecten rekening te houden.

Blijft tenslotte de vraag wat nu de luminantie moet zijn in het eerste gedeelte van de tunnel. Wanneer men aanneemt dat een automobilist op dusdanig grote afstand de tunnel in moet kunnen kijken dat hij, bij het ontwaren van een obstakel op de weg, nog kan stoppen, dan volgt daaruit dat vanaf het stop-decisiepunt (het punt op de weg gelegen op een afstand voor de tunnelingang gelijk aan de praktische stopafstand, gekarakteriseerd door het feit dat de beslissing om te stoppen maatgevend is) het eerste stuk van de tunnel moet kunnen worden overzien. De adaptatielumi-

nantie daar ter plaatse is $L_{sdp} = L_2 + L_{seq}$, met L_2 de luminantie in het eerste stuk van de tunnel.
Elders worden een aantal methoden voor het bepalen van L_2 besproken (Van den Bijllaardt & Narisada, 1980).
We zullen hier volstaan met nog twee opmerkingen.
Ten eerste blijkt dat de constante verhouding tussen L_a en L_2 (L_a komt hier dus in de plaats van L_1) wel degelijk te handhaven is (Schreuder, 1978; CIE, 1980). In feite is die juistheid waarschijnlijk zelfs beter dan oorspronkelijk door Schreuder (1964) geponeerd, omdat voor zeer hoge L_a rekening moet worden gehouden met het feit dat de adaptatie de verlaging in het lichtniveau dan niet meteen kan volgen. Er ontstaat een adaptatiedefect, dat in luminantietermen kan worden aangeduid met L_{ad}. De adaptatieluminantie wordt dan in een meer algemene gedaante $L_a = L_f + L_{seq} + L_{ad}$. Wanneer nu de proefnemingen om L_2 te bepalen met een langere expositietijd worden uitgevoerd is het resultaat dat L_{ad} kleiner wordt. Dit leidt weer tot een kleinere L_2-waarde; zodoende is dus de door Schreuder (1964) gegeven waarde van L_2 voor zeer hoge waarde van L_1, te hoog. Mogelijkerwijs is de door Mäder & Fuchs (1966) gegeven waarde meer met de praktijk in overeenstemming. Van groot belang is dit echter niet omdat, zoals reeds eerder is aangegeven, dergelijke hoge L_1-waarden toch niet voorkomen, tenminste niet bij tunnels die op een verstandige wijze zijn ontworpen. De conclusie lijkt dus gerechtvaardigd dat voor alle in de praktijk voorkomende waarden de verhouding tussen L_a en de minimale waarde van L_2 constant is. Dit is van belang voor de verlichting van de tunnelingang; immers, op iedere plaats in de tunnel kan de benodigde luminantie rechtstreeks uit het verloop van de adaptatieluminantie buiten de tunnel worden afgeleid.
De tweede opmerking betreft de toepassing van daglichtroosters.
In het verleden is steeds de eis gesteld dat roosters "zondicht" moesten zijn. De lichtdoorlating van roosters die aan deze eis voldoen blijkt echter op den duur, door vervuiling en corrosie, veel te gering te worden. Daarom heeft men bij een aantal tunnels van het gebruik van daglichtroosters afgezien. Wanneer men echter de eis van zondichtheid los mag laten - en recente onderzoekingen

geven de suggestie dat dit mag - dan kan men uiteraard de lichtdoorlating zeer hoog maken en ook houden. Roosters worden dan weer een interessante propositie voor de verlichting van tunnelingangen.

NAWOORD

Dit artikel is gebaseerd op een voordracht gehouden op het door de Lichttechnische Gesellschaft in oktober 1980 gehouden congres. Het onderwerp vormt een onderdeel van een uitgebreide studie over de verlichting van tunnelingangen, die, in opdracht van de Rijkswaterstaat, in uitvoering is bij de SWOV.

LITERATUUR

Brass, J.R. et al. (1957). A new approach to highway tunnel lighting. Illum. Engng. 52 (1957): 137-143.

CIE (1973). International Recommendations for Tunnel Lighting. Publication CIE No. 26. Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, 1973.

CIE (1981). The luminance in the thresholds zone. Commission Internationale de l'Eclairage, Paris. (In druk).

Jainski, P. (1959). Tunnelbeleuchtung zur Verkehrssicherung. Lichttechnik 11 (1959): 67-69.

Kabayama, H. (1963). Study on adaptive illumination for sudden change of brightness. J. Illum. Engng. Inst. Japan 47 (1963): 488-496.

Kruithof, A.M. (1948). Enige beschouwingen in verband met het verlichten van verkeerstunnels. Philips Techn. Tijdschr. 10 (1948): 299-306.

Lossagk, H. (1955). Sehsicherheit bei Tageslicht in Unterführungen. Lichttechnik 7 (1955): 49-53.

Mäder, F. & Fuchs, O. (1966). Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln. Bulletin SEV 57 (1966): 359-366.

Myers, R. (1939). Light transmitting louvres for high speed vehicular tunnels. Trans. Illum. Engng. Soc. (Amer.) 34 (1939): 621-626.

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

Nutting, P.G. (1920). The optical principles of illuminating engineering. Ill. Engng. 15 (1920): 529.

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

Schreuder, D.A. (1968). Ein Vergleich von Empfehlungen für Tunneleinfahrt-beleuchtung. Lichttechnik 20 (1968): 20A-21A.

Schreuder, D.A. (1978). Optische Probleme bei Tunneleinfahrtbeleuchtung. TU, Berlin. (Niet gepubliceerd).

Van Bruggen, J.P. (1941). De Maastunnel te Rotterdam; Proefnemingen en onderzoekingen. De Ingenieur 56 (1941): B24.

Van den Bijllaardt, D. & Narisada, K. (1980). Die Leuchtdichte in der Einsichtstrecke eines Strassentunnels. Tagungsband Lichttechnische Gesellschaft e.V., Berlin, 1980.

Waldram, J.M. (1962). Lighting and visibility in the approaches to underpasses. GEC Journal 29 (1962): 119-129.