

## Verblinding in de straatverlichting, TI

### 1. Inleiding, plaats van TI

Eind 2017 heeft de NSVV besloten om aandacht te richten op een aantal aspecten die te maken hebben met de openbare verlichting van publieke ruimten. De aandacht is daarbij in de eerste instantie gericht op de hinder die gebruikers van de openbare ruimte kunnen ervaren.

Dit aspect is reeds lang een onderwerp van studie geweest. De resultaten van deze studies zijn gebruikt om aanbevelingen, richtlijnen en normen voor openbare verlichting op te stellen. Deze normen zijn nationaal en internationaal aanvaard.

Het is gebruikelijk om de mate van verblinding in installaties voor openbare straatverlichting uit te drukken in een grootte die met TI wordt aangeduid. TI staat voor threshold increment. De achterliggende gedachte is tweevoudig. Ten eerste is aangenomen dat de kwaliteit van een installatie voor openbare straatverlichting onder meer wordt bepaald door de drempelwaarde van de contrastgevoeligheid van het menselijk oog, die in de betreffende verlichtingsinstallatie is bereikt, of kan worden bereikt. Ten tweede wordt deze drempelwaarde hoger bij aanwezigheid van verblinding, omdat de verblinding de optimale waarneming verstoort. Dit wordt dus uitgedrukt in TI. In de genoemde nationale en internationale aanbevelingen en normen is aangenomen dat een TI van 10% acceptabel is, tenminste voor een aantal weg- en verkeerstypen. De gebruikelijke ontwerpmethoden zijn op deze waarde gebaseerd.

Bij de toepassing van deze normen zijn problemen naar voren gekomen. Sommige daarvan zijn al heel lang bekend, maar vooral de recente toepassingen op grote schaal van leds hebben nieuwe problemen opgeroepen en oude problemen versterkt. Deze praktijkervaringen zijn onder meer aanleiding geweest tot het genoemde initiatief van de NSVV. In de omschrijving van het project van de NSVV is gesteld: "Op basis van opgedane ervaringen ontstaat het gevoel dat na introductie van led-armaturen in de openbare ruimte verblinding, en effecten van verblinding, sterk toegenomen zijn. De huidige rekenmethoden en grenswaarden zijn mogelijk niet langer bruikbaar en toereikend." Als eerste stap is voorgesteld: "Onderzoek historie en werkwijze berekening TI-waarde zoals opgenomen in CIE, CEN en NEN documenten" (NSVV, 2017). Het onderhavige rapport betreft dit eerste onderdeel.

Startpunt is een korte omschrijving van wat TI is, hoe het wordt bepaald, en hoe ermee kan worden gewerkt. Het gaat om het waarnemen van een object tegen een achtergrond. Het criterium van waarnemen is het contrast. Gegeven is een bepaalde adaptatietoestand 1, gekenmerkt door de adaptatieluminantie  $L_{ad1}$ . Daarbij hoort een bepaald drempelcontrast  $C_{thr}$ . Dat betekent dat een kleiner contrast niet kan worden waargenomen. Contrast wordt weergegeven door  $(L_{ad} - L_o)/L_{ad}$ , met  $L_o$  de luminantie van het object. In situatie 1 is het kleinste contrast  $C_{thr1}$ .

Wanneer er verblinding plaatsvindt, wordt het verblindende licht in het oog verstrooid. Dit is situatie 2. Er ontstaat een lichtsluier in het oog die als equivalente sluiertiluminantie  $L_{seq}$  kan worden gekwantificeerd. De waarde van  $L_{seq}$  hangt af van de blikrichting en van de hoek tussen blikrichting

en de verblindingsrichting. Alle luminanties in het gezichtsveld worden met de desbetreffende sluiertiluminantie vergroot.

Ook voor situatie 2 kan het contrast worden bepaald.  $C_2$  is gelijk aan  $(L_{ad2} + L_{seq}) - (L_o + L_{seq}) / (L_{ad} + L_{seq})$ , ofwel  $(L_{ad2} - L_o) / (L_{ad} + L_{seq})$ , dus  $C_2$  is kleiner dan  $C_{thr1}$ . Immers, de teller van de breuk is gelijk en de noemer is groter. Het betreffende object dat zonder verblinding kan worden waargenomen, is met verblinding niet meer zichtbaar, want  $C_2$  is kleiner dan  $C_{thr}$ . Het is mogelijk om een nieuwe waarde van het drempelcontrast te bepalen in de situatie met verblinding. Dit is  $C_{thr2}$ . Uit bovenstaande volgt dat  $C_{thr2}$  groter is dan  $C_{thr1}$ . Dit effect wordt de drempelwaardeverhoging genoemd, in het Engels threshold increment of TI.

In de Norm NPR 13201 is de drempelwaardeverhoging van een object op het wegdek TI als volgt omschreven: "Toename van de contrastwaarde van een object nodig om dit nog net zichtbaar te laten zijn, bij aanwezigheid van hinderlijke verblinding door armaturen van een wegverlichtingsinstallatie, ten opzichte van de theoretische situatie zonder verblinding" (NEN, 2017, p. 7).

Nu is het bekend dat in het gebied van luminanties die bij gebruikelijke straatverlichting het meest voorkomen, het drempelcontrast kleiner wordt bij een toename van de adaptatieluminantie. Dit betekent dat in beginsel de negatieve invloed van de verblinding kan worden gecompenseerd door een verhoging van de adaptatieluminantie. Op grond van deze redenering is TI in de vigerende nationale en internationale regelgeving opgenomen als criterium voor de kwaliteit van straatverlichting.

## 2. De achtergronden voor het TI-concept

De oorspronkelijke gedachte achter het concept van de threshold increment was dat het negatieve effect van verblinding, dat leidt tot een verhoging van het drempelcontrast, kan worden tenietgedaan door de luminantie in het gezichtsveld te verhogen. Deze luminantie, die een maat wordt geacht te zijn voor de adaptatie-luminantie, wordt gewoonlijk gelijkgesteld aan de gemiddelde luminantie van het relevante weggedeelte. Omdat deze gelijkstelling een vrij slechte benadering is, en omdat de adaptatie-luminantie in de praktijk niet te berekenen noch te meten is, heeft men ervoor gekozen om alleen maar een grenswaarde voor de TI in de normen op te nemen.

Wanneer we echter de waarde van het bepalen van de verhoging van het drempelcontrast willen onderzoeken, zowel voor de theorievorming als voor de praktische toepassing, is het nodig om terug te gaan naar de oorspronkelijke gedachtegang. Deze is beschreven in de betreffende CIE-documenten, en in detail toegelicht in een aantal handboeken over de straatverlichting.

In de rapporten van de CIE is TI gedefinieerd als:

$$TI = 65 * L_{veil} / L_{av}^{0,8}$$

waarbij  $L_{av}$  de gemiddelde wegdekhelderheid is. Dit geldt voor  $0,05 < L_{av} < 5 \text{ cd/m}^2$

$L_{veil}$ : de sluiertiluminantie voor een blikrichting recht vooruit, langs de weg, en 1 graad onder de horizon (CIE, 1976, volgens Van Bommel, 2015, p. 20-21).

Dit vereist een verdere toelichting. Eerst  $L_{av}$ . Het is gebruikelijk om de gemiddelde wegdekluminantie als maat te nemen voor  $L_{av}$ . Dit is door de CIE als maat gedefinieerd. Voor de bepaling van  $L_{av}$  geldt een vaste procedure (CIE, 1995; NSVV, 1997; Schreuder, 1998, sec. 5.4.6, 5.4.7). Weliswaar geeft deze procedure een eenduidige waarde, maar met andere procedures kunnen aanzienlijk andere waarden voor  $L_{av}$  worden gevonden (Schreuder, 1967).

Ten tweede de  $L_{veil}$ . Over het algemeen wordt aangenomen dat de invloed van verblinding op de waarneming van kleine details wordt veroorzaakt door de verstrooiing van het licht dat het oog binnentreedt. Ofschoon er ook andere, onder meer neuronale, effecten bij verblinding optreden, worden deze gewoonlijk verwaarloosd. Verblinding, met name 'disability glare', wordt beschouwd als alleen een effect van het strooilicht in het oog (Vos, 1963; 1983; 2003). Dit verstrooide licht kan worden beschreven als een lichtsluier in het oog, die op haar beurt kan worden gekwantificeerd door een luminantie buiten het oog. Deze externe luminantie wordt dan gelijkgesteld aan de verstrooiing in het oog. Daarop is de term equivalente sluiertiluminantie gebaseerd. Verder is gebleken dat de totale sluier van een aantal, kleine of grote, verblindingslichtbronnen additief is. Daarbij blijkt dat de sluier zwakker wordt bij een toename van de hoek  $\theta$  tussen de verblindingsbron en de kijkrichting. In feite betekent dit dat de totale sluiertiluminantie de plaats inneemt van de adaptatie-luminantie bij de bepaling van drempelcontrasten.

### 3. Commentaar

#### (a). Drempelwaarden

Het gaat om drempelwaarden, maar het is de vraag of die veel met de verkeersveiligheid te maken hebben. Oude getallen lijken in een andere richting te wijzen. Het is niet bekend of er nieuwere getallen beschikbaar zijn, maar het gaat hier vooral om de orde van grootte (Schreuder 1996, tabel 7.2.4). Een steen of doos is als 'standaardobject' ingevoerd (Adrian & Schreuder, 1971; Schreuder, 1964, 1967). Een object van 20 cm op 100 m beslaat een hoek van ongeveer 10 boogminuten. Botsingen met losse voorwerpen op of langs de weg zijn echter zeer zeldzaam; het betreft ternauwernood een half procent (0,57%) van het totaal. Dit is de categorie waartoe de obstakels zoals 'stenen en dozen' behoren. Uit die tabel blijkt dat ruim tweederde van de ongevallen te maken heeft met botsingen tussen voertuigen die aan het verkeer deelnemen; het grootste deel daarvan betreft bewegende voertuigen. Wat moet dan wel als maatgevend object worden gekozen? Dat weten we eigenlijk niet. Het meest voor de hand ligt het idee dat het te maken heeft met de aandacht en de verdeling ervan.

De maat voor de ernst van de verblinding is gekoppeld aan drempelwaardemetingen. Deze zijn in laatste instantie terug te voeren op de resultaten van het werk van Blackwell (Blackwell, 1946; CIE, 1981). Er zijn ook andere resultaten die globaal in dezelfde richting wijzen. Deze resultaten geven inderdaad aan dat, in het gebied van luminanties die bij straatverlichting gebruikelijk zijn, een

verhoging van de adaptatie-luminantie gepaard gaat met een verkleining van het drempelcontrast. Het is niet bekend of dit ook het geval is bij bovendrempelige waarneming.

De wijze waarop drempelwaarden gewoonlijk zijn gemeten, geeft een aanwijzing over de beperkingen in de toepassingen van de resultaten. Drempelwaarden zijn alleen statisch bepaald. De kijkrichting en de grootte en aard van het waar te nemen object lagen vast, en er was steeds een grote achtergrond gebruikt, waarvan de luminantie per meting constant was. Ook de waarnemingstijden waren in vaste stappen gekozen. Tenslotte de keuze van de proefpersonen, meer in het bijzonder bij de experimenten van Blackwell. Het aantal proefpersonen was gering. Bovendien waren het vooral jonge, gezonde, hoog opgeleide vrouwen. Later zijn de condities uitgebreid. Het is onbekend in hoeverre de resultaten relevant zijn voor een verkeerssituatie, waarbij de waarnemingscondities van moment tot moment veranderen, en soms in sterke mate.

#### (b). Luminanties

TI berust op de verhouding van twee luminanties. Het begrip luminantie, de theoretische definitie, en de getalwaarden ervan zijn vastgelegd in wat bekend staat als de CIE standaard waarnemer (CIE, 1924; 1932). Dit is de grondslag voor de ISO-standaard van alle fotometrische grootheden en eenheden (ISO, 2005). De grondidee is dat de ooggevoeligheid zelf als basis voor de standaard is gebruikt, ook al waren de bezwaren bekend (Narisada & Schreuder, 2004, sec. 8.2.1). Van die bezwaren noemen we er twee. Ten eerste zijn de metingen gebaseerd op een gezichtsveld met de diameter van 2°. Herhaalde metingen met een gezichtsveld van 10° geven heel andere resultaten. Ten tweede bestonden er in de jaren 20 geen lichtbronnen waarmee blauw licht met hoge intensiteit kon worden gemaakt. De resultaten voor het blauwe gebied zijn dan ook van twijfelachtige waarde. Desondanks werd een 'standaard waarnemer' ingevoerd. Deze werd geacht alle mensen te vertegenwoordigen, ook al is bekend dat er grote verschillen in ooggevoeligheid bestaan tussen mensen, ook tussen gezonde mensen. Geen twee mensen zijn precies gelijk (Le Grand, 1956; Schober, 1960). De toepassing van deze standaard dient dan ook beperkt te blijven tot het gebruik als rekeneenheid. Recentelijk is daar nog een extra probleem bijgekomen. Traditioneel werd gewerkt met gloeilampen die de 'zwarte straler' dicht benaderen (Schreuder, 2008, sec. 2.3.1a; Joos, 1947, p. 585-587; Moon, 1961, sec. 5.03). Als er al gasontladingslampen werden gebruikt, hadden die eveneens een spectrale energieverdeling die niet al te sterk van die van de 'black body radiation' afweek. Maar de lichtgevende dioden, de leds, hebben meestal een sterk afwijkende energieverdeling. Momenteel zoekt men naar aanpassingen in de methodiek om de lichttechnische kenmerken van leds op goede, nauwkeurige, en eenduidige wijze te kunnen meten.

Er is nog een probleem. Het blijkt, ondanks de verbetering van de meet- en rekenmethoden, nog steeds moeilijk om luminanties, zoals ze in gewone straatverlichting voorkomen, op eenvoudige wijze met voldoende nauwkeurigheid te meten en te berekenen. Daarom wordt in vele gevallen bij de afnamecontrole van verlichtingsinstallaties de gemakkelijk te meten verlichtingssterkte gebruikt als maat voor de kwaliteit van de verlichting, in plaats van de luminanties, ook al zijn die in het bestek voorgeschreven, en ook al is het ontwerp op luminanties gebaseerd.

De bepaling van de luminantie van wegdekken levert speciale problemen op. Dit heeft te maken met de grote variaties in de reflectie-eigenschappen van wegdekken. Zelfs op een weg waarvan men zou menen dat de reflectie over een groot gebied gelijk zou zijn, omdat een groot deel ervan in één keer is aangelegd, komen grote verschillen voor. Ten eerste omdat de weersomstandigheden zeer grote invloed hebben. Natte, vochtige, en droge oppervlakken hebben een sterk verschillend patroon van lichtreflectie. Ten tweede bestaan er, ook binnen een in beginsel homogeen weggedeelte, grote

verschillen in textuur, mede ten gevolge van verschillen in verkeer en onderhoud. Al deze verschillen zijn niet in algemene zin te bepalen. Dit betekent dat de waarde van luminantie en haar bepaling voor het wegverkeer niet meer dan theoretische waarde heeft.

(c). De invloed van de autovoorraut

Er is nog een probleem bij het gebruik van luminantiewaarden in de straatverlichting. Voor verkeerswegen wordt de kwaliteit van de verlichting uitgedrukt in luminanties. Deze luminanties worden berekend aan de hand van gegevens die zijn verkregen uit metingen, hetzij in het laboratorium of op de weg, maar steeds direct, dat wil zeggen niet vanuit de plaats en de positie van een autobestuurder. In het verkeer wordt de weg echter bekeken door de voorruit van de auto. Dit heeft twee effecten: de bovenste afsnijhoek van het gezichtsveld, en de lichtdoorlating van de voorruit.

De afsnijhoek is in de meeste aanbevelingen en richtlijnen op 20° boven de horizon gesteld. Deze waarde is afkomstig uit oude schattingen. Recente metingen zijn niet bekend, maar uit metingen uit de jaren 1980 is gebleken dat deze waarde te laag is (Schreuder, 1985, 1986). Men mag aannemen dat de metingen voertuigen uit 1970 tot 1985 betreffen. Sindsdien is de styling van auto's sterk gewijzigd, vooral wat betreft de grootte en de helling van de voorruit. Het is niet te verwachten dat sinds 1986 de afsnijhoek kleiner is geworden. Hieronder zijn de metingen uit 1986 weergegeven, die betrekking hebben op ruim 1300 auto's. Het gemiddelde ligt ruim boven 20°.

-----

afsnijhoek in graden	aantal	percentage
5-10	4	0,31
10-15	94	7,20
15-20	278	21,32
20-25	334	25,61
25-30	292	22,39
30-35	154	11,80
35-40	72	5,52
40-45	34	2,61
45-50	10	0,77
50-55	4	0,31

-----

De lichtdoorlating van autoruiten voor de praktijk op de weg is niet precies bekend. Volgens Tintenruiten.nl "is de Europese richtlijn 92/22/EEG helder over de norm waaraan autoruiten moeten voldoen. De lichtdoorlatendheid van de voorruit moet bij toelating van het voertuig minimaal 75% zijn" (Anon., 2018). De meetmethode is niet bekend, maar waarschijnlijk wordt de doorlating langs de normaal op het oppervlak gemeten. Dit zou betekenen dat voorruit, die meestal sterk naar achteren hellen, in de praktijk een veel lagere doorlating hebben. De ANWB geeft aan dat de doorlating ten minste 55% moet zijn. Veel factoren, zoals vervuiling en beschadiging, die de doorlating nog verder kunnen reduceren, zijn behandeld in een Australisch overzichtsrapport (Pronk et al., 2001).

Eén en ander betekent dat de helderheid zoals de automobilist die ziet, lager is, en soms veel lager, dan de luminantie zoals die wordt berekend en eventueel op de weg wordt gemeten. De invloed van deze afname op de waarneembaarheid van objecten op de weg is niet bekend, maar omdat ze vrij aanzienlijk kan zijn, lijkt nader onderzoek gewenst.

#### (d). Mesopisch zien

Het menselijk oog bevat twee soorten lichtgevoelige elementen, aangeduid als kegeltjes en staafjes. De kegeltjes functioneren bij hoge lichtniveaus, terwijl de staafjes bij lage lichtniveaus werkzaam zijn. Met kegeltjes kunnen kleuren en kleine details worden waargenomen. Met de staafjes kan dat niet, maar ze zijn wel veel gevoeliger. Men noemt het gebied van helderheden waarbij de kegeltjes werkzaam zijn het ftopisch gebied. Dat van de staafjes heet het scotopisch gebied. Zoals te verwachten, ligt tussen die twee gebieden een overgangsgebied, het mesopisch gebied. Deze constatering is van belang, omdat de luminanties die bij gewone straatverlichting voorkomen, ten minste ten dele in het mesopisch gebied liggen.

Naar analogie van de hierboven aangegeven CIE standaard-waarnemer, die voor het ftopisch gebied geldt, heeft men ook een standaard waarnemer voor het scotopisch gebied gedefinieerd, met haar eigen spectrale gevoeligheidskromme. Gebleken is dat er voor het mesopisch gebied niet een enkele spectrale gevoeligheidskromme kan worden aangegeven. De spectrale gevoeligheid in het mesopisch gebied kan echter wel worden opgevat als een mengsel van de krommen voor de ftopische en de scotopische gebieden (CIE, 2016, 2016a). Dit wordt wel de regel van Palmer genoemd (Narisada & Schreuder, 2004, sec. 8.3.4).

De grenzen van het mesopisch gebied zijn niet precies aan te geven. Er bestaan geleidelijke overgangen tussen het ftopisch gebied en het mesopisch gebied enerzijds, en tussen het mesopisch gebied en het scotopisch gebied anderzijds. De wijze waarop het mesopisch gebied in de CIE-documenten is beschreven, maakt geen gebruik van het adaptatieniveau als onafhankelijk variabele. Doet men dat wel, dan blijkt dat het mesopisch gebied zich uitstrekt van ongeveer 3 cd/m<sup>2</sup> tot ongeveer 0,001 cd/m<sup>2</sup> (Hentschel, ed., 2002). Omdat er van geleidelijke overgangen sprake is, kan men aannemen dat het mesopisch zien in het 'bovengebied' erg zal lijken op het ftopisch zien, omdat die twee gebieden immers in elkaar overgaan. Daarom is het 'hoog-mesopisch gebied' ingevoerd (Schreuder, 1976). Dit hoog-mesopisch gebied strekt zich van ongeveer 3 tot ongeveer 0,1 cd/m<sup>2</sup> uit (Narisada & Schreuder, 2004, sec. 8.3.4). Dit betekent dat men zich bij de verlichting van verkeerswegen geen zorgen hoeft te maken over een eventuele invloed van het mesopisch zien, en zeker niet van het scotopisch zien. De reeds lang bestaande gewoonte om de fotometrie van straatverlichting te baseren op de CIE standaard-waarnemer is dus gerechtvaardigd. Wel moet men ermee rekening houden dat voor laag geklasseerde straten, zoals bijvoorbeeld veel woonstraten, mesopische effecten wel aan de orde kunnen komen.

(e). De sluierluminantie

Vervolgens is bij de behandeling van TI de sluierluminantie van belang. Hierboven is gesteld dat de invloed van verblinding op de waarneming van kleine details wordt veroorzaakt door de verstrooiing van het licht dat het oog binnentreedt. Dit verstrooide licht veroorzaakt een lichtsluier in het oog, en wordt beschreven door de 'equivalente sluierluminantie'. De sluier hangt af van de hoek  $\Theta$  tussen de verblindingsbron en de kijkrichting.

Voor een puntbron is volgens de gebruikelijke opgave  $L_{veil} = a \cdot E_{oog} / \Theta^2$ .

Hierin is  $E_{oog}$  de verlichtingssterkte op het vlak van het oog, en  $a$  is een constante die bij de gebruikelijke lichttechnische eenheden en grootheden de waarde van 10 heeft (Schreuder, 1996, sec. 8.3.2). Deze opgave is gebaseerd op het eerste voorstel dat op grote schaal bekendheid verwierf. Dit is afkomstig van Holladay (1927) en overgenomen door Stiles & Crawford (1937) en Adrian (1961). Deze betrekking, die ook wel de formule van Stiles-Holladay wordt genoemd, blijkt redelijk te kloppen voor waarden van  $\Theta$  groter dan  $4^\circ$ , en kleiner dan ongeveer  $60^\circ$ . Vooral de ondergrens is van belang. In veel praktische gevallen, meer in het bijzonder in het wegverkeer, is de verblindingshoek aanzienlijk kleiner dan  $4^\circ$ . Over de bovengrens wordt verderop nog een opmerking gemaakt.

Er zijn voorstellen gedaan om door een andere waarde van de exponent van  $\Theta$  te kiezen, een betere aansluiting te krijgen op de praktijk, meer in het bijzonder voor kleinere hoeken. Meestal kwam men uit op een exponent in de buurt van 2,8. (Hartmann & Moser, 1968; Hartmann & Ucke, 1974; Schreuder, 1981; Vos, 1963). Daarmee kon de verblinding tot aanzienlijk kleinere hoeken worden beschreven; vaak geeft men als ondergrens waarden op van 10 of 15 boogminuten. Ten behoeve van het in Nederland uitgevoerde onderzoek naar de verlichting van tunnels is aan de hand van alle toenmalig bekende gegevens een nieuwe formule voorgesteld (Vos, 1983; Vos & Padmos 1983). Deze formule geldt voor hoeken groter dan  $0,1^\circ$  (CIE, 2002, p. 9). Dit hoekbereik lijkt voldoende groot te zijn voor praktische toepassingen in de straatverlichting.

Verder onderzoek betreft de invloed van de leeftijd van de waarnemer, en van de pigmentatie van de iris (IJspeert et al., 1990). Voor hoeken tussen  $0,1$  en  $10^\circ$  lijkt de invloed van deze variabelen gering te zijn (CIE, 2002, fig. 6, p. 8).

De door Vos voorgestelde formule is tamelijk ingewikkeld. Zie hiervoor Vos & Padmos (1983) en Schreuder (1996, formule 7.3.4, p. 149). Men neemt meestal genoegen met een eenvoudiger formule, onder de aanname dat de afwijkingen nog acceptabel zullen blijven. Dit voorbehoud is echter nooit serieus geverifieerd. Volgens Van Bommel is de in normen vastgesteld formule om TI te berekenen:

$$TI = 65 \cdot \frac{L_{veil}}{L_{av}^{0,8}}$$

(Van Bommel, 2015, p. 20).

In CEN (1995) is de volgende formule voorgesteld, die duidelijk is geënt op bovenstaande betrekking:

$$TI = \frac{650 \cdot E_e \cdot MF^{0,8}}{L_{av}^{0,8} \cdot \Theta^2}$$

(Schreuder, 1996, formule 7.3.12, p. 131).

Daarin is:

- .  $E_e$  de verlichtingssterkte op het oog van de waarnemer loodrecht op de kijkrichting (1,5 m hoog; kijkrichting  $1^\circ$  naar beneden en op 1/4 van de wegbreedte opgesteld; in lux per 1000 initiële lamplumens), ook wel  $E_{oog}$  genoemd;
- .  $MF$  is de onderhoudsfactor ('maintenance factor');
- .  $L_{av}$  de gemiddelde wegdeklluminantie;
- .  $\Theta$  de verblindingshoek.

Ofschoon het niet is opgegeven, mag men aannemen dat  $MF$  als getal,  $L_{av}$  in  $cd/m^2$ , en  $\Theta$  in graden worden uitgedrukt. Dezelfde formule is door de CIE voorgesteld (CIE, 1995).

Problematisch bij al deze betrekkingen is dat eigenlijk de adaptatie-luminantie als maat moet worden gehanteerd. Nu is de  $TI$ , zoals hierboven aangegeven, in essentie gebaseerd op de oorspronkelijke metingen van Holladay, Stiles, en Crawford. Deze metingen hebben betrekking op afzonderlijke verblindingsbronnen, die meestal als puntvormig worden beschouwd. Hierboven is ook gesteld dat deze betrekkingen in beginsel additief zijn, tenminste wanneer men mag aannemen dat de verblinding uitsluitend het gevolg is van de lichtverstrooiing in het oog. Dit laatste voorbehoud wordt echter niet steeds aangenomen. Er lijken wel degelijk neuronale invloeden van belang te zijn (Bouman, 1952; Schouten, 1937; Schreuder, 1964). Over de invloed hiervan is niets bekend. Gewoonlijk wordt momenteel de strooilicht-hypothese aangehangen.

Als men de additiviteit van de verblindingsverschijnselen kan aannemen, dan is de totale sluierluminantie te bepalen door alle elementaire verblindingsbronnen over het gehele gezichtsveld te sommeren, of te integreren. De genoemde verlichtingssterkte op het oog wordt bij metingen als maat genomen voor deze integraal. Dit is alleen bij benadering juist wanneer het gaat om kleine verblindingshoeken, waarvan de cosinus dicht bij de eenheid ligt. Voor een groter gezichtsveld is deze benadering ontoereikend. Bovendien is de  $E_{oog}$  alleen te meten, en meestal niet te berekenen. Vaak wordt de gemiddelde wegdeklluminantie  $L_{av}$  als maat voor de adaptatie-luminantie genomen. Omdat daarbij de verblindingsbronnen buiten beschouwing blijven, is de waarde van  $L_{av}$  steeds te laag, en vaak veel te laag. Tenslotte wordt bij alle beschouwingen over  $TI$  de verblinding door de lichten van tegenliggende voertuigen genegeerd. Nu is het bekend dat in veel gevallen de verblinding



door autokoplantaarns, ook in de dimstand, veel sterker is dan die van de straatverlichting. Voor dit probleem is nog geen oplossing gevonden.

#### 4. Conclusies en aanbevelingen

Uit de bovenstaande analyse komt naar voren dat het begrip TI, ofwel threshold increment, een lange en niet geheel duidelijke voorgeschiedenis heeft. Het is deels gebaseerd op laboratoriummetingen waarvan de relevantie anno 2018 niet altijd duidelijk is, en deels op redelijk onderbouwde aannamen en vermoedens. De basis is dus niet erg solide. Daar staat tegenover dat het begrip al lang wordt toegepast. Er zijn beperkingen, vooral in het toepassingsgebied, maar grosso modo kan men zeggen dat de toepassing, ondanks de wankelende basis, over het algemeen tot acceptabele, en vaak tot goede, installaties voor openbare verlichting heeft geleid.

Uit bovenstaande analyse komt echter naar voren dat aanvullend onderzoek gewenst is voor een betere onderbouwing,. Men zou met enig recht kunnen zeggen dat het begrip TI goed bruikbaar is voor ontwerpdoeleinden, alsmede voor een globale waardering van de resultaten. Ook voor aanbevelingen voor het ontwerp, de uitvoering, en het bedrijven van verlichtingsinstallaties kan TI in de huidige vorm worden gebruikt. Maar ook is het duidelijk dat TI in de huidige vorm eigenlijk nog niet rijp is voor normen, en voor de daarop gebaseerde wettelijke maatregelen.

Er dient zich echter een ernstiger probleem aan. Sinds ruim een decennium hebben twee onafhankelijke ontwikkelingen een grote impact gekregen op het bedrijf van de openbare verlichting. Het gaat om de ruime toepassing van enerzijds de leds, en anderzijds van de smart phone. Beide ontwikkelingen hebben een grote impact op veel aspecten van het economisch bestel, en op het dagelijks leven meer in het algemeen; de combinatie van die twee heeft geleid tot wat men wel een revolutie in de openbare verlichting zou kunnen noemen.

Deze nieuwe ontwikkelingen zijn vooral van belang in verscheidene ontwerp-aspecten, waaronder ook TI. Toepassing van leds kan leiden tot andere bouw van armaturen, wat weer kan leiden tot een andere lichtsterkte-verdeling. Er zijn aanwijzingen dat deze veranderingen kunnen resulteren in installaties waarbij de TI-waarde van het ontwerp slecht correleert met de verblindingshinder die wordt ervaren. Ook de luminantieverdeling op de weg, alsmede de kleurweergave, wijken af van die welke bij installaties met gasontladingslampen gebruikelijk zijn. Bij smart lighting worden de leds vaak gedimd of afgeschakeld. Ook dit kan invloed hebben op de verblinding.

Uit de ontwikkelingen en uit de eigenschappen van TI die in dit rapport zijn beschreven, zijn een aantal aanbevelingen afgeleid:

- (1). Heroverweging van de normen en wetten van fotometrische karakteristieken van straatverlichting in relatie tot aanbevelingen dienaangaande;
- (2). Bepalen van geschikte, meetbare, en relevante verblindingsmaten voor straten waarbij langzaam verkeer en voetgangers belangrijk zijn;
- (3). Onderzoek naar de relevantie van de verblindingsformules afkomstig van Holladay, Stiles, en Crawford voor de momenteel gangbare condities;
- (4). Onderzoek naar de mate waarin drempelwaarden van belang zijn in het huidige wegverkeer, meer in het bijzonder in relatie tot de verdeling van de aandacht;

(5). Onderzoek naar de samenhang, en de eventuele conflicten, van de aanbevelingen voor verblinding en voor gezichtsherkenning;

(6). Inpassen van bovenstaande overwegingen en onderzoeken in een breder kader over de eisen te stellen aan de verlichting voor de openbare ruimte in meer algemene zin.

Leidschendam

Duco Schreuder Consultancies, 21 maart 2018

dr ir D.A. Schreuder

#### Literatuurverwijzingen

\* Adrian, W. & Schreuder, D.A. (1971). A modification of the method for the appraisal of glare in street lighting. In: CIE, 1972.

\* Anon. (2018). <http://www.tintenruiten.nl/wetgeving-blinderen>. Internet, 23 februari 2018.

\* Blackwell, H.R. (1946). Contrast threshold of the human eye. *Journ. Opt. Soc. Amer.* 36 (1946) 624.

\* Bouman, M.A. (1952). Visuele adaptatie. *Ned. Tijdschrift voor Geneeskunde*, 90 (1952) 1 november, p. 2732-2736.

\* CEN (1995). Lighting applications and road equipment; Road lighting, calculation of performance (Draft 4, January 1995) CEN/TC 169/226 JWG "road lighting", 1995.

\* CIE (1924). Proceedings of the Commission Internationale de l'Eclairage, Geneva, 1924.

\* CIE (1932). *Receuil des travaux et compte rendue des scéances, Huitième Session Cambridge – Septembre 1931* (Report of activities and proceedings. Eighth Session, Cambridge, September 1931). Cambridge, University Press, 1932.

\* CIE (1972). *Compte rendue, 17e Session*. Barcelona, September 1971. Publication No. 21a. Paris, CIE, 1972

\* CIE (1976). Glare and uniformity in road lighting installations. Publication No. 31, Paris, CIE, 1976.

\* CIE (1981). An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. Summary and application guidelines (two volumes). Publication No. 19/21 and 19/22. Paris, CIE, 1981.

\* CIE (1983). Proceedings of the CIE Session 1983 in Amsterdam. Publication No. 56. Paris, CIE, 1983.

\* CIE (1995). Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Technical Report. Publication No. 115-1995. Vienna, CIE, 1995.

\* CIE (2002). CIE Collection on glare. CIE, Vienna, 2002.

- \* CIE (2016). The use of terms and units in photometry - implementation of the CIE System for Mesopic Photometry. CIE Technical Note TN 004:2016. Vienna, CIE, 2016.
- \* CIE (2016a). Specifying product performance for mesopic applications. CIE Technical Note TN 005:2016. Vienna, CIE, 2016.
- \* De Boer, J.B., ed. (1967). Public lighting. Eindhoven, Centrex, 1967.
- \* 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.
- \* Hentschel, H.-J., ed. (2002). Licht und Beleuchtung; Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik; 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg, Hüthig, 2002.
- \* ISO (2005). Photometry - The CIE system of physical photometry, ISO 23539:2005(E) / CIE S 010/E:2004.
- \* Joos, G. (1947). Theoretical physics (First edition in German 1932). London, Blackie & Sons Limited, 1947.
- \* Le Grand, Y. (1956). Optique physiologique, Tome III (Physiological optics; volume III). Paris, Ed. Revue Optique, 1956.
- \* Moon, P. (1961). The scientific basis of illuminating engineering (revised edition). New York, Dover Publications, Inc., 1961.
- \* Narisada, K. & Schreuder, D.A. (2004). Light pollution handbook. Dordrecht, Springer, 2004.
- \* NEN (2017). Openbare verlichting - Kwaliteitscriteria. NPR 13201 (nl). Delft, Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut NEN, januari 2017.
- \* NSVV (1997). Aanbevelingen voor openbare verlichting; Deel III, Ontwerpen. NSVV, Arnhem, 1997.
- \* NSVV (2017). Project Titel' 2018-001. Onderzoeksvraag Ti berekening en waarde in klassen. Ontwerp december 2017.
- \* Pronk, N. et al. (2001). Windscreens and safety: a review. Report no. 183. Monash University, Clayton, Victoria, Australia, 2001.
- \* Schober, H. (1960). Das Sehen; 2 Bände. Leipzig, Fachbuchverlag, 1958-1960.
- \* Schouten, J.F. (1937). Visuele meting van adaptatie en van de wederzijdse beïnvloeding van netvlieselementen. Utrecht, Thesis Universiteit Utrecht, 1937.
- \* Schreuder, D.A. (1964). The lighting of vehicular traffic tunnels. Eindhoven, Centrex, 1964.
- \* Schreuder, D.A. (1967). Theoretical basis of road-lighting design. Chapter 3. In: De Boer, ed., 1967.
- \* Schreuder, D.A. (1976). White or yellow light for vehicle head-lamps? Arguments in the discussion on the colour of vehicle head-lamps. Publication 1976-2E. Voorburg, SWOV, 1976.
- \* Schreuder, D.A. (1981). De verlichting van tunnelingangen; Een probleemanalyse omtrent de verlichting overdag van lange tunnels. R-81-26 I en II. SWOV, Voorburg, 1981.

- \* Schreuder, D.A. (1985). The visual cut-off angle of vehicle windscreens. *Lighting Research and Technology*, 17 (1985), Issue 4.
- \* Schreuder, D.A. (1986). De bovenste afsnijhoek van autovoorruiten. *Verkeerskunde*, 37 (1986), Nummer 2, p. 70-73
- \* Schreuder, D.A. (1996). *Open-bare verlichting voor verkeer en veiligheid*. Deventer, Kluwer Techniek, 1996.
- \* Schreuder, D.A. (2008). *Outdoor lighting; Physics, vision and perception*. Dordrecht, Springer, 2008.
- \* Van Bommel, W.J.M. (2015). *Road lighting. Fundamentals, technology and application*. Dordrecht, Springer, 2015.
- \* Van Bommel, W.J.M. & De Boer, J.B. (1980). *Road lighting*. Deventer, Kluwer, 1980.
- \* Vos, J.J. (1963). *On mechanisms of glare*. Universiteit Utrecht, Dissertatie, 1963.
- \* Vos, J.J. (1983). *Verblinding bij tunnelingangen I: De invloed van strooilicht in het oog*. IZF 1983 C-8. Soesterberg, IZF/TNO, 1983.
- \* Vos, J.J. (2003). Reflections on glare. *Lighting Res. Technol.* 35 (2003) 163-176.
- \* Vos, J.J. & Padmos, P. (1983). *Straylight, contrast sensitivity and the critical object in relation to tunnel entrance lighting*. CIE, Amsterdam, 1983.
- \* Ijspeert, K.K.; De Waard, P.W.T.; Van Den Berg, T.J.T.P. & De Jong, P.T.V.M. (1990). The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers; dependence on angle, age, and pigmentation. *Vision Research*, 30 (1990) 699-707.