

Betrouwbaar Degelijk Deskundig Klantgericht

Reflectieonderzoek van asfaltwegen ten behoeve van het optimaliseren van de openbare verlichting.

De Kruijter

O P E N B A R E V E R L I C H T I N G

De Kruijter Openbare Verlichting is een toonaangevend ingenieursbureau in de branche voor openbare verlichting

De Kruijter OPENBARE VERLICHTING



Rijkswaterstaat

DUCO SCHREUDER CONSULTANCIES

De Kruijter Rapport **R 2004/02**

Reflectie onderzoek asfaltwegen ten behoeve van
het optimaliseren van de openbare verlichting.

Status document: Definitief

Datum: 26 november 2004

Opdrachtgever: Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat Generaal Rijkswaterstaat
Bouwdienst Rijkswaterstaat Utrecht
Ir. J.W.Huijben

Opdrachtnemers: De Kruijter Openbare Verlichting, Langbroek
Spectra Partners, Meettechniek, Aerdenhout

Onderzoek & advies: N.J. de Kruijter
F. van der Meij
D.A. Schreuder

Coördinatie & redactie: L. de Kruijter

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder toestemming van De Kruijter Openbare Verlichting

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
Verantwoording	4
Voorwoord.....	5
Samenvatting en conclusies.....	6
Wegoppervlakken.....	8
De theorie van wegdekreflectie	9
De theorie van het meten van wegdekreflectie.	14
De meetmethodiek van de bestaande R-tabellen	19
De karakteristieke vorm van de R-tabellen	20
Beschrijving van de meetopstelling	22
Representativiteit van wegdekmonsters.....	26
De metingen	28
De meetresultaten	31
Literatuuropgave	41

Verantwoording

Inleiding

Dit project is geïnitieerd vanuit de werkgroep die zich richt op de betekenis van wegdekreflectie in het kader van openbare verlichting. De behoefte aan actuelere informatie over de reflecterende eigenschappen van wegdekken en de consequenties hiervan voor het ontwerpen van openbare verlichting is door de werkgroep vertaald in een bruikbare onderzoeksmethode waarvan dit rapport de resultaten presenteert. Dit onderzoek is uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen vier onafhankelijke partijen waarvan de rolverdeling hieronder nader is toegelicht.

Rolverdeling

Opdrachtgever

De opdrachtgever voor dit project is het Ministerie van Rijkswaterstaat, Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat te Utrecht in de persoon van Hans Huijben. Hij is tevens voorzitter van de werkgroep. Als opdrachtgever is zijn inbreng bepalend geweest voor de doelstelling, opzet in inhoud van dit onderzoek. Van zijn hand is het voorwoord.

Wetenschappelijke ondersteuning

Als senior adviseur en wetenschappelijk deskundige op het gebied van openbare verlichting heeft de heer Duco Schreuder een belangrijke inbreng gehad in de ontwikkeling van ideeën voor nader onderzoek en de vertaling daarvan naar praktische meetmogelijkheden. De heer Schreuder heeft de theoretische aspecten rondom wegdekreflectie in de aantal hoofdstukken nader toegelicht.

Meettechniek

De vertaling van de meetwensen in een praktisch ontwerp, de realisatie van de meetopstelling alsmede de uitvoering van de metingen was in handen van Frans van der Meij van Spectra Partners. Hij beschrijft de meetopstelling.

Verlichtingstechniek

De praktische inbreng in de gedachtevorming rond het thema wegdekreflectie met betrekking tot de uitwerking en toepassing hiervan alsmede de vertaling van de resultaten van de metingen naar hun consequenties voor concrete lichtontwerpen is uitgevoerd door Nico de Kruijter van De Kruijter Openbare Verlichting. De analyses en beschrijvingen van de consequenties van de meetresultaten in dit rapport zijn van zijn hand.

Wegbeheerders

Voor het uitvoeren van de metingen hebben we dankbaar gebruik gemaakt van de loyale medewerking van wegbeheerders die bereid waren ons de metingen te laten uitvoeren op hun wegen bij geplande wegafzettingen en in een aantal gevallen ook wegafzettingen voor dit doel speciaal hebben geregeld. We noemen hier de dienstkring Alkmaar van RWS in de persoon van de verkeerscoördinator de heer Evert Hage. Verder gaat onze dank naar de gemeente Utrecht in de persoon van de heer Arthur Klink evenals naar de gemeente Zeist voor hun bereidwillige medewerking aan het beschikbaar stellen van geschikte meetplaatsen en voorzieningen.

Voorwoord

Om in het verkeer bij het invallen van de duisternis en in het donker medeweggebruikers en objecten op doorgaande wegen adequaat te kunnen zien moet een verlichtingsinstallatie voorzien in voldoende luminantie van het wegdek. Deze luminantie wordt bepaald door het uitgestraalde licht van de verlichtingsinstallatie in samenwerking met de eigenschappen van het wegdek om licht te kunnen reflecteren.

Reeds meerdere jaren wordt vanuit de verlichtingswereld de behoefte gevoeld om de reflecterende eigenschappen van wegdekken met betrekking tot licht te actualiseren en nauwkeuriger vast te stellen. Verlichtingsontwerpen kunnen dan beter worden geoptimaliseerd en misschien goedkoper en energiezuiniger worden aangelegd. De verkeersveiligheid wordt er mee gediend en normen en richtlijnen kunnen worden aangescherpt.

In 2003 is door een student van de TH Rijswijk in opdracht van de Bouwdienst een onderzoek gedaan naar de relevantie van de bestaande reflectiegegevens die op dit moment als uitgangspunt voor ontwerpberekeningen voor openbare verlichting worden gebruikt. Daaruit is gebleken dat de thans toegepaste reflectiegegevens voor wegdekken zijn gebaseerd op metingen die circa 40 jaar geleden zijn uitgevoerd.

De huidige wegdekken verschillen qua materiaal en structuur van de toenmalige wegdekken. Het tegenwoordig veelgebruikte ZOAB voor Rijkswegen bestond toen nog niet eens. Aan ZOAB zijn in de jaren '90 wel enige metingen verricht maar niet op een zodanig grote schaal dat deze gegevens als betrouwbaar kunnen worden aangemerkt. Voorts is gebleken dat alle vroegere metingen zijn uitgevoerd op materiaal afkomstig uit het linker wielspoor van de rechter rijstrook. De vraag is of dit representatief is voor de hele breedte van het wegdek.

Met dit onderzoek is een eerste stap gezet naar een nauwkeuriger bepaling van de eigenschappen met betrekking tot lichtreflectie van de huidige wegdekken. Het ontwikkelen van een goede meetmethode is daarin essentieel, zowel voor het verkrijgen van betrouwbare ontwerpresultaten als het kunnen leggen van een koppeling met metingen uit het verleden.

Een vergelijking tussen de kosten voor verlichtingsinstallaties, gebaseerd op oude en nieuwe meetgegevens, geeft inzicht in de verdere te volgen strategie. Deze strategie zou in ieder geval moeten bestaan uit het doen van metingen op grotere schaal met de ontwikkelde meetmethode en het inbedden van de meetgegevens in rekenvoorschriften voor de ontwerpers van openbare verlichting. Maar ook kan worden gedacht aan het toepassen van bepaalde vulmiddelen in wegdekken waarmee de lichtreflectie wordt verhoogd. Belangrijke motivaties daarbij zijn eventuele besparingen op kosten, bevordering van de verkeersveiligheid en beperking van "lichtvervuiling".

Voor Rijkswaterstaat is van belang dat, naast de bestaande eisen die worden gesteld aan wegdekken, ook eisen met betrekking tot lichtreflectie kunnen worden gesteld. Daarmee kunnen de eisen met betrekking tot de waargenomen luminantie van het wegdek worden gerealiseerd, iets wat op dit moment niet goed mogelijk is.

Samenvatting en conclusies

Onze eerste conclusie is dat de voor dit onderzoek gemeten reflectietabellen van DAB en SMA overeenkomen met de meetresultaten uit de jaren 60. Dit is begrijpelijk omdat deze wegdekken in opbouw niet veel verschillen van de oudere wegdekken. Een kanttekening die we hierbij kunnen plaatsen is dat we tijdens de meting een relatief lage luchtvochtigheid (45-60%) hadden en misschien wel een gelijke luchtvochtigheid als in de jaren zestig.

Het is denkbaar dat de R-tabel bij een luchtvochtigheid van 80% er anders uitziet maar dit zal nader onderzocht moeten worden. Informatie van het KNMI leert dat een luchtvochtigheid van 80% in de nachtelijke uren een gebruikelijke waarde is.

DAB

De reflectie van onze DAB meting blijkt in de praktijk beter dan de reflectie zoals deze in de bestaande R-tabel tot uiting komt. Deze uitkomsten toegepast in een specifieke lichtberekening laat zien dat mastafstanden van 40 meter naar 43 meter kunnen gaan bij het gebruik van de nieuwe reflectiewaarden. Dit betekent dat de tussenafstand met 7,5% kan worden vergroot bij een gelijkblijvende lichtopbrengst en gelijkmatigheden. Dit biedt mogelijkheden om voor dit type wegen de lichtontwerpen verder te optimaliseren met kans op kostenbesparing bij aanleg, onderhoud en energiegebruik. Aanvullend onderzoek op grotere schaal is zeker zinvol.

SMA

De uitkomsten van de meetgegevens voor SMA laten bij toepassing in een specifiek ontwerp zien dat er nauwelijks verschil is tussen de uitkomsten bij toepassing van de bestaande gegevens en de nieuwe. We vinden hier gelijkblijvende lichtopbrengsten en gelijkmatigheden. Hier zien wij geen mogelijkheden om verder te optimaliseren en dus te besparen. Onze conclusie is dat de bestaande R-tabel voor SMA (CIE C2) de juiste informatie biedt om mee te rekenen en dus te ontwerpen.

ZOAB

De reflecties van onze ZOAB metingen blijkt in de praktijk minder te zijn dan de reflecties uit de bestaande R-tabel. Door het toepassen van deze meetgegevens in specifieke ontwerpen zijn we genoodzaakt de mastafstand met een waarde van 11 tot 22 % te verkleinen om aan de gestelde ontwerpeisen van zowel lichtniveau als gelijkmatigheid te voldoen. De installatie voor openbare verlichting voor ZOAB valt derhalve evenredig duurder uit op basis van de actuele meetresultaten. De beheerskosten en energiekosten gaan evenredig mee omhoog.

Om een indicatie van de toename van energiekosten te geven het volgende: per kilometer snelweg bedragen de kosten van het energieverbruik per jaar € 659,- op basis van gebruik van de huidige ZOAB tabel ($3,86 \text{ kW} \times 4197,5 \text{ h} \times € 0,0407/\text{kWh}$). Op basis van de nieuwe meting komen we op een verbruik per jaar per kilometer van € 849,- ($4,97 \text{ kW} \times 4197,5 \text{ h} \times € 0,0407/\text{kWh}$) Totaal gaat het dus om een toename van € 190,- aan energiekosten per kilometer per jaar. In totaal heeft Nederland 2360 kilometer snelweg en als we er vanuit gaan dat ongeveer 70% verlicht is betekent dit voor RWS een toename van € 313.880,- aan energiekosten per jaar.

Een ander belangrijk aspect als gevolg van dit meetresultaat is de bestaande ongelijkmatigheid van de lichtverdeling en in het bijzonder de langsgelijkmatigheid. Als een installatie wordt ontworpen uitgaande van de bestaande R-tabel voor ZOAB (Dutch Porous) ontstaat er een ongelijkmatig en dus vlekkelig verlichtingspatroon welke duidelijk waarneembaar is.

Om een indruk te geven: de norm vraagt een langsgelijkmatigheid van 0,6 en we vinden op basis van de nieuwe R-tabel in een specifiek ontwerp een langsgelijkmatigheid van 0,46. Er is dus op basis van de huidige situatie een lichttechnisch vlekkenpatroon in de lengterichting van de weg. Het vervangen van de huidige R-tabel voor ZOAB door een actuele tabel verdient aanbeveling.

In de jaren '90 zijn door RWS metingen uitgevoerd aan een beperkt aantal monsters van een aantal bestaande ZOAB wegdekken. De gemiddelde Q0 was 0,06. Het resultaat uit de Q0 berekening op basis van de huidige metingen komt sterk overeen met die uit het verleden (ca. 0,058). In de NSVV aanbeveling Tunnelverlichting is dan ook een Q0 van 0,06 voor ZOAB aangegeven.

Voor DAB en SMA hanteert men een Q0 van 0,07 – 0,08. Het lijkt ons logisch dat de Q0 van ZOAB kleiner is omdat een ZOAB wegdek gaatjes bevat die niet reflecteren. Het verlichtingsbeeld op ZOAB is ongelijkmatiger dan de norm vereist. Dat dit in praktijk niet tot problemen leidt kan betekenen dat een heroverweging van de norm op zijn plaats is.

Bij het visualiseren van de R-tabel van 20 asfalt soorten werden fouten in de R-tabel van ZOAB gevonden. Na een nadere studie onder 8 lichtberekeningspakketten is gebleken dat er 5 berekeningspakketten op de markt zijn die gebruik maken van deze R-tabel. De overige drie pakketten kennen geen ZOAB tabel.

Om aan te tonen dat het linker spoor van de rechter rijstrook representatief is voor het gehele wegdek hebben we alle meetwaarden van alle hoeken in de lengte richting van de weg vergeleken met het gemiddelde van alle meetwaarden en hoeken in de breedte van de weg. Hier blijkt dat de beide uitkomsten niet meer dan 8% verschillen.

Als tot een vervolg studie wordt besloten, waarbij theoretische aspecten aan de orde komen, zijn onderstaande onderwerpen van het groot belang:

- wat zijn de in een wegoppervlak inherente verschillen in reflectiekenmerken tussen afzonderlijke wegdekpunten?
- bij welke spreiding tussen wegdekpunten spreekt men in de praktijk nog van een 'homogeen' of 'goed ' wegdek?
- bij welke spreiding tussen wegdekpunten neemt men genoegen met een enkel representatief wegdekpunt (of R-tabel) om voor openbare verlichting de luminantie en haar verdeling te berekenen?

Antwoorden op deze vragen kunnen leiden tot het vaststellen van een ondergrens aan de variaties in reflectiekenmerken van wegdekpunten die niet worden onderschreden bij praktische wegdekken. Deze ondergrens is dan meteen de ondergrens voor de nauwkeurigheid van alle luminantieberekeningen. Ter toelichting: als zou blijken dat wegdekpunten inherent nooit minder dan 10% uiteenlopen is het niet zinvol om de luminantie tot op een onderdeel van een procent te berekenen. Wat nu soms wel gebeurt.

Wegoppervlakken

De gangbare wegen bestaan uit een aantal lagen. Voor de verlichting is alleen de bovenste laag van belang. Er zijn veel verschillende typen wegoppervlakken in gebruik. We maken onderscheid tussen elementen en continue oppervlakken. Elementen zijn bij voorbeeld klinkers, betonstenen, kinderhoofdjes. Elementen worden in Nederland op grote schaal toegepast maar dan wel in hoofdzaak op wegen die uitsluitend een verblijfsfunctie hebben. Voor deze wegen worden de lichttechnische karakteristieken in verlichtingssterkten uitgedrukt en niet in luminanties. De lichtreflectie is bij deze wegen van ondergeschikt belang. Daarom worden ze hier niet besproken.

Anders is het voor continue wegoppervlakken. Continue wegoppervlakken bestaan in beginsel uit een aggregaat (steenslag) en een bindmiddel. Op de Nederlandse Rijkswegen wordt in hoofdzaak asfaltbitumen als bindmiddel gebruikt. Ook wordt cement gebruikt zij het in veel mindere mate. Andere bindmiddelen zoals teer en kunstsof komen niet veel voor en worden hier niet besproken. In tegenstelling tot cementbeton waar de lichtreflectie in hoofdzaak door het bindmiddel cement wordt bepaald wordt de lichtreflectie van asfaltwegen voor het grootste deel bepaald door de optische kenmerken van de steenslag. Lichtgekleurde stenen leiden tot een lichtgekleurd wegdek. Stenen die door het verkeer gemakkelijk worden gepolijst leiden tot een glimmend wegdek. Dit is de reden dat, om de lichtreflectie van het wegdek zo hoog mogelijk te maken soms witmakers worden toegevoegd. Dat zijn in essentie - natuurlijke of kunstmatige - witte steentjes. Deze techniek wordt op grote schaal in Scandinavië en op vrij grote schaal in België toegepast.

Gewoonlijk worden, naast de steenslag, nog andere materialen aan wegen toegevoegd. Dit zijn o.a. fijn steenslag, zand en vulstof. Soms worden nog bepaalde chemicaliën - vloeimiddelen, doping, kleurstoffen enz. - toegevoegd. Die zijn hier niet van belang. In de traditionele wegenbouw worden al deze componenten op of nabij het werk gemengd en verhit en als een soort pasta op de ondergrond van de weg aangebracht. De uiteindelijke laagdikte van de oppervlaktelaag is meestal ongeveer 4 cm. Dergelijke oppervlakken worden 'dicht asfaltbeton' (DAB) genoemd. In Nederland worden twee versies van open asfalt gebruikt die vooral verschillen in het percentageholle ruimte. De namen suggereren een groter verschil maar dat is niet zo wezenlijk. De twee versies zijn 'Split mastiekasfalt' (SMA) en 'Zeer Open Asfaltbeton' (ZOAB).

<u>Samenstelling in %</u>	<u>DAB</u>	<u>SMA</u>	<u>ZOAB</u>
steen (2 - 20 mm)	56	76	83
zand (0,063 - 2 mm)	36	12	12
vulstof (< 0,063 mm)	8	11	5
bitumen	6	7	5
holle ruimte	2-5	3-7	19-25
laagdikte (cm)	5	5	4

Nog een paar opmerkingen over de steenslag. In het bovenstaande is de steenfractie niet onderverdeeld. Alles tussen 2 en 20 mm is daarbij inbegrepen. In de praktijk wordt er vaak een nadere onderverdeling gemaakt. Het vermoeden bestaat dat de laatste jaren de grovere fracties minder worden gebruikt. In andere landen worden soms echter veel grovere fracties toegepast. In Nederland wordt in vrijwel alle wegen - net zoals in vrijwel alle betonwerken - de zogenaamde 'Nederlandse steenslag' gebruikt. Dit is riviergrind uit het stroomgebied van de Maas. Het is een mengsel van allerlei steensoorten maar kwarts vormt een groot deel ervan. Daarom is Nederlandse steenslag vrij licht van kleur. Het is overigens nog maar de vraag of Nederlandse steenslag ook voor ZOAB het beste steenslag is. Ook kan het eventuele gebruik van witmakers worden overwogen.

De theorie van wegdekreflectie

1 Inleiding

Openbare verlichting dient voor het verlichten van het wegdek om verkeersfuncties bij duisternis mogelijk te maken. Voor wegen met een bestemmingsfunctie (woongebieden) wordt meestal de verlichtingssterkte als kwaliteitscriterium gebruikt. Voor verkeerswegen wordt de kwaliteit van de openbare verlichting uitgedrukt in luminantiewaarden. Luminantie is de fotometrische maat voor wat men ook wel de 'helderheid' noemt. Visuele waarneming wordt vooral bepaald door de adaptatie van het oog. In de praktijk wordt bij de openbare verlichting de gemiddelde wegdekluminantie gebruikt als een maat voor de adaptatie. De gemiddelde wegdekluminantie is in principe vrij gemakkelijk te berekenen. Meten hiervan in de praktijk is echter nauwelijks mogelijk. Het wegdek vormt de achtergrond voor de waarneming van de objecten die voor het verkeer van belang zijn. Het bevorderen van de waarneembaarheid van obstakels is een belangrijke functie van de openbare verlichting. De luminantie wordt bepaald door de intensiteit van het opvallend licht en door de reflecterende eigenschappen van het wegoppervlak. De reflectie-eigenschappen van wegdekken spelen een belangrijke rol bij het ontwerpen en het optimaliseren van installaties voor openbare verlichting.

2 De luminantietechniek en de reflectie van wegdekken

2.1. Het belang van de reflectie

Om de vereiste luminantie voor een verkeerstoepassing nauwkeurig te kunnen berekenen moet men zowel over betrouwbare lichttechnische specificaties van de armaturen kunnen beschikken als over betrouwbare informatie over de reflecterende eigenschappen van het toegepaste wegdek.

2.2. Soorten reflectie

De luminantie van een verlicht voorwerp dat zelf geen licht produceert is evenredig met de verlichtingssterkte van het opvallende licht en de reflectiefactor. Deze reflectiefactor wordt bepaald door de oppervlaktestgesteldheid van het voorwerp en van de wijze van verlichten. Het voorwerp kan drie soorten reflectie vertonen en mengvormen ervan:

- diffuse reflectie. Het licht wordt ongeacht de wijze van instraling naar alle richtingen even sterk weerkaatst. Dit is het geval bij alle oppervlakken die een korrelstructuur hebben en waarvan de korrels willekeurig zijn georiënteerd. Voorbeelden hiervan zijn talkpoeder, sneeuw, enz.
- spiegelende (of reguliere) reflectie. Het licht volgt de zgn. spiegelwetten van Snellius: de hoek tussen de invallende lichtstralen en de verticaal (normaal) op het oppervlak is gelijk aan de hoek tussen de weerkaatste lichtstralen en deze normaal. Voorbeelden: metalen oppervlakken zoals spiegels, niet kristallijne stoffen zoals glas en water, enz.;
- retroreflectie. Bij retroreflectie wordt het licht teruggekaatst in de richting waar het vandaan kwam. Daartoe zijn die materialen of die voorwerpen voorzien van optische systemen (retroreflectoren) die de omkeer van de stralengang door reflectie veroorzaken.

3 De wegdek luminantie

3.1 Beschrijving van de reflectie van wegdekken

Alleen in geval van diffuse reflectie is er sprake van een enkele reflectiefactor die een scalaire grootte is. In alle andere gevallen hangt de intensiteit van het weerkaatste licht en dus de 'reflectiefactor' af van zowel de richting van het invallende licht als van de richting van het weerkaatste licht. In beide gevallen zijn twee onafhankelijke variabelen nodig om de richting vast te leggen. In totaal dus vier. Uiteraard is de intensiteit van het teruggekaatste licht recht evenredig met de intensiteit van het invallende licht. Wanneer de reflector isotroop is (een rotatiesymmetrie vertoont) zijn drie variabelen genoeg en kan de reflectie als een ruimtelijke figuur worden weergegeven, de zgn. reflectie-indicatrix. Voor de meeste asfaltwegdekken die worden gebruikt voor verkeerswegen is dit het geval. Klinkers maar ook cement beton voldoen niet aan deze voorwaarden. Deze wegdekken kunnen dus bij de huidige systematiek niet worden behandeld.

Wanneer de waarnemingsrichting wordt vastgelegd (meestal wordt daarvoor een hoek van 1 graad gekozen met het horizontale vlak) blijven twee variabelen over en kunnen de karakteristieken van de reflectie worden weergegeven in een tabel. De vorm en de omvang van deze tabellen zijn door de CIE gestandaardiseerd en worden R-tabellen genoemd. Deze R-tabellen vormen de basis voor de bepaling van de luminantie en de luminantieverdeling. Hierop wordt het ontwerp van openbare verlichtingsinstallaties gebaseerd. We wijzen hier op een belangrijke beperking van de momenteel in zwang zijnde systemen van beschrijving van reflectie-eigenschappen alsmede van de daarop gebaseerde systemen voor het berekenen van de luminanties van wegdekken. De informatie geldt uitsluitend voor droge wegdekken. Natte en vochtige wegdekken kunnen niet worden beschreven of behandeld. Dit geeft uiteraard een ernstige beperking van het totale luminantiesysteem te meer omdat de frequentie en de ernst van verkeersongevallen bij regen aanzienlijk groter is dan bij droog weer. Het CIE-W systeem voor natte wegen biedt geen soelaas.

Omdat momenteel de reflectie-eigenschappen van de te gebruiken wegdekken meestal niet bekend zijn worden installaties voor openbare verlichting ontworpen met gebruikmaking van geschatte waarden voor de reflectie. Onnauwkeurigheid in de gegevens leidt tot een onzekerheid in het resultaat. Preciezer kennis van de reflectie-eigenschappen van wegen maakt het mogelijk optimalere verlichtingsontwerpen te maken. Zowel uit het oogpunt van verlichtingskwaliteit als van kosten. Voor het ontwerpen gebruikt men gewoonlijk nationale of internationale aanbevelingen en normen. Voor Nederland zijn dat de door de Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde (NSVV) uitgegeven "Aanbevelingen voor Openbare Verlichting".

3.2 Classificatie van de reflectiekenmerken van wegdekken

Een gedetailleerde studie van enige honderden wegdekmonsters genomen uit enkele wegdekken heeft tot het inzicht geleid dat wegdekken wat betreft hun reflectie-eigenschappen in een aantal klassen kunnen worden ingedeeld. Op basis van het werk van Westermann is een klasse indeling (de zgn. Qo-kappa-classificatie) in vier klassen voorgesteld. Daarnaast is het C1-C2 systeem voor classificatie geïntroduceerd waarbij slechts twee klassen, C1 en C2 plus een schaalfactor worden onderscheiden.

Naast de overeenkomsten is er een fundamenteel verschil tussen het Qo-kappa-systeem en het C1-C2 systeem. Beide zijn systemen voor het classificeren van wegdekken naar hun reflectie-eigenschappen. Bij het eerste systeem wordt de reflectie zelf als basis gebruikt voor de classificatie. De classificatie vindt in feite plaats aan de hand van de vorm van de reflectie-indicatrix van de wegdekken. Bij het tweede systeem wordt de classificatie gebaseerd op de luminantie en de luminantieverdeling van de verlichtingsinstallaties die men onder gebruikmaking van de betreffende wegdekken kan maken.

In het Qo-kappa-systeem worden twee wegdekken tot dezelfde klasse gerekend wanneer ze dezelfde (of bijna dezelfde) reflectie-indicatrix hebben. In het C1-C2 systeem worden twee wegdekken tot dezelfde klasse gerekend wanneer ze (bijna) gelijke luminanties opleveren bij dezelfde verlichtingsinstallatie.

In sommige speciale gevallen zijn verdere vereenvoudigingen aan te brengen. Zo is overdag de lichtinval bij benadering alzijdig. Bovendien vertonen droge wegdekken een reflectie die niet al te veel van de diffuse reflectie afwijkt zodat de reflectie overdag van droge wegmarkeringen meestal op voldoende nauwkeurige wijze met een enkel getal (een scalar dus) kan worden beschreven. Wanneer de oppervlakken nat zijn is deze benadering niet meer geoorloofd. Ook bij wegverlichting moet met de verschillende hoeken rekening worden gehouden. Het sterkste is dit het geval bij de waarneming van retro-reflecterende materialen wanneer ze worden verlicht door de koplamp(en) van het voertuig van de waarnemer. De reflectie kan in dat geval gemakkelijk het honderdvoudige bedragen van de diffuse reflectie van hetzelfde materiaal.

Van belang is het feit dat in vrijwel alle gevallen de reflectie van wegdekken zodanig is dat het meeste licht in dezelfde richting als de instraling wordt gereflecteerd. Wegdekken zijn vrijwel steeds in meer of mindere mate spiegelend van karakter. Het spiegelende karakter van wegdekken leidt ertoe dat licht dat tegen de waarnemingsrichting in het wegdek treft sterker wordt gereflecteerd dan licht dat met de waarnemingsrichting mee het wegdek treft. Men noemt de luminantie als gevolg van het invallende licht de 'luminance yield'. Voor gebruikelijke wegdekken is de 'luminance yield' voor tegenstralend licht gewoonlijk groter dan voor meestralend licht.

3.3 Identificatie en classificatie

Voor de berekening van de luminantie is een complete R-tabel nodig. Het C1-C2 systeem kent er derhalve twee, een standaardtabel voor iedere klasse. Het Qo-kappa-systeem heeft, zoals gezegd, vier standaardwegdekken (R1 t/m R4), waarbij een aparte schaalwaarde niet wordt gebruikt.

In de praktijk betekent dit dat er slechts een klein aantal complete R-tabellen nodig is mits van de te onderzoeken wegdekken de drie reflectiewaarden kunnen worden bepaald. Via classificatie is, gebruik makend van een van de twee standaardwegdekken, een vrij globale berekening te maken van de luminantie. Wat betreft de luminantie en de ongelijkmatigheid is de afwijking tussen de waarden die via de benadering van de classificatie berekend zijn en de waarden die met gebruikmaking van de 'echte' R-tabel zijn berekend kleiner dan ca. 15% (SCW, 1974, 1984).

3.4 Luminantieberekeningen

Alle luminantieberekeningen die in de praktijk van de openbare verlichting worden uitgevoerd maken gebruik van het systeem dat door de 'Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)' in omloop is gebracht en waarmee de luminantie theorie kan worden gebruikt bij het maken van een ontwerp voor een installatie voor wegverlichting (CIE, 1990). Dit systeem is in belangrijke mate gebaseerd op werk dat in Nederland is uitgevoerd. Hier gaat het om het beginsel en om de plaats die de reflectie-eigenschappen van het wegdek er in spelen. Voor het systeem wordt het volgende schema gebruikt. De waarnemingspositie wordt gekozen (volgens bepaalde regels);

- voor ieder punt van de weg wordt per lichtpunt de horizontale verlichtingssterkte berekend.
- Hiervoor moet de geometrie van de installatie, de geometrie van waarnemer en wegdekpunt, en de lichtsterkteverdeling (de zgn. I-tabel) van het betreffende armatuur bekend zijn;
- voor dat punt en voor dat armatuur wordt de luminantie bepaald. Daarvoor moeten de kenmerken van de reflectie van het wegdek (de zgn. R-tabel) bekend zijn. Deze berekening is vrij gecompliceerd omdat voor de meeste punten van het wegdek in de R-tabel moet worden geïnterpoleerd;

- de luminantiebijdragen van de afzonderlijke armaturen worden gesommeerd. Er zijn bepaalde regels over de aantallen armaturen die worden meegenomen;
- de gehele procedure wordt herhaald voor andere punten op het wegdek. Er zijn bepaalde regels over het aantal en de positie van de punten die worden meegenomen.
- De gegevens over de reflectie-eigenschappen van de te gebruiken wegdekken (bijvoorbeeld in de vorm van een R tabel) zijn essentieel voor de luminantie berekeningen.

Voor de berekeningen van de luminanties is het nodig om de waarnemingscondities precies vast te leggen. Het door de CIE vastgestelde systeem geeft de volgende condities:

- de gemiddelde luminantie wordt bepaald vanaf een enkel punt op de weg;
- dit punt ligt hetzij op een kwart van de wegbreedte (aan de kant van de weg waar het verkeer rijdt, dus in Nederland op een kwart van de rechterzijkant van de weg) of op het midden van elke rijstrook;
- de waarnemer bevindt zich op een hoogte van 1,50 meter boven het wegoppervlak;
- het gebied waarover de luminantie wordt bepaald, strekt zich van 60 meter tot 160 meter voor de waarnemer uit;
- het gebied strekt zich in de breedte over de gehele weg uit of over de gehele rijstrook (naar gelang de gekozen meetpositie).

Bovendien zijn er nog een aantal aanvullende voorwaarden, waaraan moet worden voldaan:

- de weg moet recht zijn (geen bochten);
- de weg moet horizontaal zijn (geen hellingen);
- de weg moet vlak zijn (geen verkanting of ton-rondheid);
- het wegoppervlak moet isotroop zijn (geen regelmatige structuur in lengte - of dwarsrichting);
- het wegoppervlak moet in lengte - en dwarsrichting homogeen zijn (geen reparatieplekken, geen spoor - of ribbelforming enz.);
- het wegoppervlak moet droog zijn.

3.5 Berekeningen ter toetsing

De opdracht betreffende het onderzoek naar de reflectie-eigenschappen van wegdekken is als volgt geformuleerd:

- nagaan of de reflectie eigenschappen van wegdekken sinds ca 1970 wezenlijk zijn veranderd,
- zo ja, een nadere inschatting maken over de mogelijke consequenties met betrekking tot de kwaliteit en de beheerskosten van de verlichting voor rijkswegen. Deze opdrachtformulering komt voort uit de interim rapportage die eerder is uitgevoerd (Tetteroo, 2004).

In het kader van deze opdracht is het niet genoeg om de reflectie-eigenschappen van 'oude' en 'nieuwe' wegoppervlakken te vergelijken. Het is tevens noodzakelijk om de consequenties te onderzoeken voor de wegverlichting die op deze wegoppervlakken moet worden geïnstalleerd. Daarvoor is de volgende methode uitgewerkt.

Ten eerste: Er worden drie standaard geometrieën voor de wegen in beschouwing genomen:

- 1x2 rijstroken 80 km/h autoweg
- 2x2 rijstroken 100 km/h autosnelweg
- 2x3 rijstroken 120 km/h autosnelweg

Deze drie omvatten vrijwel alle Rijkswegen, zowel de autosnelwegen als de niet-autosnelwegen. Voor ieder wegtype wordt een standaard geometrie genomen wat betreft wegbreedte, middenberm enz. In Nederland hebben alle Rijkswegen rijstroken van 3,5m breedte (plus 10 cm streep, totaal dus 3,6 m). De middenberm op dubbelbaanswegen bedraagt meestal ca 6 meter. Er zijn geen strikte richtlijnen, maar zo gebeurt het meestal; zie ook ROA/RONA.

Ten tweede: Er wordt een standaard kwaliteit voor de verlichting gekozen, in overeenstemming met de NPR 13201-1. Volgens de richtlijnen moet de overall gelijkmatigheid $U_o > 0,4$ zijn, en de langs gelijkmatigheid $U_l > 0,6$. De gemiddelde wegdek luminantie L_{gem} wordt als variabele gehanteerd. De verblinding, de bermverlichting, en de vluchtstroken blijven buiten beschouwing.

Ten derde: Er wordt voor ieder wegtype een enkele lichtgeometrie gebruikt.

- enkelzijdig rechts voor 1x2, middenberm met uitleggers voor 2x2 en 2x3 rijstroken
- de overhang is steeds nul (midden armatuur boven rand van de rijbaan)

Ten vierde: Voor de berekening wordt een enkel armatuur gebruikt. Gekozen is voor Philips Iridium GB SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP150W. Deze armaturen hebben verschillende spiegels. Er zijn 7 spiegelinstellingen, zodat er feitelijk 7 verschillende lichtverdelingen kunnen worden gemaakt.

Ten vijfde: Een enkele lamp wordt gekozen, en wel SON (150W of 250W). Daarbij wordt aangenomen dat deze lamp zonder verdere verliezen traploos is in te stellen (dimmen) wat betreft de lichtstroom.

Ten zesde: Voor elk wegtype wordt een enkele paalhoogte genomen: 10 m voor 1x2 en 18 m voor 2x3 en 2x2 rijstroken.

De werkwijze kent de volgende stappen:

- De spiegelstand voor de lichtverdeling wordt bepaald om aan de eisen van de dwarsgelijkmatigheid te voldoen.
- De paalafstand wordt bepaald om aan de eisen van de langsgelijkmatigheid te voldoen.
- De gemiddelde wegdekluminantie L_{gem} wordt bepaald om aan het gewenste verlichtingsniveau te kunnen voldoen.

De verhouding tussen de gemiddelde wegdekluminantie L_{gem} voor 'oude' en 'nieuwe' wegen geeft antwoord op het eerste deel van de opdracht.

De theorie van het meten van wegdekreflectie.

1 Het meten van de reflectie-eigenschappen van wegdekken

1.1 Metingen in het laboratorium

Een factor van beslissende betekenis bij het meten van reflectie-eigenschappen van wegdekken is de afmeting van het meetgebied. Wegdekken, en meer in het bijzonder asfalt wegen, hebben een vrij grove structuur. Meestal zijn de korrels van het gebruikte aggregaat ongeveer een centimeter groot, soms ook worden nog grotere stenen gebruikt. Om tot een representatieve waarde van de reflectie te komen moet het meetgebied groot zijn ten opzichte van de afmetingen van de korrels.

Het onderzoek dat door de SWC is uitgevoerd heeft tot het inzicht geleid dat voor de meer gangbare wegdekken het meetgebied ongeveer 1100 cm² moet bedragen. Vaak neemt men aan dat het oppervlak iets kleiner mag zijn. Het minimum bedraagt 400 cm² (SCW, 1974, p.67). Vervolgens moet men er aan denken dat de reflectiefactoren zijn gedefinieerd onder aanname dat de bundels van het licht dat instraalt en van het licht dat wordt gemeten evenwijdige bundels zijn. Deze voorwaarden leggen strikte beperkingen op aan de mogelijkheden van meting.

In het verleden zijn van alle wegdekken waarvan de reflectie bekend is de complete R-tabellen in laboratoriumopstellingen gemeten. De resultaten van deze metingen zijn in verschillende atlassen opgenomen. De meest complete en de meest betrouwbare is die van Erbay (Erbay, 1973, 1974; Erbay & Stolzenberg, 1975).

De eerste opstelling, waarmee op grote schaal R-tabellen zijn gemeten is die uit het toenmalige Lichttechnisch Laboratorium van Philips in Eindhoven. Een gedetailleerde beschrijving hiervan is te vinden in Schreuder (1967, sec. 3.3; 1967a, sec 8.5; 1996, sec 5.4.8). Om de problemen wat betreft de afmetingen van het meetgebied te vermijden zijn grote monsters van het wegdek genomen. Deze waren vaak bijna een meter lang en een decimeter breed. Het is echter nog maar de vraag of het eigenlijke meetgebied wel de gewenste 1100 cm² omvatte. Omdat de metingen zeer lang geleden zijn uitgevoerd en de meetopstelling al lang is ontmanteld is hierover geen zekerheid te krijgen.

Wel bleek dat de meeste wegbeheerders terughoudend zijn om toestemming te geven dergelijke grote monsters uit hun weg te halen. Voorts bleek dat deze grote monsters kwetsbaar zijn vooral wat gedurende het vervoer. Dit is onder meer een belangrijke reden geweest om voor een kleine meetopstelling te kiezen waarmee direct op de weg kan worden gemeten. Om bij gebruik van een groot wegdekmonster aan het uitgangspunt, de voorwaarde van de evenwijdigheid van het licht, te voldoen moet zowel de afstand van de lichtbron tot het monster als de afstand van het monster tot de meetcel aanzienlijk zijn. Dit resulteert in een omvangrijke meetopstelling.

De Philips opstelling was dan ook zeer groot. De hoogte en breedte waren enige meters en de grootste meetafstand bedroeg bijna 50 meter. De methode is beschreven in SCW (1974). Het beginsel is eenvoudig. Men laat in een goniofotometer een lichtbron rondom een wegdekmonster bewegen. De luminantie wordt geregistreerd en zo vaak afgelezen als gewenst is. Meestal is de afstand van de lichtbron tot het wegdekmonster tenminste enige meters. Soms is de goniofotometer vervangen door een rechte rail. Later zijn meetopstellingen met vergelijkbare afmetingen gebouwd onder meer in Canada (Universiteit van Toronto), België (Firma Schreder te Luik), Denemarken (Universiteit van Kopenhagen), Duitsland (Universiteiten van Berlijn en Karlsruhe) en Nederland (Philips en de KEMA).

De metingen van de wegdekken die in de Atlas van Erbay zijn opgenomen, stammen van Philips, Schreder en de Universiteit van Kopenhagen. Omdat de metingen zeer duur waren, terwijl

over de nauwkeurigheid en de representativiteit ervan twijfels bleven bestaan, zijn de opstellingen, de een na de ander, ontmanteld. De enige laboratoriumopstelling die nu nog bestaat, staat bij R-Tech (Schreder) in Ans (Belgie). Deze opstelling wijkt echter in details af van de eerder genoemde opstellingen.

1.2 Metingen op de weg

1.2.1 Algemene opmerkingen

Aangezien de hierboven beschreven methode omslachtig en kostbaar is zoekt men reeds lang naar een geschikte methode om de metingen direct op de weg te doen. De pogingen die in het verleden zijn ondernomen om metingen op de weg uit te voeren zijn echter steeds mislukt. De reden was dat in het verleden de miniaturisatie van de elektronica nog niet ver genoeg was gevorderd en gemakkelijk verplaatsbare computers nog niet bestonden. Gelet op de huidige stand van de techniek is het nu mogelijk om de metingen in situ uit te voeren. Momenteel zijn er echter nog geen kant en klare apparaten hiervoor in de handel. Bij het in dit rapport beschreven onderzoek is gebruik gemaakt van een speciaal voor deze metingen gebouwde meetopstelling. Deze meetopstelling is het voorlopige eindresultaat van een aantal proefnemingen die over een periode van minstens 15 jaar zijn uitgevoerd. Bij de realisering van deze meetopstelling hebben een aantal nader te noemen overwegingen een rol gespeeld.

1.2.2. Het meetgebied.

Hierboven is vastgesteld dat het meetgebied, om geen last te hebben van de korrelige structuur van de meest gangbare weggoppervlakken, ten minste ca 400 cm² groot moet zijn. Dit is dus de kleinste afmeting van een weggedeelte dat voor de berekeningen nog als een 'punt' op de weg kan worden beschouwd. We zullen deze term voor onze beschouwingen gebruiken: een 'punt' op de weg is hier dus geen mathematisch punt, maar een weggedeelte van ten minste 400 cm².

Er zijn een aantal redenen om bij voorkeur op straat te meten die met deze minimale maat van het meetgebied te maken hebben. De moeilijkheid om de monsters uit de weg te halen en de uiteindelijke onbetrouwbaarheid van deze monsters. Het grootste bezwaar betreft de kosten. Men moet daarbij bedenken dat het monster tenminste 400 cm² groot moet zijn. Met de gangbare methoden kunnen geen grotere kernen met een diameter groter dan 10 cm, in sommige gevallen van 15 cm, worden geboord. Omdat de rand van een kern steeds beschadigd wordt, hebben dergelijke kernen een bruikbaar oppervlak van ongeveer 50, resp. 115 cm².

Op grond hiervan is door de SCW gesteld dat voor de wegdekken die in Nederland gangbaar zijn, bij gebruik van 15 cm kernen, vijf kernen moeten worden gebruikt, die ieder tweemaal moeten worden gemeten (SCW, 1974, p. 67; Schreuder, 1996, p. 103). Bij 10 cm kernen zijn er nog veel meer nodig, ten minste 10 a 12. In de zeventiger jaren van de vorige eeuw rekende men globaal met 1000 a 1500 gulden per kern. De kosten werden als onoverkomelijk hoog beschouwd. Dit heeft ertoe geleid, dat het werk van de SCW Werkgroep E2 'Wegverlichting en oppervlakttextuur' voortijdig is gestopt. Dit is zo ver gegaan, dat tiental proefvakken, die speciaal voor deze werkgroep zijn aangelegd, nooit zijn gemeten.

Dit alles is nodig om een 'punt' te kunnen bemeten. Wanneer men meer inzicht wil in fluctuaties binnen een en hetzelfde wegdek zijn nog veel meer kernen nodig. Wanneer men op de weg gaat meten vervallen al deze problemen. Wel moet de meetopstelling aan de omstandigheden van het buiten meten worden aangepast. De belangrijkste factor is dat de opstelling mobiel moet zijn. Dit is vooral een kwestie van afmetingen.

1.2.3 De fotometrische grensafstand

Hierboven is aangegeven dat het licht dat bij de metingen het te meten weggedeelte treft alsmede het weerkaatste licht dat gemeten moet worden evenwijdig moet zijn. Als we vasthouden aan een meetgebied van ten minste 400 cm² moeten de meetopstellingen die op deze wijze geconcipeerd zijn aanzienlijke afmetingen hebben. Men zou van metingen 'op ware grootte' kunnen spreken als de meetopstelling ongeveer dezelfde afmetingen heeft als de toegepaste elementen bij de normale wegverlichting. Uiteraard is het niet realistisch om een dergelijk grote opstelling verplaatsbaar te maken om die op straat te gebruiken. De keuze van de maat van het meetgebied is dus bepalend voor de afmeting van de meetopstelling.

Het is niet precies te zeggen hoe de afmetingen van de meetopstelling afhangen van de grootte van het te gebruiken meetgebied. Als benadering maken we gebruik van wat wel de 'fotometrische grensafstand' wordt genoemd. Volgens ISO wordt de eenheid van lichtsterkte de candela genoemd, afgekort cd. De definitie geldt alleen voor puntvormige lichtbronnen omdat de ruimtehoek alleen kan worden gedefinieerd vanuit het middelpunt van een bol. Uit een puntvormige lichtbron kan nooit licht komen. Daarvoor zou de helderheid ervan oneindig groot moeten zijn, wat fysisch onmogelijk is. Reële lichtbronnen hebben uiteraard afmetingen.

Het is de vraag hoe groot een lichtbron mag zijn om nog als puntvormig beschouwd te mogen worden. Voor het beantwoorden van deze vraag gaan we uit van de bekende kwadratenwet uit de fotometrie. Deze luidt dat, voor een puntvormige lichtbron, de verlichtingssterkte afneemt met het kwadraat van de afstand. Het is nu de vraag hoe groot de lichtbron mag zijn voordat afwijkingen van de kwadratenwet kunnen worden geconstateerd.

Men gaat daarbij als volgt te werk. De niet-puntvormige lichtbron wordt in gedachten in vele kleine lichtbronnen opgedeeld op een zodanige wijze dat voor elk onderdeel de kwadratenwet wel geldt. In onderstaande tabel is de verhouding tussen de werkelijke lichtsterkte I en de benaderde (gemeten of berekende) lichtsterkte I' voor verschillende geometrieën gegeven.

R/r	1/2	1/4	1/6	1/8	1/10
I/I'	1,250	1,062	1,028	1,016	1,010

De verhouding tussen de werkelijke lichtsterkte I en de benaderde lichtsterkte I' voor verschillende waarden van R/r waarin R de straal is van de cirkelvormig gedachte lichtbron. en r de afstand tussen lichtbron en meetpunt (ontleend aan Helbig, 1972, p. 48). Uit deze tabel blijkt dat de afwijkingen al heel gauw acceptabel zijn. Bij R/r = 1/10 (een meetafstand van vijf maal de afmetingen van de lichtbron) is de afwijking reeds tot 1% afgenomen. Men noemt deze afstand wel de 'fotometrische grensafstand'.

1.2.4. De afmetingen

De combinatie van wat hierboven over de afmetingen van het meetgebied en over de fotometrische grensafstand is gezegd leidt direct tot de minimale afmetingen van een meetopstelling waarmee de reflectie-eigenschappen van wegdekken kunnen worden gemeten.

Wanneer we verlangen dat, op grond van de beperkingen die door de wetmatigheden van de fotometrische grensafstand, de onzekerheid van de metingen met niet meer dan 1% mag toenemen moet de meetafstand tenminste het vijfvoudige zijn van de afmeting van het meetgebied. Daarbij gaan we er van uit dat de wetmatigheden van de fotometrische grensafstand ook op dit soort metingen mag worden toegepast.

Enige resultaten zijn gegeven in onderstaande tabel.

Afstand (cm)	Straal (cm)	Oppervlak (cm ²)	Aantal nodig (400 cm ²) (1100 cm ²)	
10	1	3,1	127,3	350
15	1,5	7,1	56,6	156
20	2	12,6	31,8	88
25	2,5	19,6	20,4	56
30	3	28	14,1	39
35	3,5	38	10,4	29
40	4	50	8,0	22
50	5	79	5,1	14
60	6	113	3,5	10
70	7	154	2,6	7
80	8	201	2,0	5
90	9	254	1,6	4
100	10	314	1,3	4

Het aantal benodigde metingen bij verschillende meetafstanden voor een gewenst meetgebied van 400 cm² resp. 1100 cm².

Als we een opstelling willen construeren die gemakkelijk in een stationcar kan worden vervoerd moet de opstelling niet veel breder zijn dan 60 cm. Dat zou kunnen betekenen dat de meetafstand ten hoogste 40 cm netto bedraagt. Uit bovenstaande tabel blijkt dat er in dat geval ten minste 8 en bij voorkeur 22 metingen moeten worden gedaan om een de reflectie van een 'punt' op het wegdek nauwkeurig te kunnen vaststellen.

1.2.5. De meetrichting

Het is gebruikelijk dat de meting van de reflectie-eigenschappen van wegoppervlakken wordt uitgevoerd met gebruikmaking van dezelfde geometrie als die welke relevant is voor de wegverlichting. Deze geometrie houdt in dat de meetrichting vaststaat. Zoals reeds eerder is beschreven is de meetrichting evenwijdig aan de as van de weg en vormt een hoek van 1 graad met de horizontaal naar beneden toe. De richting van het invallende licht is variabel. In beginsel zou het licht uit iedere richting kunnen komen maar in de praktijk beperkt men zich tot het gebied dat rechtstreeks relevant is voor de wegverlichting. Dit is hetzelfde gebied dat door de eerder genoemde R-tabellen wordt bestreken. Dit gebied is groot genoeg voor de luminantieberekeningen voor alle in de praktijk voorkomende verlichtingsinstallaties.

Deze geometrie is in alle eerder beschreven meetmethoden gebruikt. Daarbij is steeds een enkele lichtbron gebruikt waarvan de positie ten opzichte van het wegdekmonster wordt gewijzigd om daarmee de verschillende punten in de R-tabel te representeren. De invloed van het licht uit verschillende richtingen wordt automatisch gescheiden terwijl het eenvoudig is om de meetresultaten - de gemeten luminantiewaarden - serieel vast te leggen. Deze aanpak vereist echter veel tijd. Het heeft de voorkeur vooral buiten op straat alle metingen gelijktijdig uit te voeren. Zou men de gebruikelijk geometrie toepassen dan is het moeilijk om de bijdrage van de afzonderlijke lichtbronnen aan de reflectie te scheiden.

Er zijn een aantal methoden denkbaar om dit probleem op te lossen. Zo zou men flitslampen met een zeer korte flitsduur kunnen gebruiken. In plaats van lichtinval uit vele verschillende richtingen gecombineerd met een vaste meetrichting is echter een andere weg ingeslagen. De lichtweg is omgekeerd. In plaats van lichtinval uit vele verschillende richtingen gecombineerd met een vaste meetrichting is gekozen voor een lichtinval uit een enkele vaste richting gecombineerd met een aantal verschillende meetrichtingen. Dit principe is beschreven in Schreuder (1991, 1992, 1996).

Bij de in dit rapport beschreven meetopstelling is een directe aanpak gevolgd. Er is een standaard gekozen waarvan op een onafhankelijke wijze de R-tabel is gemeten, zowel op de traditionele wijze alsook op de wijze met de omgekeerde lichtrichting. Hiermee wordt de omkering van de lichtrichting numeriek in rekening gebracht. Een belangrijk voordeel is dat deze werkwijze meteen de ijking en de kalibratie van de meetopstelling oplevert. Indien de standaard een perfecte diffusor was dan was de bepaling van de R-tabel ervan niet nodig geweest.

1.3. Ijking en kalibratie van de meetopstelling.

Zoals hierboven is aangegeven wordt voor de ijking van de in dit rapport beschreven meetopstelling een standaard gebruikt waarvan alle reflectiekenmerken bekend zijn. Er is een commerciële witstandaard gebruikt. Er is naar gestreefd een witstandaard met diffuse reflectie te vinden maar die bestaan niet. Tenminste niet in het hoekbereik dat voor de reflectie van weggoppervlakken van belang is. Daarbij hoort immers de zeer strijkende hoek van 1 graad met het oppervlak. Van deze standaard is de R-tabel gemeten op de traditionele manier (door R-Tech van Schreuder in België). De R-tabel van een volledig diffuus wit oppervlak volgt de cosinus van de invalshoek.

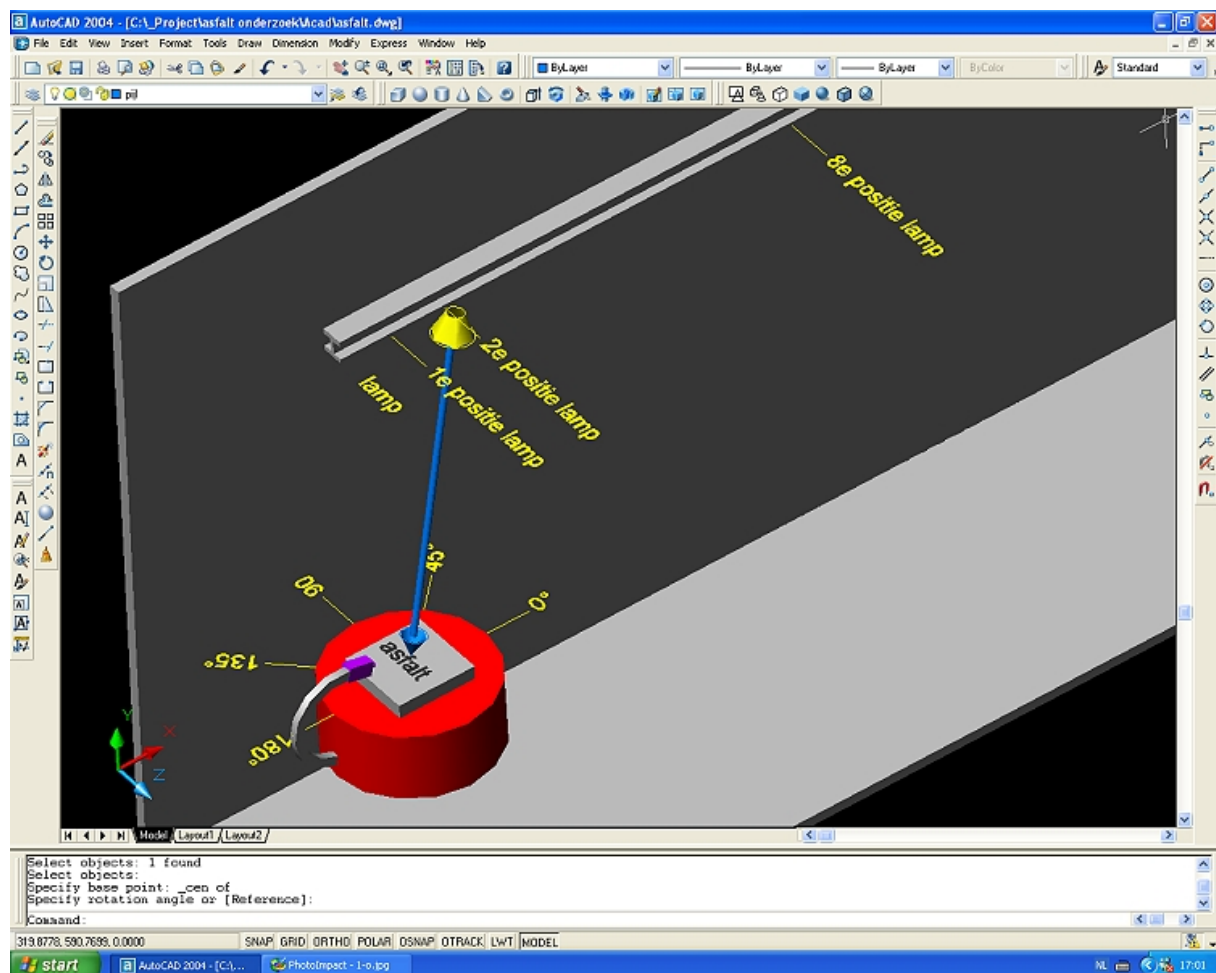
De afwijkingen tussen de R-tabel van de witstandaard en de cosinusverdeling worden als correctiefactoren in de berekeningen meegenomen. Wanneer de standaard met de opstelling wordt gemeten en wanneer met de afwijkingen tussen de R-tabel van de standaard en de cosinusverdeling als correctiefactoren rekening is gehouden zouden alle detectoren dezelfde waarde moeten aangeven. Eventuele kleine verschillen tussen de detectoren kunnen als correctiefactoren in de berekeningen worden meegenomen. Dezelfde standaard wordt gebruikt voor de kalibratie van de meetopstelling.

De meetopstelling wordt eerst op de standaard geplaatst (die dus 'mee naar buiten' wordt genomen). De resultaten van de meetkoppen worden vastgelegd. Daarna wordt de meetopstelling op het te meten weggedeelte geplaatst. De resultaten van de meetkoppen worden opnieuw vastgelegd. De relatie tussen die twee series van metingen geeft de waarden aan die nodig zijn om de R-tabel in absolute maat te identificeren. Uit praktische overwegingen kunnen verfijningen worden toegevoegd die aan het beginsel niet toe - of afdoen.

In de praktijk wordt vaak een secundaire standaard gebruikt om mee naar buiten te nemen. Dat betekent dat er een tussenstap moet worden ingevoerd. Van de primaire standaard - die dus in het laboratorium blijft - en de secundaire standaard. Het is aan te bevelen om de correlatie tussen die twee voor iedere meetsessie te bepalen. De te gebruiken correctiefactor is dus niet steeds dezelfde. Mogelijkerwijze kan dit een extra foutenbron introduceren maar het is beter dan de primaire standaard aan de omstandigheden buiten op straat bloot te stellen. Bovendien is deze extra foutenbron geen willekeurige fout, en wordt dus niet bij de totale fout opgeteld. De foutenbronnen worden separaat besproken.

De meetmethodiek van de bestaande R-tabellen

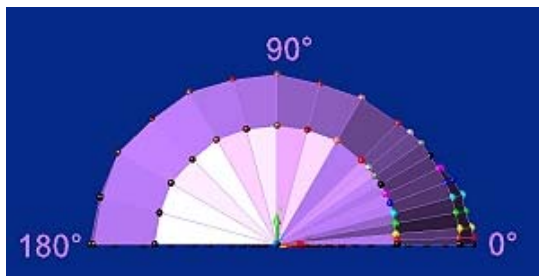
In de jaren 60 is voor het eerst veel onderzoek gedaan naar de reflectie-eigenschappen van asfalt. Van een groot aantal asfaltmonsters is de hoeveelheid lichtreflectie gemeten en de resultaten zijn met elkaar vergeleken. Het asfaltmonster werd op een draaiplateau bevestigd waaraan tevens een meedraaiende arm met een opnemer voor de lichtmeting werd bevestigd. De meetopnemer werd vanuit de positie van waarnemer onder een hoek van één graad op het meetvlak gericht. Zie ook onderstaande figuur. Deze meetopstelling stond aan het begin van een lange hal. Aan het plafond van deze hal was een railsysteem bevestigd met daarop gemonteerd een lichtbron die een continue lichtstroom in de richting van het meetvlak produceerde. De lichtbron werd achtereenvolgens op 29 verschillende posities geplaatst ten opzichte van het meetvlak waarvan steeds de reflectiewaarde werd bepaald. Na iedere meting draaide men het plateau in het horizontale vlak, eerst 2 graden en vervolgens in stappen van 5 tot 15 graden tot de meting uiteindelijk een bereik van 180 graden had doorlopen. De gemeten reflectiewaarde van elke meetpositie werd opgeslagen in een bestand wat in de praktijk een R-tabel wordt genoemd.



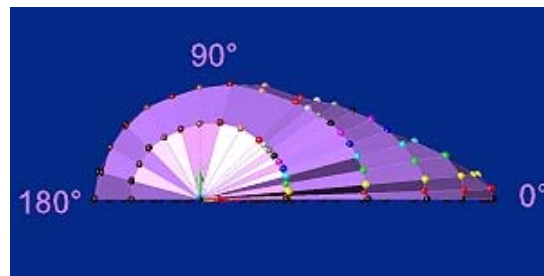
Opstelling van de traditionele meetmethode. Meting in lijn met de zendrichting van de lichtbron, ook wel 0 graden vlak genoemd.

De karakteristieke vorm van de R-tabellen

Dit onderzoek is een eerste aanzet tot actualisatie van tot de tot op heden toegepaste R-tabellen. Om een goed inzicht te krijgen in de lichtreflectie-eigenschappen van de wegdekken hebben we ervoor gekozen om de bestaande R-tabellen met behulp van Autocad te visualiseren en vervolgens op grond hiervan nader te analyseren. De meetwaarden worden driedimensionaal in een model uitgezet vanuit de richting waar het licht tijdens de meting vandaan kwam. We vertalen de sterkte van de lichtreflectie in ons model in een evenredige afstand tussen een bolletje en het meetvlak. Het totaalbeeld van de driedimensionaal uitgezette meetwaarden met behulp van bolletjes geeft een ruimtelijk beeld van de lichtreflectie verdeling. Er zijn 20 asfalt soorten op deze wijze gevisualiseerd. Hieronder geven we een voorbeeld van twee asfalt soorten C1 en C2. Bij deze tabellen is goed te zien wat er verandert in het verticale vlak van 0°.

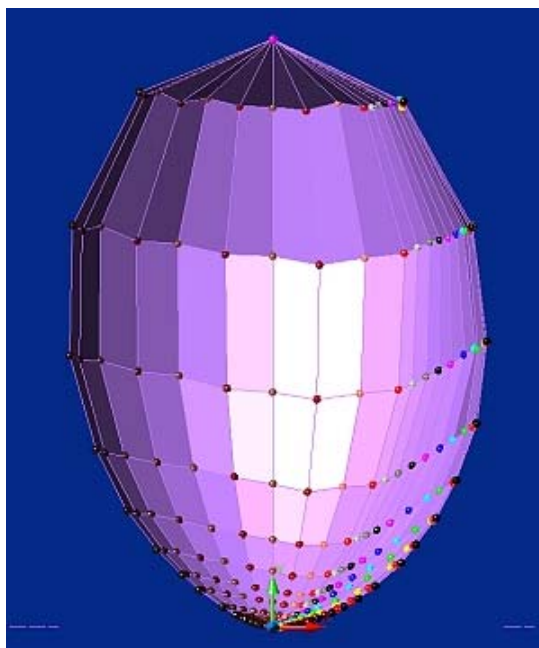


bovenaanzicht CIE C1

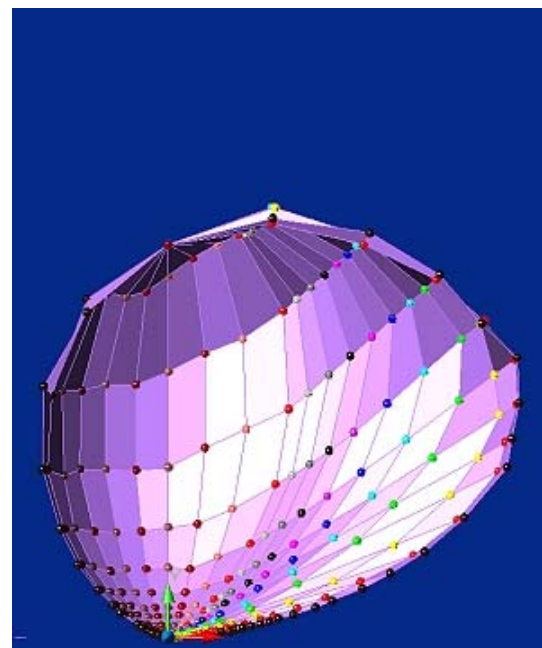


bovenaanzicht CIE C2

Bovenstaande visualisaties laten zien dat in de bovenaanzichten tussen de hoeken 90 en 180 graden een gelijkmatig reflectiepatroon te zien is. Tussen de hoeken 0 en 90 graden variëren de reflectiewaarden het meest waarbij de extreme waarden te vinden zijn het 0 graden vlak, het vlak in lijn met de zendrichting van het licht.



Zijaanzicht CIE C1

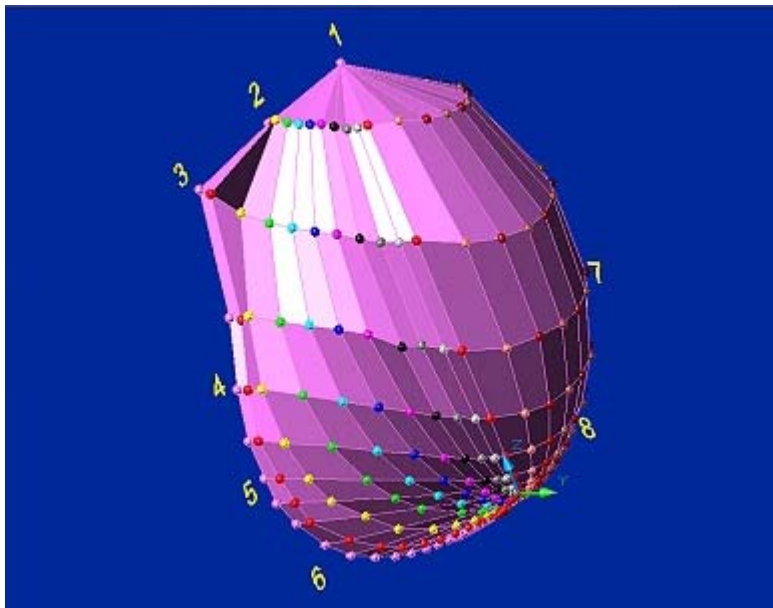


Zijaanzicht CIE C2

Op grond van de kennis dat in het 0 graden vlak de variatie in reflectiewaarden het grootst is hebben we besloten om in dit vlak een voldoende aantal meetsensoren te plaatsen. Omdat de dikte van de lob in het 90 graden vlak ook van belang is en met drie punten te construeren is hebben we gekozen voor een sensor in dit vlak, dus haaks op de richting van lichtinval. Deze hoek is tevens gekozen vanwege de stabiliteit van de constructie van het meetapparaat.

Door interpolatie worden de tussenliggende waarden tussen de gemeten punten bepaald volgens een parabolische functie. We zetten de gevonden meetwaarden driedimensionaal uit in AutoCAD en met het commando "Spline" verbinden we de gemeten punten. Waarna de overige punten worden uitgezet in ons ruimtelijk model. De volgende stap is de 580 richtingen in de vorm van lijntjes uit te zetten en middels het commando "trim" (knip) in te korten op de juiste lengte. Daarna volgt het op de juiste volgorde uitlezen van de gekipte of getrimde lijntjes. De geïnterpoleerde waarden worden overgenomen in een R-tabel. En vervolgens weer gevisualiseerd via AutoCAD om grafisch te controleren of er type fouten zijn gemaakt.

Omdat het plaatsen van 8 verschillende lichtbronnen met een betrouwbare onderlinge kalibratie niet haalbaar is heeft de heer Schreuder het idee van het omdraaien van de lichtweg gelanceerd. Hierdoor kan met een lichtbron worden gewerkt en het reflecterend licht kan vanuit verschillende hoeken ten opzichte van de meetplaats worden gemeten. De lichtstroom wordt vanuit de lichtbron via een glasfiber en een lens gericht op het wegdek. Met deze lichtstroom lichten we een stukje asfalt aan met een oppervlakte van 64 cm². Het opvangen van het gereflecteerde licht gebeurt door 8 individuele lenzen die op strategische plaatsen ten opzichte van het meetoppervlak zijn gepositioneerd en die de lichtstroom via glasfibers naar het meetsysteem geleiden.



Overzicht van de plaatsing van de meetpunten in de meetopstelling

- Dikte van de lob (7 en 8)
- Karakteristieke vorm (1 t/m 6)

Beschrijving van de meetopstelling

Inleiding

Binnen het tijdsbad van dit project was het alleen mogelijk een meetsysteem te ontwikkelen op basis van op de markt verkrijgbare beproefde optische componenten. Na een uitgebreid onderzoek van de beschikbare technologieën is gekozen voor een meetsysteem bestaande uit :

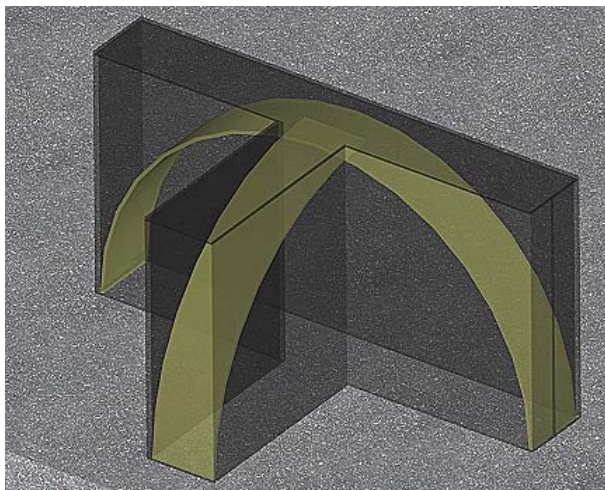
- een optisch gestabiliseerde lichtbron;
- bekende fibertechnologie;
- een nauwkeurig optisch detectiesysteem;

De uitgangspunten voor het ontwerp en de bouw van het systeem waren:

- een verplaatsbare meetkast
- bruikbaarheid voor metingen 's nachts en overdag
- automatische correctie voor lampinstabiliteit
- automatische correctie voor temperatuurschommelingen
- eenvoudig kalibreerbaar

De opbouw van het meetsysteem

Door de werkgroep is het minimum aantal posities geformuleerd die van belang zijn voor het met voldoende nauwkeurigheid kunnen construeren van een R-tabel in de vorm zoals we die kennen. Uitgaande van deze posities of meethoeken is het ontwerp van de meetopstelling nader bepaald. Figuur 1 geeft in principe de uitvoering weer van de optische meetkop.



Figuur 1

De wegdekreflectie wordt onder twee assen gemeten. We willen op 6 punten meten in het vlak waar het licht vandaan komt, ook wel vlak 0° genoemd, en we willen twee keer meten in een richting haaks op dit meetvlak om de dikte van de ruimtelijke lob te kunnen bepalen.

Het meetsysteem is opgebouwd uit twee onderdelen :

- een meetkoffer met meetkop voor plaatsing op het wegdek
- een controle-eenheid met lichtbron en licht detectiesysteem

onderling verbonden met glasfibers voor de transmissie van het uitgezonden en opgevangen licht.

Het systeem wordt aangestuurd vanuit een laptop PC die ook weer de meetresultaten inleest en in een databestand wegschrijft. De koppeling tussen de meetkop en de controle eenheid bestaat uit 4 meter lange optische fibers waarvan bekend is dat hun buiging een geringe invloed heeft op de transmissie van het getransporteerde licht. De intensiteit van licht aan het uiteinde van de fibers wordt gemeten met een fotometrisch gekalibreerde CCD camera.

De lichtbron

Het licht dat wordt gebruikt voor de bepaling van de reflectie eigenschappen van het wegdek wordt opgewekt door een spectraal gecorrigeerde lichtbron. Deze lichtbron is met behulp van een optische terugkoppeling gestabiliseerd, waardoor een stabiliteit is verkregen binnen $\pm 0,7\%$.

Fotometrische CCD - camera

Voor het uitlezen van de lichtintensiteit van de 8 opnemende fibers is een camera gekozen die qua optische eigenschappen en beeldverwerking naadloos aansluit bij de door de werkgroep opgestelde specificaties, qua dynamische bereik en meettijden . De gemeten data is eenvoudig te exporteren naar database bestanden waarna verdere bewerking van de informatie kan plaatsvinden.

De belangrijkste eisen voor de camera betreffende het verrichten van betrouwbare metingen zijn de optische en elektrische stabiliteit. Aangezien alle fiberuitgangen gelijktijdig worden gemeten speelt ook de uniformiteit qua pixelgevoeligheid een belangrijke rol. De camera is door de leverancier van het camerasysteem volledig optisch gekarakteriseerd zodat de lichtintensiteit van alle afzonderlijke fibers optisch identiek wordt beoordeeld. De kalibratienauwkeurigheid bedraagt $\pm 2\%$, waarbij de 'drift' van het systeem kleiner is dan $\pm 1- 1,5\%$ per jaar bij veelvuldig gebruik.

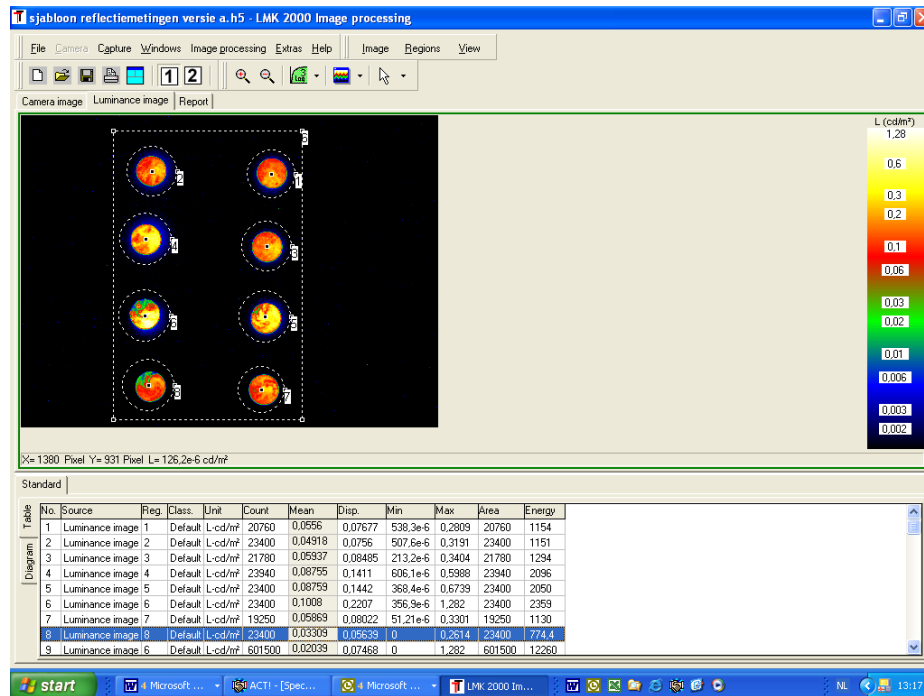
Normaal gesproken dienen bij wisselende temperatuursomstandigheden dergelijke systemen optisch te worden gecorrigeerd. Bij deze camera vindt de compensatie reeds intern plaats waardoor er zonder aanvullende maatregelen betrouwbaar kan worden gemeten.



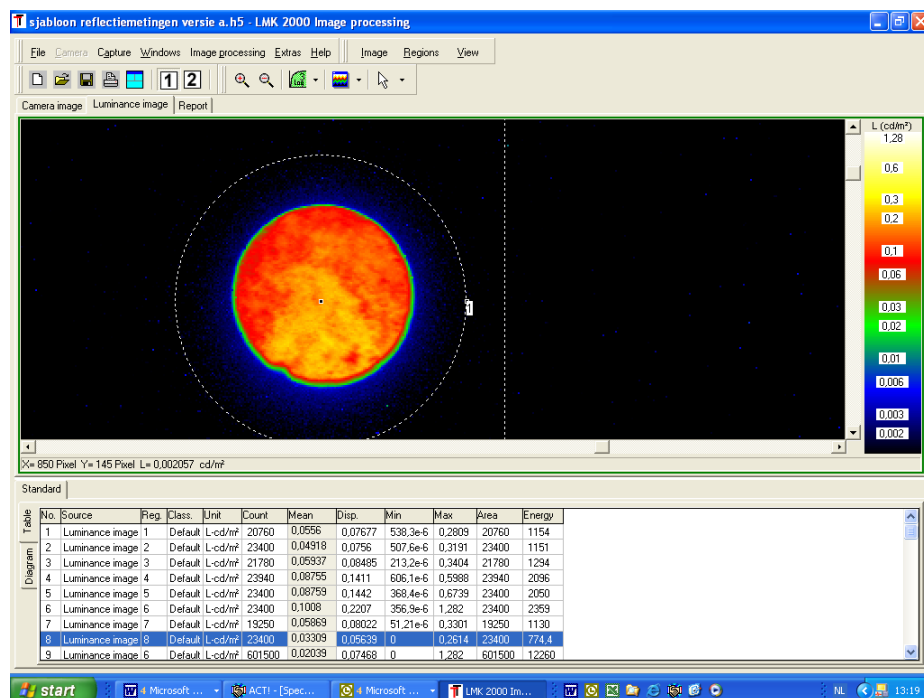
Belangrijkste optische specificaties camerasysteem

Dynamisch bereik	1: 10.000
Meetbereik	30 .. 3×10^6 Cd/m ²
V(λ)-Aanpassing	$f_1 < 3,5\%$
Lineairiteit	$f_3 < 0,2\%$
CCD	1300 * 1034
Lichtgevoeligheid	$0,1 \times 10^{-3}$ Lux bij 10 sec. integratietijd

De software voor het meetsysteem is uitermate modulair opgebouwd. Door het aanbrengen van meetrasters in het beeld wordt automatisch de energie bepaald van de aangegeven regionen. De camera wordt gefocuseerd op de uitgangen van de meetfibers en waarna de meetoppervlakken worden gedefinieerd. Van elk meetoppervlak wordt de energiewaarde bepaald en deze energiewaarde wordt gebruikt voor het bepalen van de hoeveelheid gereflecteerd licht vanuit een specifieke hoek.



figuur 2. overzicht meetsoftware



figuur 3. uitvergroting fiberuitgang

Kalibratie van het meetsysteem

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag is het nodig om luminantieberekeningen uit te voeren, gebruik makend van de R -tabellen van 'oude' en 'nieuwe' wegdekken. Daarvoor is het nodig de R-tabellen te bepalen in een absolute waarde. Een vergelijking van de R-tabellen van 'oude' en 'nieuwe' wegdekken is onvoldoende. Dit houdt in dat de meetopstelling geijkt moet worden in absolute waarden. Dit gebeurt door de ijking uit te voeren aan de hand van de meting van een standaard waarvan alle reflectiekenmerken bekend zijn. Hiervoor wordt een witstandaard gebruikt waarvan de R-tabel door een extern gekwalificeerd laboratorium (R-Tech) is bepaald. Deze witstandaard is gebruikt voor de kalibratie van de meetopstelling, waardoor mogelijke afwijkingen, zoals bijvoorbeeld verschillen in transmissie van de fibers, softwarematig zijn gecorrigeerd. Door de keuze van de kalibratie met de witstandaard en een zorgvuldige uitlijning van de opnemers is bereikt dat onderlinge afwijkingen tussen de opnemers minimaal zijn.

De feitelijke meetprocedure gaat als volgt in zijn werk. De meetopstelling wordt voor het begin van een meetsessie in schone binnenomgeving op de witstandaard geplaatst. De meetresultaten van de opnemers worden hierbij vastgelegd. Daarna wordt de meetopstelling ter plaatse op het te meten weggedeelte geplaatst. De meetresultaten van de opnemers worden opnieuw vastgelegd. De relatie tussen deze twee series metingen geeft de absolute waarden van de gemeten reflecties.

Nauwkeurigheid van de meetopstelling

Onderstaande tabel toont de verschillende onnauwkeurigheden van de systeemonderdelen.

1	Stabiliteit van de lichtbron	$\pm 0,7 \%$
2	Stabiliteit van de camera (over een periode van 2 maanden)	$\pm 0,25 \%$
3	Lichtvariaties door fiberbewegingen	$\pm 0,4 \%$
4	Nauwkeurigheid van de reflectiestandaard	$\pm 5 \%$
5	Uniformiteit afwijking reflectiestandaard materiaal	$\pm 1,5 \%$
6	Herhalingsnauwkeurigheid (zonder verplaatsing gemeten op reflectie standaard)	$\pm 0,3 \%$
7	Herhalingsnauwkeurigheid (met verplaatsing gemeten op reflectie standaard)	$\pm 2 \%$
8	Totale meetnauwkeurigheid	$\pm 10 \%$

- Ad 1 De stabiliteit van de lichtbron is gedurende de metingen continu gemeten. Het blijkt dat gedurende de metingen de variatie niet groter is dan $\pm 0,7 \%$.
- Ad 2 Door de leverancier van het camera systeem wordt een absolute meetnauwkeurigheid van 2% gegarandeerd en deze staat los van de herhalingsnauwkeurigheid van de camera. Deze wordt gespecificeerd op 0,1%. Gezien de opstelling van de camera t.o.v. de fibers wordt een herhalingsnauwkeurigheid bereikt van 0,25%.
- Ad 3 Door de beweging van de fibers vindt er een kleine verandering plaats in de intensiteit van het gereflecteerde licht. Deze verandering bedraagt maximaal een $\pm 0,4\%$.
- Ad 4 en 5 De nauwkeurigheid waarmee de reflectiewaarden van de reflectiestandaard door het externe laboratorium zijn bepaald bedraagt $\pm 5 \%$. Door het externe laboratorium is een staal gemeten afkomstig van een hoeveelheid reflectiemateriaal. De uniformiteit van het gehele oppervlakte wordt door de leverancier gesteld op 98,5%.
- Ad 6 en 7 De herhalingsnauwkeurigheid van het systeem is op verschillende wijze bepaald. In eerste instantie is het meetsysteem op de standaard geplaatst en zijn er 100 metingen direct na elkaar verricht. Hier bedroeg de nauwkeurigheid $\pm 0,3\%$. In tweede instantie werd het systeem geplaatst en na een meting verwijderd. Na 50 metingen kon worden vastgesteld dat op deze wijze een nauwkeurigheid wordt bereikt van $\pm 2\%$.
- Ad 8 De totale meetnauwkeurigheid van de bepaling van de 8 meetwaarden is opgebouwd uit de punten 1, 2, 3, 4, 5 en 7 en bedraagt ongeveer $\pm 10 \%$.

Representativiteit van wegdekmonsters

In de praktijk bestaan er verschillen tussen plekken op de weg. Soms zijn de verschillen tussen plekken op de weg aanzienlijk. Er zijn drie redenen aan te wijzen voor deze verschillen.

- 1 onregelmatigheden bij de aanleg. De ervaring leert dat deze verschillen bij goed aangelegde wegen in Nederland, meer in het bijzonder op rijkswegen, klein zijn. Ze kunnen dan ook in eerste instantie verwaarloosd worden.
- 2 onregelmatigheden door reparatie en vervuiling. Bij goed onderhouden wegen, meer in het bijzonder bij rijkswegen, komt dit niet veel voor. Dit punt kan dan ook in eerste instantie verwaarloosd worden.
- 3 onregelmatigheden ten gevolge van verschillen in berijding. Op een typische weg vindt men een aantal stroken (vanuit de berm naar binnen):
 - een strook direct naast de berm, die weinig wordt bereden, en waar
 - vuil zich kan ophopen;
 - een wielspoor
 - een oliespoor
 - nog een wielspoor
 - naar het midden van de weg een strook, die minder wordt bereden, maar waar vuil zich niet kan ophopen.

Bij wegen met meer rijstroken herhaalt dit patroon zich (min of meer). Bij goed aangelegde en goed onderhouden wegen zijn de verschillen gering. Op vele wegen, ook op vele rijkswegen, is de aanleg en het onderhoud echter bepaald ondermaats, zodat zich duidelijke rijsporen vertonen. Dit punt is van belang omdat de weg door de weggebruiker als een geheel wordt beschouwd ondanks het feit dat de sporen er nogal verschillend uit kunnen zien. Men zou dus graag een methode hebben, waarbij het wegdek als geheel wordt beschouwd. Dit is een lastig punt. Dergelijke onregelmatigheden zijn namelijk niet te vermijden. Het lijkt verstandig om twee gevallen te onderscheiden. Gevallen waarbij de verschillen tussen de sporen groot zijn en gevallen waarbij de verschillen tussen de sporen gering zijn.

Wanneer de verschillen tussen de sporen groot zijn is het niet mogelijk om een enkel punt te vinden dat representatief geacht kan worden voor de hele weg. Men kan ervoor kiezen om een aantal punten te nemen en de resultaten daarvan middelen maar de keuze van de punten blijft willekeurig. En ook het middelen blijft problematisch. Men zou kunnen denken aan een middeling van waarden waarbij aan de verschillende punten een statistisch gewicht wordt toegekend in overeenstemming met het deel van het wegoppervlak waarvoor dat bedoelde punt representatief kan worden geacht. Zo zou men een punt in ieder van de vijf genoemde stroken kunnen nemen, de relatieve waarde gelijk stellen aan de fractie die de bedoelde sporen uitmaken van de totale wegbreedte en de gewogen waarden middelen.

Afgezien dat deze procedure theoretisch niet kan worden onderbouwd, wordt het probleem alleen maar verschoven. Men moet wegdekpunten hebben die representatief kunnen zijn voor de stroken. Dat zou kunnen worden ondervangen door een aantal wegpunten te meten in iedere strook. Deze procedure kan op theoretische gronden al evenmin worden verdedigd. Bovendien is een zeer groot aantal metingen nodig.

Vervolgens komen we bij de vraag welk wegdekdeel de beste representant is voor het gehele wegdek. De ervaring leert dat in het linker rijspoor van de rechter rijstrook de minste

onregelmatigheden voorkomen. Uit dien hoofde is dat deel dus het beste om een wegdek te karakteriseren. In het verleden heeft men dan ook meestal de wegdekmonsters, die voor meting gebruikt werden uit het linker rijspoor van de rechter rijstrook genomen. Als we aannemen dat zulks ook is gedaan bij de wegdekken die gebruikt zijn voor de R- en C-classificatie ligt het voor de hand om ook bij de nieuwe metingen deze plaats uit te zoeken. De publicaties geven echter geen uitsluitel. We begonnen deze notitie met de constatering dat bij alle wegdekken in de praktijk verschillen gevonden kunnen worden tussen plekken op de weg. Vaak zijn de verschillen tussen de plekken op de weg gering, maar soms zijn ze aanzienlijk.

De metingen

Locaties van de metingen

De metingen zijn uitgevoerd op de volgende locaties:

- 1 N225 juist binnen de grens van de gemeente Zeist.
Type wegdek: DAB
Weeknummer: 41 van 2004
Tijdstip: tussen 15:00 uur en 22:00 uur
Temperatuur: tussen de 17°C en 14°C
Luchtvochtigheid: tussen de 45 en 60%
- 2 N225 ter hoogte van de gemeentegrens van de gemeente Zeist, A12 zijde.
Type wegdek: SMA
Weeknummer: 41 van 2004
Tijdstip: tussen 15:00 uur en 22:00 uur
Temperatuur: tussen de 17°C en 14°C
Luchtvochtigheid: tussen de 45 en 60%
- 3 N504 ten hoogte van hectometerpaal 2.2
Type wegdek: DAB van minimaal 12 jaar oud
Weeknummer: 42 van 2004
Tijdstip: tussen 14:00 uur en 18:00 uur
Temperatuur: tussen de 14°C en 10°C
Luchtvochtigheid: tussen de 50 en 60%
- 4 Attleeplantsoen, Gemeente Utrecht in de wijk Kanaleneiland
Type wegdek: DAB zeer oud
Weeknummer: 42 van 2004
Tijdstip: tussen 19:00 uur en 22:00 uur
Temperatuur: tussen de 11°C en 16°C
Luchtvochtigheid: tussen de 60 en 70%
- 5 In de Velsertunnel
Type wegdek: Novachip
Weeknummer: 42 van 2004
Tijdstip: tussen 23:00 uur en 1:00 uur
Temperatuur: tussen de 11°C en 18°C
Luchtvochtigheid: tussen de 50 en 70%
- 6 In de Wijkertunnel
Type wegdek: Onbekend
Weeknummer: 42 van 2004
Tijdstip: tussen 21:00 uur en 4:00 uur
Temperatuur: rond de 12°C
Luchtvochtigheid: rond de 75%

- 7 Voor de Wijkertunnel aan de Westkant
Type wegdek: ZOAB
Weeknummer: 42 van 2004
Tijdstip: tussen 21:00 uur en 4:00 uur
Temperatuur: rond de 7,8°C
Luchtvochtigheid: rond de 82%
- 8 Voor de Wijkertunnel aan de Oostkant
Type wegdek: ZOAB
Weeknummer: 42 van 2004
Tijdstip: tussen 21:00 uur en 4:00 uur
Temperatuur: tussen de 7,7° C en 8,6°C
Luchtvochtigheid: tussen de 78 en 80%
- 9 Op de A200 te Haarlem
Type wegdek: ZOAB
Weeknummer: 46 van 2004
Tijdstip: tussen 10:30 uur en 12:00 uur
Temperatuur: 7,4° C
Luchtvochtigheid: 61%

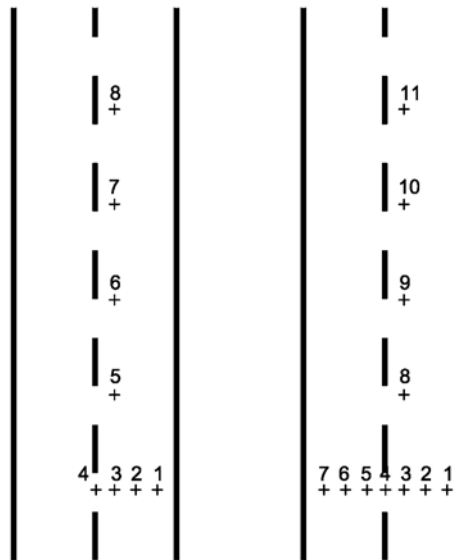
Niet alle metingen zijn voor een analyse in detail uitgewerkt omdat;

1. Er volgens opgave DAB in de Velsertunnel lag en bij nader navraag bleek dat Novachip te zijn, omdat deze wegdek soort bijna niet voorkomt hebben we deze meting niet verder uitgewerkt;
2. De waarden van de metingen uit Utrecht alsmede in de tunnelbuis van de Wijkertunnel niet bruikbaar bleken vanwege een te nat oppervlak. Tijdens de uitwerking was dit te zien aan een te sterke spiegeling en een te kleine diffuse component;
3. De meetgegevens van DAB op de N225 niet verder zijn uitgewerkt omdat de resultaten hiervan nagenoeg overeenkomen met de waarden van de meting op de N504.

4. Het toegepaste meetraster

Om een goed vergelijk te kunnen maken met de metingen uit het verleden meten we net als toen het meetgebied ter plaatse van het linker wielspoor van de rechterrijstrook. Het spoor is in het verleden gekozen omdat dit het meest bereiden is en qua uniformiteit over de gehele strook in de lengte de minste afwijkingen vertoont. Het gaat hierbij om de punten 3, 8 t/m 11 of 3, 5 t/m 8. Daarnaast hebben we gekozen om de gehele breedte van de rijstrook te meten om te kijken of er daad werkelijk verschillen waarneembaar zijn over de breedte van de rijstrook(en)

Op het asfalt is dit meetraster uitgezet bestaande uit 8 punten of 11 punten afhankelijk van het aantal rijstroken. De rasters zien er als volgt uit



Het verwerken van de meetgegevens

Omdat onze meetopstelling een te klein meetvlak heeft wordt elk meetpunt 10 maal in een klein gebied verplaatst en gemeten. De meetgegevens worden per wegdek verzameld en in een Excel sheet. Per tabblad wordt er één meetpunt uitgewerkt.

Het uitwerken gaat als volgt. Per punt zijn er tien metingen uitgevoerd en van deze tien metingen bepalen we de gemiddelde waarde per meethoek en corrigeren deze met een apparaatcode (een waarde om de procentuele afwijking van de meting te verminderen). Nadat we alle meetpunten gehad hebben nemen we de punten die zich bevinden in het linker wielspoor van de rechterrijstrook. Dit aantal is op vijf gesteld. Van deze 5 meetpunten bepalen we de gemiddelde waarde en we construeren een volledige R-tabel zoals omschreven in het hoofdstuk "De karakteristieke vorm van R-tabellen". We baseren onze R-tabel op basis van 10 x 5 metingen = 50 metingen wat statistisch gezien een representatieve waarde is. De metingen over de breedte van de weg worden gebruikt om te kijken in hoeverre deze ten opzichte van elkaar afwijken.

De meetresultaten

Algemeen

Na de uitvoering van de metingen aan DAB (Dicht Asfalt Beton), SMA (Steen Mastiek Asfalt) ZOAB (Zeer Open Asfalt Beton) en het tamelijk zeldzame Novachip werden de resultaten in diverse Excel bladen uitgewerkt en vergeleken met de meetwaarden uit de 20 bestaande R-tabellen. De resultaten geven de volgende informatie:

- 1 Over de breedte van de weg vinden we een gemiddelde variatie binnen een bereik van 30% en een enkele keer 50% tussen de meetwaarden. Meetwaarden 2 en 6 (de middensporen) wijken daarin het meest af. Dit lijkt logisch omdat hier het wegdek weinig bereiden wordt en op deze strook het meeste olie gelekt wordt.
- 2 In de lengterichting vinden we afwijkingen van de meetwaarden tussen de 6 en 10% maar door het middelen van de 50 meetwaarden zijn de afwijkingen te verwaarlozen.
3. Om aan te tonen dat het linker spoor van de rechter rijstrook representatief is voor het gehele wegdek hebben we alle meetwaarden van alle hoeken in de lengte richting van de weg vergeleken met het gemiddelde van alle meetwaarden en hoeken in de breedte van de weg. Hier uit blijkt dat de beide uitkomsten niet meer dan 8% uit elkaar liggen.

Dicht asfalt beton (DAB)

Na het visualiseren van de meetgegevens van het oude stuk DAB van de gemeente Utrecht bleek dat deze te veel spiegeling bevat als gevolg van een te vochtig wegdek en niet bruikbaar is voor verdere uitwerking. De meetgegevens van de meting op de N504 ten hoogte van hectometer paal 12.2 zijn goed bruikbaar en volgens informatie van de provincie is dit wegdek ongeveer 12,5 jaar oud.

Het oppervlak vertoont een vlak geheel met de steentjes dicht tegen elkaar. Ook is te zien dat de steentjes behoorlijk gepolijst zijn door de autobanden. Wat ook opvalt is dat hier en daar een steentje ontbreekt. Dit wegdek kan goed dienen als referentie voor oudere wegdekken. Na het uitwerken van de R-tabel volgens het hiervoor beschreven proces worden hiermee lichtberekeningen gemaakt met gebruikmaking van de NPR13201-3. We komen uit op een klasse van ME4a ($L_{gem} \geq 0,75$ cd/m², $U_0 \geq 0,4$, $U_I \geq 0,6$ en de $T_i \leq 15\%$).

	Niveau	Basisschema1	<< Basisschema2 >>
Wegtype		Enkelbaans weg	Enkelbaans weg
Middenberm		1.00	1.00
Wegbreedte		7.20	7.20
Aantal rijstroken		2	2
Wegdek		Asphalt CIE R3	DAB N504
Q0		0.070	0.070
Armatuurtype		SGS253 GB CR P5X 1xSON-TP1I	SGS253 GB CR P5X 1xSON-TP1I
Mastopstelling		Enkelzijdig links	Enkelzijdig links
Masthoogte	<input type="checkbox"/> Instelling...	10.00	10.00
Mastafstand	<input type="checkbox"/> Instelling...	40.00	43.00
Overhang	<input type="checkbox"/> Instelling...	0.00	0.00
Kantel90	<input type="checkbox"/> Instelling...	5.0	5.0
L gem	≥ 0.75	0.75	0.78
L min/gem (U ₀)	≥ 0.40	0.62	0.66
U _I	≥ 0.60	0.56	0.57
T _I [%]	≤ 15.0	10.0	9.6
SR	> 0.50	0.63	0.64

Ontwerpresultaten op basis van recente DAB reflectiemeting

De uitkomsten van de lichtberekeningen voor een specifiek ontwerp laten zien dat een mastafstand van 40m naar 43m kan gaan en dus met 7,5% kan worden vergroot bij een gelijkblijvende lichtopbrengst en gelijkmatigheden. Dit biedt zeker mogelijkheden om voor dit type wegen besparingsmogelijkheden in aanleg, onderhoud en energiegebruik te veronderstellen.

Steen mastiek asfalt (SMA)

Van de gemeente Zeist kregen we toestemming om binnen de afzetting op de N225 metingen op het wegdek te verrichten. We zijn 's middags om 15:00 uur begonnen met meten. De temperatuur tijdens de meting was 17 graden en liep tijdens de meting af naar 14 graden. De vochtigheid was aan het begin van de meting 45% en liep langzaam op tot 60% na het invallen van het duister. Het wegdek is goed bereiden en minstens 4 jaar oud.

Na het uitwerken van een R-tabel volgens het reeds beschreven proces zijn lichtberekeningen voor een specifiek ontwerp gemaakt. Op basis van de NPR13201-3 en komen we bij dit ontwerp op een verlichtingsklasse van ME4a ($L_{gem} \geq 0,75$ cd/m², $U_0 \geq 0,4$, $U_I \geq 0,6$ en de $T_I \leq 15\%$). De gegevens laten zien dat bij een mastafstand van 41 m er bijna geen verschil zit in de uitkomsten bij toepassing van de bestaande gegevens en de nieuwe. We vinden gelijkblijvende lichtopbrengsten en gelijkmatigheden. Hier zien wij geen mogelijkheden om verder te optimaliseren of te besparen. Onze conclusie is dat de bestaande R-tabel voor SMA (CIE C2) de juiste gegevens bevat om mee te rekenen en dus te ontwerpen.

	Niveau	Basisschema1	<< Basisschema2 >>
Wegtype		Enkelbaans weg	Enkelbaans weg
Middenberm		1.00	1.00
Wegbreedte		7.20	7.20
Aantal rijstroken		2	2
Wegdek		Asphalt CIE C2	SMA06 N225
Q0		0.070	0.070
Armatuurtype		SGS253 GB CR P5X 1xSON-TP1I	SGS253 GB CR P5X 1xSON-TP1I
Mastopstelling		Enkelzijdig links	Enkelzijdig links
Masthoogte	<input type="checkbox"/> Instelling...	10.00	10.00
Mastafstand	<input type="checkbox"/> Instelling...	41.00	41.00
Overhang	<input type="checkbox"/> Instelling...	0.00	0.00
Kantel90	<input type="checkbox"/> Instelling...	5.0	5.0
L gem	≥ 0.75	0.77	0.78
L min/gem (U ₀)	≥ 0.40	0.61	0.62
U _I	≥ 0.60	0.59	0.59
T _I [%]	≤ 15.0	9.7	9.6
SR	> 0.50	0.64	0.64

Ontwerpresultaten op basis van recente reflectiemeting voor SMA

Zeer open asfalt beton (ZOAB)

Om goed bereiden ZOAB veilig te kunnen meten maken we gebruik van een geplande wegafzetting op de A9 ter hoogte van Beverwijk. 300 meter voor en 300 meter na de Wijkertunnel ligt het wegdek vlak en niet op een helling. Op die gedeelten zijn de metingen uitgevoerd.

Meting aan de noordzijde van de Wijkertunnel af

De eerste ZOAB meting vond plaats aan de noordzijde van de Wijkertunnel, aan de zijde waar het verkeer van de Wijkertunnel in de richting van Alkmaar rijdt. De meting is gestart op 22:30 uur. De temperatuur tijdens de meting was 8,6 graden. De luchtvochtigheid was aan het begin van de meting 78% en liep langzaam op tot 80%. Deze vochtigheid is hoger dan bij de vorige metingen en dat heeft te maken met het late tijdstip op de dag. Bij dalende temperaturen neemt de relatieve vochtigheid gewoonlijk toe. Informatie van het KNMI leert dat een luchtvochtigheid van 80% in de nachtelijke uren een gebruikelijke waarde is.

Met de resultaten van de nieuwe R-tabel zijn voor een specifiek ontwerp lichtberekeningen gemaakt. De klasse die we volgens de NPR 13201-1 (kwaliteitscriteria openbare verlichting) op deze snelweg moeten halen is Me4a ($L_{gem} \geq 0,75$ cd/m², $U_0 \geq 0,4$, $U_I \geq 0,6$ en de $T_I \leq 15\%$). Na het berekenen van de Q0 blijkt dat deze waarde enorm afwijkt van de waarde welke momenteel wordt gebruikt voor ZOAB (Dutch Porous). Voor het berekenen van een praktijksituatie is een middenberm opstelling uitgewerkt voorzien van 18 meter hoge masten met als armatuur de SGS253 GB van Philips en als lichtbron SON-T+ 150W. Het wegprofiel bestaat uit 2x2 rijstroken van 3,6 m breedte per rijstrook en een middenberm van 3 meter.

De ontwerpgegevens laten zien dat de mastafstand van 90 naar 80 meter moet worden verkleind om de waarden uit de norm kunnen halen. Dit is een 11% kleinere mastafstand. Een belangrijk ander probleem dat zich voordoet is de gelijkmatigheid en met name de langsgelijkmatigheid. Als een installatie wordt ontworpen met behulp van de bestaande R-tabel voor ZOAB (Dutch Porous) en de installatie wordt volgens dit ontwerp geplaatst ontstaat er een ongelijkmatig en dus vlekkelig verlichtingspatroon.

	Niveau	Basisschema1	<< Basisschema2 >>
Wegtype		Dubbelbaans weg	Dubbelbaans weg
Middenberm		3,00	3,00
Wegbreedte		7,50	7,50
Aantal rijstroken		2	2
Wegdek		ZOAB (Dutch Porous)	ZOAB WIJKER OOST
Q0		0,100	0,067
Armatuurtype		SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1:	SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1:
Mastopstelling		Middenberm	Middenberm
Masthoogte	<input type="checkbox"/> Instelling...	18,00	18,00
Mastafstand	<input type="checkbox"/> Instelling...	90,00	80,00
Overhang	<input type="checkbox"/> Instelling...	0,00	0,00
Kantel90	<input type="checkbox"/> Instelling...	5,0	5,0
L gem	$\geq 0,75$	0,86	0,77
L min/gem (U ₀)	$\geq 0,40$	0,51	0,54
U _I	$\geq 0,60$	0,60	0,60
T _I [%]	$\leq 15,0$	8,5	9,4
SR	$> 0,50$	0,79	0,79

Ontwerpresultaten op basis van ZOAB bij de Wijkertunnel Oost

Meting aan de noordzijde naar de Wijkertunnel toe

De tweede meting vond ook plaats aan de noordzijde van de Wijkertunnel maar nu aan de westzijde waar het verkeer vanuit Alkmaar in de richting van de Wijkertunnel rijdt. We zijn hier om 00:00 uur begonnen met meten. De temperatuur tijdens de meting was 7,8 graden. De vochtigheid was aan het begin van deze meting 80% en liep langzaam op tot 82%. Zoals hiervoor vermeld is een lucht vochtigheid rond de 80% in de nachtelijke uren een normale waarde. De klasse die we volgens de NPR 13201-1 (kwaliteitscriteria openbare verlichting) op deze snelweg moeten halen is weer Me4a (Lgem $\geq 0,75$ cd/m², U0 $\geq 0,4$, UI $\geq 0,6$ en de Ti $\leq 15\%$) zoals beschreven in de norm 13203-3.

Na het berekenen van de Q0 zien we dat deze Q0 ook afwijkt van de waarde die momenteel wordt gebruikt voor ZOAB (Dutch Porous). Voor het toetsen van de consequenties met deze R-tabel is weer een praktijksituatie met een middenbermopstelling uitgewerkt met 18 meter hoge masten met als armatuur de SGS253 GB van Philips en als lichtbron SON-T+ 150W. Het wegprofiel bestaat uit 2x2 rijstroken van 3,6 meter per rijstrook en een middenberm van 3 meter.

De ontwerpgegevens laten zien dat de mastafstand met 20 meter moet worden verkleind om de streefwaarden uit de norm te blijven halen. Dit is een 22% kortere mastafstand. Een belangrijk probleem wat zicht ook hier weer voordoet is de ongelijkmatigheid in met name de lengterichting van de weg (langsgelijkmatigheid). Op het moment dat een installatie wordt uitgerekend met de bestaande R-tabel ZOAB (Dutch Porous) en de installatie wordt volgens ontwerp geplaatst ontstaat er wederom een vlekkerig ongelijkmatig verlichtingsbeeld. Om een indruk te geven spreken we normaal over een langsgelijkmatigheid van 0,6 en we vinden bij deze opstelling een langsgelijkmatigheid van 0,46. Het verdient aanbeveling de huidige R-tabellen voor ZOAB te vervangen door actuele tabellen.

	Niveau	Basisschema1	<< Basisschema2 >>
Wegtype		Dubbelbaans weg	Dubbelbaans weg
Middenberm		3.00	3.00
Wegbreedte		7.50	7.50
Aantal rijstroken		2	2
Wegdek		ZOAB (Dutch Porous)	ZOAB WIJKER WEST
Q0		0.100	0.058
Armatuurtype		SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1:	SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1:
Mastopstelling		Middenberm	Middenberm
Masthoogte	<input type="checkbox"/> Instelling...	18.00	18.00
Mastafstand	<input type="checkbox"/> Instelling...	90.00	71.00
Overhang	<input type="checkbox"/> Instelling...	0.00	0.00
Kantel90	<input type="checkbox"/> Instelling...	5.0	5.0
L gem	≥ 0.75	0.86	0.75
L min/gem (Uo)	≥ 0.40	0.51	0.55
UI	≥ 0.60	0.60	0.63
Ti [%]	≤ 15.0	8.5	9.7
SR	> 0.50	0.79	0.79

Ontwerpresultaten op basis van de reflectiemeting voor ZOAB Wijkertunnel West

Meting op de A200 te Haarlem

De derde ZOAB meting vond ook plaats op de A200 te Haarlem. We zijn hier om 10:30 uur begonnen met meten. De temperatuur tijdens de meting was 7,4 graden. De vochtigheid was tijdens gehele meting constant rond de 60%. De klasse die we volgens de NPR 13201-1 (kwaliteitscriteria openbare verlichting) op deze snelweg moeten halen is Me4a (Lgem ≥ 0,75 cd/m2, U0 ≥ 0,4, UI ≥ 0,6 en de Ti ≤ 15%).

Na het berekenen van de Q0 zien we dat deze Q0 ook afwijkt van de waarde die momenteel wordt gebruikt voor ZOAB (Dutch Porous). Voor het toetsen van de consequenties met deze R tabel is een praktijksituatie met een middenberm opstelling uitgewerkt met 18 meter hoge masten met als armatuur de SGS253 GB van Philips en als lichtbron SON-T+ 150W. Het wegprofiel bestaat uit 2x2 rijstroken van 3,6 meter per rijstrook en een middenberm van 3 meter.

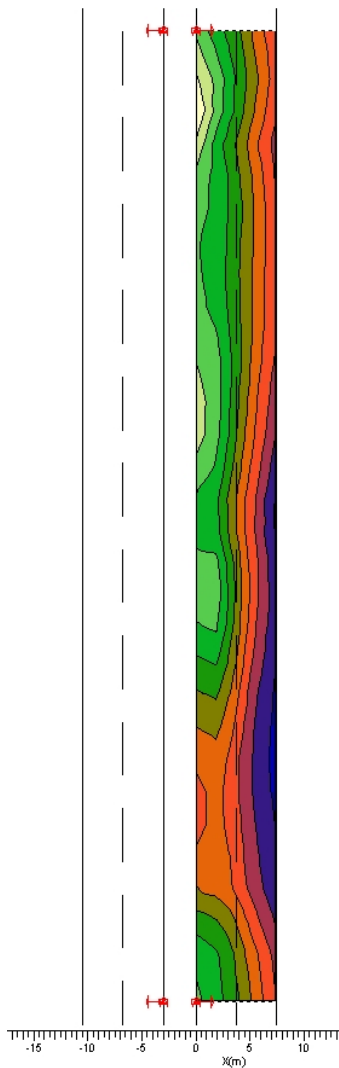
De ontwerpgegevens laten zien dat de mastafstand met 20 meter van 90 naar 70 meter moet worden verkleind om de streefwaarden van de gelijkmatigheid uit de norm te blijven halen. Echter om ook nog de gemiddelde luminantie van 0,75 te halen moeten we naar 60 meter mastafstand. Omdat we praten over een wegdek van twee jaar oud is en nog maar net is ingereden kan deze waarde langzaam naar de 0,75 gaan. Als we dit wegdek over twee jaar nog is bekijken is de verwachting dat we met een mastafstand van 70 meter wel af kunnen en dit is een 22% kortere mastafstand. Een belangrijk probleem wat zicht ook hier weer voordoet zijn de ongelijkmatigheden en met name de langsgelijkmatigheid. Als een installatieontwerp wordt uitgerekend op basis van de bestaande R-tabel ZOAB (Dutch Porous) en de installatie wordt volgens ontwerp geplaatst ontstaat er een vlekkerig ongelijkmatig verlichtingsbeeld.

Om een indruk te geven spreken we normaal over een langsgelijkmatigheid van 0,6 en we vinden bij deze opstelling een langsgelijkmatigheid van 0,47. Dat geeft een vlekkerig verlichtingspatroon in de lengterichting van de weg. Het verdient wederom aanbeveling de huidige R-tabellen te vervangen door actuele tabellen.

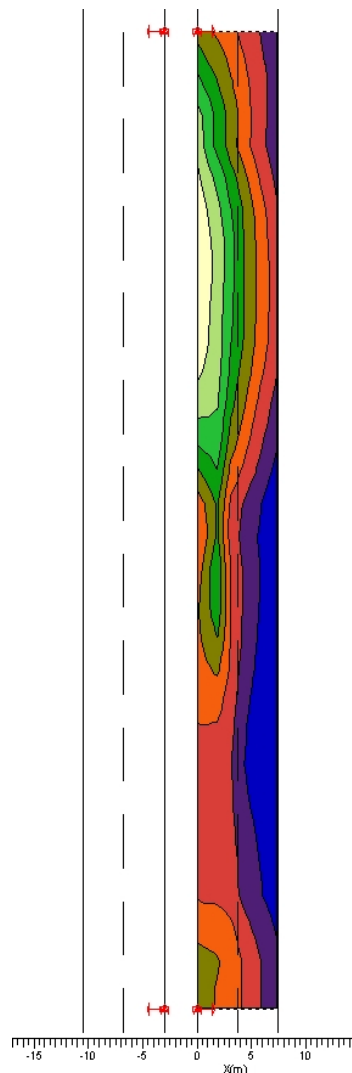
	Niveau	Basisschema1	<< Basisschema2 >>
Wegtype		Dubbelbaans weg	Dubbelbaans weg
Middenberm		3.00	3.00
Wegbreedte		7.50	7.50
Aantal rijstroken		2	2
Wegdek		ZOAB (Dutch Porous)	ZOAB A200
Q0		0.100	0.052
Armatuurtype		SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1:	SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1:
Mastopstelling		Middenberm	Middenberm
Masthoogte	<input type="checkbox"/> Instelling...	18.00	18.00
Mastafstand	<input type="checkbox"/> Instelling...	90.00	70.00
Overhang	<input type="checkbox"/> Instelling...	0.00	0.00
Kantel90	<input type="checkbox"/> Instelling...	5.0	5.0
L gem	>=0.75	0.86	0.66
L min/gem (Uo)	>=0.40	0.51	0.60
UI	>=0.60	0.60	0.66
Ti [%]	<=15.0	8.5	10.8
SR		0.79	0.79

In de volgende twee figuren is een voorbeeld uitgewerkt van een verlichtingsinstallatie voor een weg met ZOAB die is ontworpen op basis van de huidige R-tabel. In de linker figuur is te zien hoe de ontwerpgegevens de lichtverdeling wordt gesuggereerd en in de rechter figuur is te zien wat er in de praktijk qua lichtverdeling werkelijk ontstaat op basis van de nieuwe werkelijke R-tabel.

Lichtsterkteverdeling volgens ontwerp



Lichtsterkteverdeling in werkelijkheid

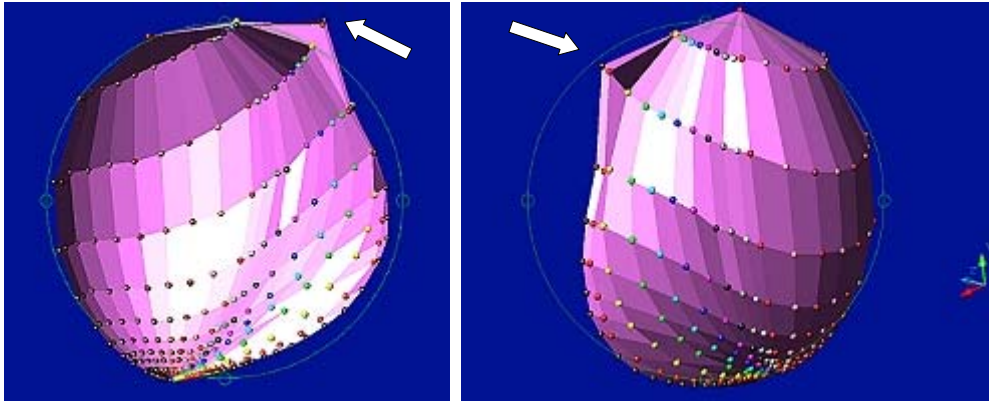


De rode, paarse en blauwe vlakken geven de donkere gebieden aan.

Fout in R-tabel en verkeerde R-tabel voor ZOAB

Door het visualiseren van de 20 asfaltsoorten vinden we een fout in de R-tabel van ZOAB. In de figuren hieronder zijn de fouten duidelijk zichtbaar.

Na een nadere studie onder 8 licht berekeningspakketen is gebleken dat er 5 berekeningspakketen op de markt zijn welke gebruik maken van de hier onder gevisualiseerde R-tabel de overige drie pakketten bevatten geen tabel voor ZOAB.



Visualisatie van de foute tabel

We halen in de hiervoor gevisualiseerde bestaande R-tabel de fout eruit en veranderen de Q0 van 0,1 naar 0,06. In basisschema 1 zien we hiervan het resultaat.

	Niveau	Basisschema1	Basisschema2	Basisschema3	<< Basisschema4 >>
Wegtype		Dubbelbaans weg	Dubbelbaans weg	Dubbelbaans weg	Dubbelbaans weg
Middenberm		3.00	3.00	3.00	3.00
Wegbreedte		7.50	7.50	7.50	7.50
Aantal rijstroken		2	2	2	2
Wegdek		ZOAB aangepast	ZOAB A200	ZOAB WIJKER OOST	ZOAB WIJKER WEST
Q0		0.060	0.052	0.067	0.058
Armatuurtype		SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1	SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1	SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1	SGS253 GB CX P5X 1xSON-TP1
Mastopstelling		Middenberm	Middenberm	Middenberm	Middenberm
Masthoogte	<input type="checkbox"/> Instelling...	18.00	18.00	18.00	18.00
Mastafstand	<input type="checkbox"/> Instelling...	90.00	90.00	90.00	90.00
Overhang	<input type="checkbox"/> Instelling...	0.00	0.00	0.00	0.00
Kantel90	<input type="checkbox"/> Instelling...	5.0	5.0	5.0	5.0
L gem	>=0.75	0.86	0.51	0.68	0.59
L min/gem (L0)	>=0.40	0.51	0.52	0.46	0.47
LI	>=0.60	0.60	0.47	0.46	0.46
TI [%]	<=15.0	8.6	12.9	10.3	11.5
SR		0.79	0.79	0.79	0.79

In basisschema 1 halen we de norm nog steeds en er is duidelijk te zien dat de uitkomsten gelijk zijn aan de uitkomsten welke we hiervoor hebben berekend met $Q_0 = 0,1$. Dit is te verklaren omdat de meetwaarden in de R tabel zijn vermenigvuldigd met $1/Q_0$ en dat is in ons geval 10, In de berekening worden deze waarden weer vermenigvuldigd met 0,1 het resultaat is dus 1. Indien we Q_0 instellen op 0,06 dan wordt de waarde in de R-tabel vermenigvuldigd met $1/Q_0 = 16,66$ en vermenigvuldigd met $Q_0 0,06$ is dit weer 1.

Om de invloed van Q_0 in basisschema 1 te bekijken doen we niets aan de tabel maar we veranderen wel de waarde in ons berekeningspakket van 0.06 naar 0.02. We zien nu dat alleen de gemiddelde luminantie (L_{gem}) omlaag gaat maar de gelijkmatigheden in de berekening gelijk blijven. Dit betekent dat het aanpassen van de Q_0 van 0,1 naar 0,06 of nog lager naar 0.02 invloed heeft op de gemiddelde luminantie maar geen invloed heeft op de gelijkmatigheid.

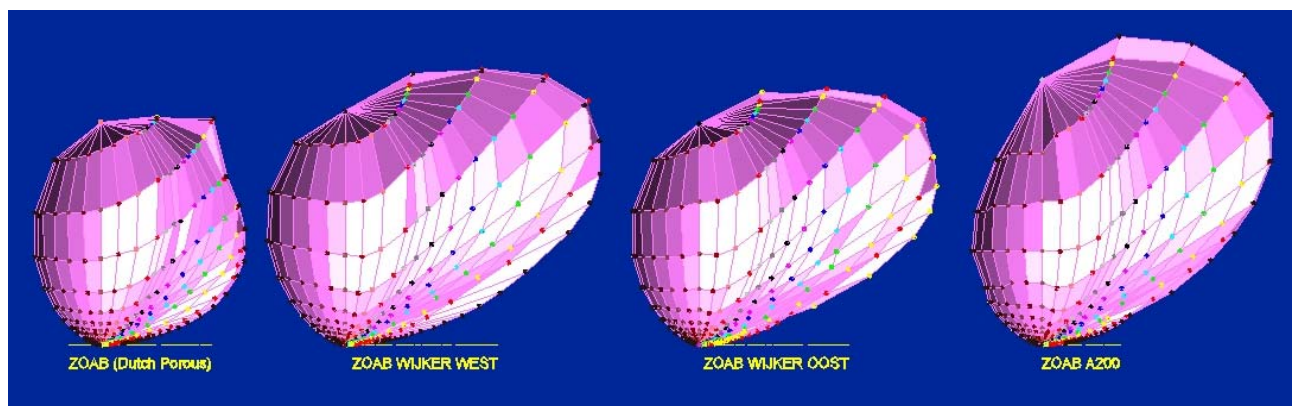
In basisschema 2 t/m 4 is duidelijk dat onze metingen voor ZOAB andere gelijkmatigheden laten zien dan bij de tot op heden gebruikte tabel voor ZOAB. Het is zeker verontrustend dat we de langsgelijkmatigheid van 0,6 in alle overige berekeningen niet halen. Wat opvalt dat de langsgelijkmatigheid van de nieuwe R-tabel zich in de buurt van 0,46 beweegt. Het verdient aanbeveling de huidige R-tabel te vervangen door een nieuwe R-tabel die dichter bij de werkelijkheid ligt.

Visualisatie en de resultaten van de R-tabellen van ZOAB

Om aan te tonen dat de vorm van de gemeten tabellen afwijken van de vorm van de bestaande ZOAB tabel geven we hieronder een aantal visualisaties van de resultaten waarbij we de tabellen hebben verschaalt naar $Q_0=1$.



Bovenaanzicht van de gevisualiseerde reflectietabellen.



Zijaanzicht van de visualisatie van de reflectie tabellen.

Meetwaarden die zijn opgebouwd uit 50 metingen per meetlocatie.

Meetpunten	ZOAB (Dutch Porous)	ZOAB Wijker West	ZOAB Wijker Oost	ZOAB A200
Loodrecht	530	325	354	331
Punt 2 (0° vlak)	555	388	417	397
Punt 3 (0° vlak)	602	426	446	420
Punt 4 (0° vlak)	468	471	496	407
Punt 5 (0° vlak)	414	427	458	319
Punt 6 (0° vlak)	322	271	295	168
Punt 7 (90° vlak)	177	106	121	109
Punt 8 (90° vlak)	88	52	60	49
Gemiddelde afwijking (%)	0	-24	-17	-33

Duidelijk is te zien dat ZOAB (Dutch Porous) het meeste reflecteert en de A200 het minste. De gemiddelde afwijking ten opzicht van de huidige meetwaarde is erg hoog.

Literatuuropgave

- Anon. (1979). 16. Generalkonferenz für Mass und Gewicht. Paris 1979 (citaat: Hentschel, 1994, p. 37).
- De Boer, J.B. (ed). (1967). Public lighting. Eindhoven, Centrex, 1967.
- CIE (1976). Glare and uniformity in road lighting installations. Publication no 31, Paris, CIE, 1976.
- CIE (1984). Road surfaces and lighting. Joint CIE/PIARC publication. Publication No. 66. Paris, CIE, 1984.
- CIE (1990). Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting. Publication No. 30/2. CIE, Paris, 1982 (reprinted 1990).
- CIE (1991). Proceedings 22th Session, Melbourne, Australia, July 1991. Publication No. 91. Paris, 1992.
- CIE (1995). Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Publication No. 115. Vienna, CIE, 1995.
- CIE (2000). Road lighting calculations. Publ. No. 140. Vienna, CIE, 2000.
- CIE (2001). Road surface and road marking reflection characteristics. Publication No. 144. Vienna, CIE, 2001.
- Erbay, A. (1973). Verfahren zur Kennzeichnung der Reflexionseigenschaften von Fahrbahndecken. Dissertation Technische Universität Berlin, 1973.
- Erbay, A. (1974). Atlas voor de reflectie-eigenschappen van wegdekken. Gepubliceerd door de Technische Universiteit Berlijn, 1974.
- Erbay, A. & Stolzenberg, K. (1975). Reflexionsdaten von allen praktisch vorkommenden trockenen Fahrbahnbelägen. Lichttechnik 27 (1975) 58 - 61.
- Helbig, E. (1972). Grundlagen der Lichtmesstechnik. Leipzig, Geist & Portig, 1972.
- Hentschel, H.J. (1994). Licht und Beleuchtung; Theorie und Praxis der Lichttechnik. 4., neubearbeitete Auflage. Heidelberg, Hüthig Buch Verlag, 1994.
- Keitz, H.A.E. (1967). Lichtmessungen und Lichtberechnungen. 2e. Auflage. Eindhoven, Philips Technische Bibliotheek, 1967.
- Narisada, K. & Schreuder, D.A. (2004). Light pollution handbook. Dordrecht, Springer, 2004.
- NSVV (1990). Aanbevelingen voor openbare verlichting; Deel I. Arnhem, NSVV, 1990.
- NSVV (1993). Aanbevelingen voor openbare verlichting; Deel II, Meten en berekenen. Arnhem, NSVV, 1993.
- NSVV (1997). Aanbevelingen voor openbare verlichting; Deel III, Ontwerpen. Arnhem, NSVV, 1997).
- NSVV (2002). Richtlijnen voor openbare verlichting; Deel 1: Prestatie-eisen. Nederlandse Praktijkrichtlijn 13201-1. Arnhem, NSVV, 2002.
- NSVV (2003). Richtlijnen voor openbare verlichting; Deel 2: Prestatieberekeningen. Nederlandse Praktijkrichtlijn 13201-2. Arnhem, NSVV, 2003,
- NSVV (2003a). Richtlijnen voor openbare verlichting; Deel 3: Methoden voor het meten van de lichtprestaties van installaties. Nederlandse Praktijkrichtlijn 13201-3. Arnhem, NSVV, 2003.
- PIARC (1990). Final report. PIARC, Working Group on Pervious Coated Macadam, Draft, 1 October 1990. Paris, PIARC, 1990.
- Schreuder, D.A. (1967). Theoretical basis of road-lighting design. Chapter 3 in: De Boer, ed., 1967.
- Schreuder, D.A. (1967a). Measurements. Chapter 8 in: De Boer, ed., 1967.
- Schreuder, D.A. (1990). Sociale en kwaliteitsaspecten van nachtwerk. Leidschendam, SWOV, 10 oktober 1990 (Niet gepubliceerd).

- NPR 13201-1 Openbare verlichting kwaliteitscriteria (mei 2002)
- NSVV (2002). Richtlijnen voor openbare verlichting; Deel 1: Prestatie-eisen (Guidelines for public lighting; Part 1: Quality requirements). Nederlandse Praktijkrichtlijn 13201-1. Arnhem, NSVV, 2002.
- ROA (1990). Richtlijnen bij het ontwerpen van autosnelwegen (ROA). Rotterdam, Rijkswaterstaat, 1990.
- RONA (1990). Richtlijnen bij het ontwerpen van niet-autosnelwegen (RONA). Rotterdam, Rijkswaterstaat, 1990.
- Tetteroo, J. (2004). Reflectie van wegdekken. Interimrapportage.
- Schreuder, D.A. (1991). A device to measure road reflection in situ. In: CIE (1991).
- Schreuder, D.A. (1992). Meting van de reflectie-eigenschappen van wegdekken ten dienste van het energetisch optimaliseren van openbare verlichting. Leidschendam, Duco Schreuder Consultancies, 1992.
- Schreuder, D.A. (1996). Openbare verlichting voor verkeer en veiligheid. Deventer, Kluwer Techniek, 1996.
- SCW (1974). Wegverlichting en oppervlaktetextuur. Mededeling No. 34. Stichting Studie Centrum Wegenbouw SCW, Arnhem, 1974.
- SCW (1977). International Symposium on Porous Asphalt. S.C.W. Record 2. Arnhem, SCW, 1977.
- SCW (1984). Lichtreflectie van wegdekken. Mededeling 53. Stichting Studie Centrum Wegenbouw SCW, Arnhem, 1984.
- Van Bommel, W.J.M. & De Boer, J.B. (1980). Road lighting. Deventer, Kluwer, 1980. verwijzingen
- Westermann, H.-O. (1963). Reflexionskennwerte von Straßenbelägen. Lichttechnik 15 (1963) 507-510.
- Westermann, H.-O. (1964). Das Reflexionsverhalten bituminöser Straßendecken im Zusammenhang mit der Griffigkeit. Straße u. Tiefbau 18 (1964) 290-295.