

RIVM-rapport 607343001/2009

Leds of conventionele openbare verlichting? Energie-efficiëntie en milieueffecten vergeleken

J. Struijs
H.A. den Hollander
J.W.A.M. Alferdinck, TNO Defensie en Veiligheid
N.J. de Kruijter, De Kruijter Openbare Verlichting
J.P. van Hoek, De Kruijter Openbare Verlichting

Contact:
J. Struijs
Laboratorium voor Ecologische Risicobeoordeling
jaap.struijs@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van VROM/DGM/Directie Klimaat & Luchtkwaliteit, in het kader van project M/607343/09/OV

© RIVM 2009

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

Rapport in het kort

Leds of conventionele openbare verlichting?

Energie-efficiëntie en milieueffecten vergeleken

Straatverlichting met energie-efficiënte leds (licht emitterende dioden) kan helpen om het energieverbruik in Nederland te verminderen. De beperkingen van deze relatief nieuwe technologie moeten nog wel nader worden onderzocht. Dit blijkt uit onderzoek van het RIVM, waarin het gebruik van leds binnen de bebouwde kom is vergeleken met conventionele compacte fluorescentielichtbronnen en hogedruk natriumlampen. Om aan de Kyoto-doelstellingen te kunnen voldoen, werkt de Nederlandse overheid onder andere aan energiezuiniger verlichting.

Straatverlichting is belangrijk voor de verkeersveiligheid, sociale veiligheid en leefbaarheid. Om deze functies te kunnen vervullen, moet openbare verlichting aan eisen voldoen, bijvoorbeeld op het gebied van lichtsterkte. Ten opzichte van compacte fluorescentielampen, die vanwege hun warmwitte licht in woonwijken worden gebruikt, verbruiken leds 15 tot 27 procent minder energie. Vergeleken met hogedruk natriumlampen verbruiken leds juist meer. Aangezien leds sterk in ontwikkeling zijn, is de verwachting dat dit spoedig verbetert.

De efficiency van leds zou aanzienlijk verbeteren als er meer rekening wordt gehouden met de kleurgevoeligheid van het oog. Momenteel vindt discussie plaats over de richtlijnen voor openbare verlichting waarin dit tot nu toe niet is meegenomen. Bij daglicht is het oog namelijk optimaal gevoelig voor groen en geel licht, maar in het donker meer voor blauw en groen licht. Aangezien van groen en blauw licht minder nodig is voor voldoende zicht in het donker, is het energiezuiniger. De keerzijde is dat mensen deze lichtkleur niet altijd als prettig ervaren. Daarnaast vergt wisseling tussen groengele en blauwgroene lichtbronnen een aanpassing van de ogen die enkele minuten tijd kost. Gedurende deze tijd is het gezichtsvermogen beperkt.

Trefwoorden:

openbare verlichting, LCA, led, energiebesparing, OVL

Abstract

Leds or conventional public lighting?

A comparative exercise on energy efficiency and environmental impacts

Public lighting with energy efficient leds (light emitting diodes) may help to reduce energy consumption in the Netherlands. The limitations of this new technique need however further research. In this report luminaries based on led technology are compared with luminaries with conventional compact fluorescent lamps and high pressure sodium lamps. In order to meet the Kyoto protocol the Dutch government stimulates the use of more energy efficient lighting.

Public lighting serves traffic safety, social safety and livability. In order to fulfill these services, several demands are put on public lighting, for example illuminance should be sufficient. With respect to compact fluorescent lamps, which are favorable in residential areas because of the warm white light, the led alternative requires 15 to 27 percent less energy. Compared to high pressure sodium lamps however, leds need more energy. Because of the fast development it is expected that leds will perform better in near future.

The efficiency of leds would improve considerably if the spectral sensitivity of the eye is taken into account. Currently, the guidelines for public lighting are a matter of debate because the spectral sensitivity of the eye is ignored.

In daylight the eye has an optimal sensitivity for green-yellow light but at low light levels for blue-green. As less blue-green is required for sufficient visibility, it is more energy efficient. The drawback is that people do not appreciate this light colour as comfortable. Moreover, switching between green-yellow and blue-green light sources requires few minutes of adaptation time. During this period of time, the eyesight is limited.

Key words:

public lighting, outdoor lighting, LCA, energy efficiency, led

Inhoud

Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Materiaal en methoden	15
2.1 Armaturen	15
2.2 Verlichtingsontwerpen (profielen)	16
2.3 De functionele eenheid	16
2.4 Inventarisatie	18
2.4.1 Verbruik van elektrische energie	18
2.4.2 Materiaal input	18
2.5 Impact assessment	19
2.5.1 Midpoint indicatoren	19
2.5.2 CED	19
2.6 Correctie voor mesopische zicht	20
3 Resultaten	23
3.1 Verbruik van elektrische energie	23
3.1.1 Nominaal	23
3.1.2 Gecorrigeerd voor mesopisch zicht	24
3.2 LCA	26
3.2.1 CED	26
3.2.2 Milieu	27
4 Discussie en conclusies	29
4.1 Profielen en richtlijnen	29
4.2 Onzekerheid materiaalverbruik	30
4.3 Invloed van levensduur van leds	30
4.4 Mesopisch zien en OVL	31
4.5 De <i>stand alone</i> -verlichting	32
4.6 Conclusies en aanbevelingen	32
Literatuur	35
Annex 1 Armaturen en effectiviteitsfactoren	37
Annex 2 Lichtontwerpen of profielen	39
Annex 3 Life Cycle Impact Assessment	47
Annex 4 Mesopisch zicht en effectiviteitsfactoren	51

Samenvatting

Vanwege de verwachte energiebesparing staan led-armaturen toegepast in openbare verlichting (OVL) volop in de belangstelling. Ondanks het feit dat deze technologie nog een verdere ontwikkeling zal doormaken, was er behoefte aan een vergelijkend onderzoek. Conventionele compacte fluorescentie-armaturen, en hogedruk natriumlampen, toegepast voor het verlichten van de openbare ruimte in stedelijk gebied, werden vergeleken met het led-alternatief. Voor deze vergelijking werd een levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd op functionele verlichting van 1) een woonstraat, 2) een erftoegangsweg, 3) een gebiedsontsluitingsweg, 4) een fietspad en 5) een bedrijventerrein. Voor de in Nederland veel voorkomende wegprofielen werden conform de richtlijn NPR13201-1 en het Politiekeurmerk Veilig Wonen[®] lichtniveaus gehanteerd met als doel de functionele eenheid te kunnen definiëren.

Op basis van het door de fabrikanten opgegeven lampvermogen werd berekend dat led-armaturen het elektriciteitsverbruik met 15 tot 27 % verlagen ten opzichte van de conventionele kwikhoudende compacte fluorescentielampen. De besparing is echter wel sterk afhankelijk van het ledsysteem omdat de verschillen tussen leds groot zijn. Ten opzichte van armaturen met hoge druk natriumlampen is de reductie echter *negatief*, ofwel leds gebruiken meer energie. In de levenscyclus domineert de gebruiksfase: het verbruik van elektrische energie veroorzaakt de grootste milieubelasting. Verschillen in milieudruk (onttrekking grondstoffen en emissies) volgen daardoor het patroon van de verschillen in energieverbruik. Zo blijkt de gemiddelde emissiereductie van broeikasgassen te variëren tussen 14 en 23 %. Er bestaan twijfels over de terugval in lichtsterkte gedurende de levensduur en de discrepantie tussen de opgegeven en feitelijke lichtsterkte van leds en over de vraag of het publiek zich bij de kwaliteit van het ledlicht wel veilig en prettig voelt.

Er is een technisch-wetenschappelijke discussie gaande over normen en richtlijnen voor OVL. Deze houden geen rekening met de veranderde lichtgevoeligheid van het oog bij het lage (mesopische) lichtniveau. Dit is het niveau waarbij openbare verlichting nodig is. Het effect van een verschuiving van de spectrale gevoeligheid naar kortere golflengten werd nagegaan om rekening te kunnen houden met omstandigheden die voor OVL relevant zijn. De consequentie daarvan is dat voor verlichting van de openbare ruimte door middel van leds minder energie nodig is, afhankelijk van de lichtkleur. Het led-alternatief zou dan meer milieuwinst opleveren dan zonder die mesopische correctie. De resultaten zijn echter uitsluitend bedoeld als een oriëntatie. De milieuwinst staat ter discussie omdat de correctie waarschijnlijk alleen geldt voor de perifere gezichtsvelddelen. Ook is het niet duidelijk of toepassing van lichtkleuren die voor het mesopische effect het meest gunstig zijn (blauw-wit of groen), wel acceptabel zijn voor het publiek. De relatief lange adaptatietijd (3-5 minuten) bij het onvermijdelijke wisselen van het hogere (fotopische) naar het lage (mesopische) lichtniveau is eveneens een beperkende factor. In stedelijk gebied is een goed functionerende openbare verlichting van belang, waar mensen zich prettig bij voelen (sociale veiligheid). Vanwege deze twijfels werd de mesopische correctie buiten de LCA gehouden.

1 Inleiding

Voor verlichting wordt wereldwijd jaarlijks 2000 TWh aan elektrische energie verbruikt wat gepaard gaat met de uitstoot van $900 \cdot 10^6$ tn CO₂. Verlichting heeft 15 tot 20 % van de totale elektriciteitsproductie nodig. Het overgrote deel daarvan gaat naar utiliteitsbouw en woonhuizen. In Nederland gaat ongeveer 1,5 % van de geproduceerde elektrische energie naar openbare verlichting (OVL). De groei van het energieverbruik door OVL wordt geschat op 2% per jaar omdat de OVL-installatie gemiddeld met 2 % per jaar groeit (Nuijten en Verburg, 2007). De inzet van energiezuiniger lampen is nodig om aan de Kyoto-doelstellingen te kunnen voldoen.

Led-verlichting maakt een snelle ontwikkeling door. Een belangrijke drijfveer is de aan leds toegedichte energiebesparing. Uit Tabel 1 kan men echter niet afleiden dat op led gebaseerde OVL energiezuiniger is dan conventionele armaturen die gebruikmaken van fluorescentiebuizen (ook toegepast in spaarlampen). De lichtstroom per eenheid elektrisch vermogen is voor de conventionele verlichting met bijvoorbeeld compacte fluorescentie lampen, TC-T (codering voor compactfluorescentielamp met lange buis) en hogedruk natriumlichtbronnen HST (codering voor hogedruk natriumlamp met een tubulaire vorm), vooralsnog gunstiger. Leds hebben echter nog andere eigenschappen, zij produceren bijvoorbeeld weinig strooilicht en daarvan kan gebruikgemaakt worden bij het verlichten van de openbare ruimte en als aan de richtlijnen die voor OVL gelden voldaan wordt dan kan led-verlichting misschien wel energiezuiniger zijn dan conventionele lichtbronnen. De levensduur van leds (> 50.000 uur) wordt eveneens als een groot voordeel gezien.

Tabel 1 Rendementen (lumen per Watt) van conventionele armaturen vergeleken met leds

Waarden voor HST- en TC-T lampen uit SenterNovem/Energiebesparing GWW nieuwsbericht 9-7-2009 over het rapport 'Karakterisatie LED lantaarns' opgesteld door het Van Swinden Laboratorium in opdracht van ARCADIS en SenterNovem volgens opgave fabrikanten (conventioneel) en volgens meting door het Van Swinden Laboratorium (led)

Type	HST	TC-T	led
<i>Efficacy (lm/W)</i>	~ 85	~ 70	35 – 51; 73 (uitschieter)

Van conventionele OVL-systemen is veel bekend ten aanzien van materiaal- en energieverbruik. Dit is minder het geval bij leds, onder andere vanwege onzekerheden over de functie vervulling en levensduur (dat laatste vooral door twijfels in verband met de warmtehuishouding). Tegenvallende prestaties van led-lichtbronnen zouden de milieuwinst die door energiebesparing wordt geboekt, teniet kunnen doen. Een analyse over de gehele levenscyclus zou meer duidelijkheid kunnen verschaffen.

De Directie Klimaat & Luchtkwaliteit van VROM heeft het RIVM opgedragen om deze levenscyclusanalyse (LCA) uit te voeren.

Er vindt thans een technisch-wetenschappelijke discussie plaats over de richtlijnen voor OVL. Deze zouden meer in overeenstemming moeten zijn met de zintuigfysiologische omstandigheden die relevant zijn voor lage lichtniveaus. Een geheel nieuw verlichtingsconcept wordt door een fabrikant gepropageerd waarbij rekening gehouden wordt met de spectrale verschuiving van de gevoeligheidscurve van het menselijke oog. Hierdoor zou een lager lichtniveau nodig zijn om een bepaalde oogtaak uit te voeren. Dit geldt echter slechts voor perifeer waarnemen bij lage scotopische/mesopische lichtniveaus en niet voor gericht waarnemen. Het is nu nog niet duidelijk in hoeverre dit acceptabel gevonden wordt en dat geldt ook voor de gewijzigde lichtkleur van OVL wanneer men optimaal van dit fenomeen wil profiteren om energie te besparen.

Doel van het onderzoek:

- door middel van een LCA de totale milieubelasting van conventionele straatverlichting objectief vergelijken met het led alternatief. Om te voorkomen dat fabricaten met elkaar vergeleken worden, werden de armaturen geanonimiseerd.
- het verdisconteren van het effect van mesopisch zicht in het berekenen van het energieverbruik. Dit valt buiten het kader van een LCA omdat het een nieuwe nog niet algemeen geaccepteerde methodiek betreft (zie Afbakening).
- aanzet om te komen tot een kwaliteitskeurmerk voor led lampen/armaturen voor OVL (dit valt buiten het kader van een LCA).

Afbakening

OVL in bebouwde kom

Er wordt een drietal functies aan OVL toegekend: het ondersteunen van 1) verkeersveiligheid, 2) sociale veiligheid en 3) leefbaarheid. Functies 2) en 3) hebben vooral betrekking op verblijfsgebieden zoals woonwijken, winkel- en stadscentra. Ongeveer 85 % van de 3,2 miljoen OVL lichtpunten in Nederland bevindt zich binnen de bebouwde kom. OVL van provinciale wegen (5 %) en rijkswegen (10 %) valt buiten de verantwoordelijkheid van gemeentelijke autoriteiten. De studie beperkt zich daarom tot de bebouwde kom. Een tweede reden voor deze keuze is gelegen in het feit dat bij aanvang van dit onderzoek led-verlichting nog weinig toepassingen kende voor verkeerswegen binnen en buiten de bebouwde kom. Conventionele openbare verlichting in een vijftal verkeerssituaties binnen de bebouwde kom wordt vergeleken met het led-alternatief. Bij twee van de vijf onderzochte wegtypen is het belang van de verkeersveiligheid groter dan de sociale veiligheid en leefbaarheid.

Conventionele lampen

Een andere afbakening is gelegen in de keuze van de conventionele lampen. Het uitgangspunt voor dit onderzoek is dat moderne breed toegepaste lamptypes worden ingezet. Er zijn al jaren diverse HST-lampen met hogere vermogens en met een betere efficiency. Ook zijn er sinds enkele jaren moderne keramische metaalhalogeenlampen (HIT-CE) met een verbeterd rendement ten opzichte van hogedruk natrium lampen. Deze zijn niet meegenomen in het onderzoek omdat er nog onvoldoende led verlichting voorhanden is voor een goede onderlinge vergelijking. Naar huidig inzicht wordt bij voorkeur geen lage druk natriumverlichting meer toegepast in de bebouwde omgeving vanwege het ontbreken van kleurherkenning, deze lamp is daarom niet meegenomen in dit onderzoek terwijl naar verwachting deze lamp efficiënter is dan welke led op dit moment dan ook. Er zijn moderne TC-lampen met een verlengde levensduur om zo te besparen op onderhoud. Naar verwachting hebben deze long-life lampen een hogere energie efficiency.

Lichttechniek

Op het gebied van de lichttechniek zijn nog vele verschillen tussen conventionele en led-verlichting. Bij led-verlichting is soms een hogere mate van verblinding mogelijk en worden uit oogpunt van efficiency vaak hoge afwijkende kleurtemperaturen toegepast tot wel 6000 K. Eventuele verblinding en de mate van gezichtsherkenning, uitgedrukt in de semicilindrische verlichtingssterkte, werden niet onderzocht. Hiervoor bestaan in de NPR (2002) nog geen richtlijnen. Ook zijn er indicaties dat het elektrische gedrag van leds nog niet optimaal is. Onlangs werd over een slechte arbeidsfactor (cosinus ϕ /power factor), aanwezigheid van ongewenste hogere harmonische signalen (Total Harmonic Distortion THD), inschakelpieken en veranderend gedrag bij schommelingen in temperatuur en voedingspanning gerapporteerd. Naar enkele genoemde parameters is onderzoek verricht door het Dutch Metrology Institute VSL te Delft ('Karakterisatie LED lantaarns' 16 juni 2009 rapportnummer CAM-09-06). Deze factoren kunnen bijdragen aan het verminderen van de efficiency en nog belangrijker, de verminderde acceptatie van bijvoorbeeld gebruikers en netbeheerders.

Mechanische en constructieve eigenschappen, zoals dichtheidsklasse Ingress Protection (IP-waarde) of slagvastheid (IK-klasse) werden buiten beschouwing gelaten. Het behandelen van al deze lichttechnische, elektrische en mechanische factoren valt buiten het bereik van dit onderzoek. Voor het bepalen van de milieubelasting werden deze verschillen niet meegenomen voor zover zij het energieverbruik niet beïnvloeden.

Dimmen

Om energie te besparen wordt ook vaak verwezen naar het dimmen van de verlichting. In dit onderzoek worden de lichtniveaus van de Nederlandse Praktijk Richtlijn (2002) gehanteerd. Wanneer een beheerder van verlichting dit wenselijk acht kan zowel led-verlichting als conventionele verlichting worden gedimd. Naar verwachting zal het rendement bij led iets hoger liggen omdat bij conventionele verlichting de energieafname niet evenredig verloopt met de lichtterugloop (voorbeeld: 50% minder licht geeft circa 40% minder energiegebruik). Voor dit energieonderzoek is dit buiten beschouwing gelaten.

Landelijk onderzoek Led-pilots

De resultaten van het landelijk praktijkonderzoek naar led-verlichting in de openbare ruimte bij een dertigtal gemeenten, geïnitieerd door Taskforce Openbare verlichting en gecoördineerd door Senter Novem, waren op het moment van verschijnen van dit rapport nog niet voorhanden.

Systeemgrenzen

In principe worden alle processen in de levenscyclus beschouwd. Kapitaalgoederen (fabricage van vrachtwagens, installaties voor gieten, spuiten et cetera) werden in de analyse niet meegenomen omdat direct al duidelijk was dat de bijdrage aan de milieudruk tijdens de productiefase veel kleiner is dan gedurende de gebruiksfase. Financiële aspecten die bij de keuze tussen conventionele en led-lichtbronnen een rol kunnen spelen (Total Cost of Ownership), vallen buiten een LCA. Dat geldt ook voor het welbevinden van de mens op straat wanneer dit niet in kwantitatieve termen - op basis van richtlijnen of op basis van resultaten van *pilo* studies - kan worden geformuleerd in de functionele eenheid.

Midpoint indicatoren

De analyse werd op het zogenaamde *midpoint niveau* uitgevoerd. Milieueffecten werden per milieuthema uitgedrukt in equivalenten. Voor het milieuthema broeikas effect werden bijvoorbeeld de emissies van alle broeikasgassen geaggregeerd tot CO₂-equivalenten. *Endpoint*-indicatoren zoals verlies aan biodiversiteit en gezondheidsschade werden niet berekend.

Richtlijnen voor OVL

De berekeningen van deze ketenanalyse zijn gebaseerd op verlichtingsontwerpen die in overeenstemming zijn met de Nederlandse Praktijk Richtlijn voor openbare verlichting (CEN, 2003, 2004) en het Politiekeurmerk Veilig Wonen[®].

Externe expertise

De Kruijter Openbare Verlichting stelde de verlichtingsontwerpen (profielen voor deze openbare ruimtes) op voor tientallen armaturen. TNO voerde de modelberekeningen voor mesopische fotometrie uit waarmee correctiefactoren berekend konden worden.

2 Materiaal en methoden

De vergelijkingsbasis van een levenscyclusanalyse (LCA) is de functionele eenheid (FE). Voor deze LCA dient de FE gebaseerd te zijn op verlichtingsontwerpen (profielen) volgens geaccepteerde richtlijnen. De armatuur is slechts een onderdeel van de FE. Het doel is immers om voor een aantal gespecificeerde verkeerssituaties openbare verlichting door middel van conventionele armaturen te vergelijken met een overeenkomstige functionaliteit gebaseerd op het led-alternatief. Om vergelijking tussen verschillende fabricaten te voorkomen, werden de geselecteerde armaturen geanonimiseerd. Uitsluitend het armatuurtype en het vermogen van de lamp worden vermeld evenals de afstanden tussen de lichtpunten en masthoogten die uit de verlichtingsontwerpen volgen.

2.1 Armaturen

De conventionele armaturen in dit onderzoek zijn van het type TC-L (compacte fluorescentielampen, lage druk kwik), HST (hoge druk natrium). De keuze is voor een belangrijk deel het gevolg van de vijf straattypen die voor deze studie werden gekozen. Andere conventionele lichtbronnen, bijvoorbeeld van het type keramisch metaalhalogeen en lage druk natrium, hadden voor andere verblijfsgebieden gekozen kunnen worden. De led-armaturen werden geselecteerd op grond van de informatie die begin 2009 beschikbaar was. Tabel 2 geeft een overzicht van de fabrikanten en het aantal onderzochte armaturen. Er werden 16 TC-L-armaturen, 11 HST-armaturen en 18 led-armaturen in het onderzoek betrokken.

Tabel 2 Aantal verschillende armaturen van diverse fabrikanten in dit onderzoek betrokken

fabrikant	TC-T	HST	led
Philips	5	4	3
Indal Industria	5	4	4
Schröder	3	3	2
Lightronics	3		
Innolumis Lemnis			2
Ruud Lighting			4
Lioris			3

Op twee na zijn alle led-armaturen gebaseerd op blauwe leds in combinatie met een fluorescerende laag. Er werden op basis van 27 verschillende conventionele armaturen (4 verschillende fabrikanten) 32 lichtontwerpen opgesteld (5 TC-T-armaturen komen voor in 2 verschillende profielen). Evenzo werden op basis van 18 verschillende led-armaturen (6 fabrikanten), 25 led-profielen ontworpen. Dus 7 led-armaturen komen in 2 verschillende profielen voor. Tabellen A1 en A2 (Annex 1) geven een overzicht van de fabricaten.

2.2 Verlichtingsontwerpen (profielen)

In verblijfsgebieden voor voetgangers en op fietspaden is het herkennen van medeweggebruikers binnen een zekere afstand belangrijk. Om andere verkeersdeelnemers waar te nemen heeft de weggebruiker naar alle zijden goed zicht nodig. Ook voor het lezen van straatnamen en huisnummers is een goede lichtverdeling essentieel. De maat voor deze verlichtingsfunctie is de hoeveelheid licht die op een oppervlakte valt ofwel de horizontale verlichtingssterkte (E_h , eenheid lux). De lux (lx) komt overeen met de verlichtingssterkte die men heeft wanneer een vierkante meter van het beschouwde oppervlak een lichtstroom van één lumen (lm) ontvangt.

Maat voor verlichting in verblijfsgebieden:

Gemiddelde horizontale verlichtingssterkte $E_{h_{gem}}$ in lux (lx) is quotiënt van de lichtstroom $\Delta\Phi$ (in lumen) en het oppervlak waarop het licht valt ΔA (in vierkante meters)

Gelijkmatigheid (U_h) is een verhoudingsgetal voor lichte en donkere vlekken en wordt berekend als het quotiënt van de minimale horizontale verlichtingssterkte en gemiddelde horizontale verlichtingssterkte: $U_h = E_{h_{min}}/E_{h_{gem}}$

De lichtontwerpen werden opgesteld op basis van de verlichtingsklassen ME4a, S4, S5, en S6 van de Nederlandse Praktijk Richtlijn voor openbare verlichting (NPR, 2002; CEN, 2003, 2004) en het Politiekeurmerk Veilig Wonen®. De richtlijnen stellen eisen aan de gemiddelde horizontale verlichtingssterkte en de gelijkmatigheid ervan (lx). Karakteristieken van de hier geanalyseerde openbare wegen worden samengevat in Tabel 3 en beschreven in Annex 2. Het betreft hypothetische wegen die men in stedelijk gebied in Nederland zou kunnen aantreffen en met een verlichtingsontwerp dat gebaseerd is op de huidige technologie. Het uitgangspunt: een volledig nieuwe installatie waarbij de lichttechnische variabelen zo gunstig mogelijk kunnen worden gedimensioneerd. In vergelijking met renovatieprojecten kunnen werkelijke omstandigheden leiden tot een minder ideaal resultaat, bijvoorbeeld: hinder door openbaar groen, beperking in mastafstanden et cetera. Bij renovatieprojecten zal naar verwachting de besparing minder zijn.

De horizontale verlichtingssterkte is nooit uniform verdeeld over het wegoppervlak. Belangrijk is de gelijkmatigheid van de verlichting (U_h) die wordt gekarakteriseerd door het quotiënt van de laagste verlichtingssterkte, $E_{h_{min}}$ en de gemiddelde horizontale verlichtingssterkte, $E_{h_{gem}}$. Bij een gegeven wegbreedte en lichtstroom kunnen de hoogte van het lichtpunt, de afstand tussen de lichtpunten en het soort armatuur en type lichtbron gekozen worden om aan deze verlichtingseisen te voldoen.

2.3 De functionele eenheid

Bij levenscyclusanalyse spreekt men van een productsysteem dat getalsmatig (met een geschikte eenheid) gedefinieerd dient te worden als functionele eenheid (FE). De functievervulling van het productsysteem OVL wordt gedefinieerd op basis van een verlichtingsontwerp van een gekozen openbare weg voor een bepaalde armatuur. De FE is als volgt gedefinieerd:

'het functioneel verlichten van een nader te specificeren openbare weg (bijvoorbeeld een woonstraat, straat of fietspad) over 100 m lengte binnen de bebouwde kom gedurende 20 jaar'.

Het begrip functioneel verlichten is afgeleid van de verlichtingsontwerpen en impliceert verbruik van elektrische energie gedurende 4100 uur per jaar. Tijdens de gebruiksfase is de lichtafname aan een criterium gebonden. Bij een lichtopbrengst van minder dan 85 % wordt de lamp vervangen; in de praktijk van conventionele verlichting is dat doorgaans 4 jaar (Tabel 5).

Tabel 3 Kenmerken van openbare wegen binnen de bebouwde kom

Stedelijk gebied	Sociale veiligheid	Verkeersveiligheid	Leefbaarheid	Klasse	Ehgem	Uh
Woonstraat	xxx	xx	xxx	S5/S6	3 lx/2 lx	0,2/0,3
Erftoegangsweg	xx	xxx	x	S4	5 lx	0,2
Gebiedsontsluitingsweg	x	xxx		ME4a	7,5 lx	0,2
Fietspad	xxx	x	xxx	S5/S6	3 lx/2 lx	0,2/0,3
Industrieterrein	xx	x	xx	S4	5 lx	0,2

Verklaring: "leeg" = onbelangrijk, x = van belang, xx = belangrijk, xxx = zeer belangrijk

Door middel van de functionele eenheid FE_i voor wegtype i wordt een aantal conventionele armaturen ($C_{i,j}$) vergeleken met een aantal led-armaturen ($L_{i,j}$). De resultaten van de analyse worden als gemiddelde gepresenteerd omdat het doel van de studie niet is om individuele armaturen met elkaar te vergelijken maar om een algemene uitspraak te kunnen doen in hoeverre led een milieuvoordeel oplevert bij wegtype i . Op basis van gemiddelde waarden werden verbruik van elektrische energie en milieurelevante indicatoren uitgerekend zoals energie-input, verbruik van grondstoffen en emissies.

Functionele eenheid vereist keuzes maken

Bij het opstellen van een functionele eenheid moeten om het aantal modelvariabelen beperkt te houden, keuzes worden gemaakt. Zo zijn in dit onderzoek de invloed van de voorschakelapparatuur bij TC-T- en HST-lampen en de drivers bij leds niet meegenomen. Het voorlopen of najlen van spanning op de stroom (inductief of reactief gedrag weergegeven als $\cos \phi$) van de armaturen is niet verrekend evenmin als het optreden van eventuele hogere harmonischen (THD).

In Tabel 4 wordt per straattypen het aantal armaturen groepsgewijs samengevat. Soms komt een bepaalde armatuur twee keer voor, bijvoorbeeld wanneer een bepaald fabricaat zowel in een woonstraat ($i = 1$) als een fietspad ($i = 4$) wordt toegepast maar omdat de afstanden tussen de lichtpunten doorgaans verschillen, kunnen identieke armaturen verschillende uitkomsten geven. Niet de armatuur maar de functionele eenheid dient als vergelijkingsbasis. De afzonderlijke profielen worden gekarakteriseerd door Tabellen A3 en A4 van Annex 2.

Tabel 4 Aantal en type armaturen en ranges van lichtpuntafstanden bij de verschillende verlichtingsontwerpen. Voorbeeld van notatie: de 5 conventionele armaturen voor de woonstraat ($i = 1$) worden in Tabel A3 van Annex 2 gegeven als $C_{1,1} \dots C_{1,5}$

i	Stedelijk gebied	$C_{i,j}$	$L_{i,j}$
1	Woonstraat	5 TC-T (24 W), 22 - 27 m	7 leds (14 - 32 W), 22 - 32 m
2	Erftoegangsweg	5 TC-T(55 W), 26 - 32 m	5 leds (52 - 69 W), 30 - 49 m
3	Gebiedsontsluitingsweg	6 HST (70 W), 27 - 36 m	2 leds (70 - 79 W), 23 - 35 m
4	Fietspad	6 TC-T (24 W), 27 -31 m	6 leds (14 - 32 W), 26 - 35 m
5	Industrieterrein	5 HST(69,5 W), 40 - 47 m 5 TC-T (55 W), 28 - 34 m	5 leds (52 - 69 W), 32 - 48 m

Het verlichtingsontwerp hangt niet alleen af van het type openbare weg (i) maar ook van het fabricaat. Ieder verlichtingsontwerp is zodanig dat de masten, volgens de specificaties van de fabrikant (bijvoorbeeld wat betreft lichtpunthoogte) op een maximale afstand van elkaar zijn geplaatst waardoor het energieverbruik minimaal is terwijl nog net aan de norm wordt voldaan.

2.4 Inventarisatie

De inventarisatie omvat drie onderdelen. In volgorde van relevantie zijn dat verbruik van elektrische energie, materiaalverbruik en de energie die nodig is voor onderhoud en vervanging van lampen en armaturen.

2.4.1 Verbruik van elektrische energie

Het verbruik van elektrische energie werd berekend uit het systeemvermogen (lampvermogen vermeerderd met het vermogen van het voorschakelapparaat) en het aantal branduren per functionele eenheid.

Het (nominale) verbruik van elektrische energie werd op basis van verlichtingsklassen ME4a, S4, S5, en S6 van de Nederlandse Praktijk Richtlijn uitgerekend (NPR, 2002). Tevens wordt het (meestal lagere) verbruik van elektrische energie berekend na correctie voor mesopisch zicht. Deze correctie leidt tot een lumenreductie die gelijk is aan de reductie (of verhoging bij HST) van de verbruikte elektrische energie volgens evenredigheidsfactoren (de zogenaamde effectiviteitsfactor, f , zie ook paragraaf 2.6) die in de Tabellen A1 en A2 van Annex 1 worden weergegeven.

2.4.2 Materiaal input

Tabel 5 geeft een aantal parameters nodig voor het kwantificeren van emissies over de gehele levenscyclus. Voor onderhoud en vervanging van armaturen verbruikt een hoogwerker dieselolie. Aangenomen werd dat per dag met een hoogwerker 50 armaturen vervangen en 100 gereinigd kunnen worden wanneer de masten 4 meter hoog zijn. Masten van 6 meter of hoger zijn gemakkelijker bereikbaar waardoor de capaciteit respectievelijk, 60 en 120 is. Verder werd aangenomen dat de hoogwerker op een dag circa 100 liter dieselolie verbruikt. De armaturen worden gereinigd met een frequentie van eens per 4 jaar. Omdat de conventionele lamp na ongeveer 4 jaar een lichtterugval naar het niveau van 85 % heeft, valt reiniging hier samen met vervanging van de lamp. De acceptabele lichtterugval factor wordt gesteld op 85 %. Er zijn sinds kort sterke aanwijzingen dat leds een hogere terugvalfactor hebben bij 50.000 branduren. Dit is echter sterk type afhankelijk. Led-armaturen worden over een periode van 12 jaar 2 tot 3 keer gereinigd en één keer vervangen. Er is echter onzekerheid over de bedrijfsduur van een led-armatuur. In Tabel 5 wordt een levensduur van 12 jaar aangegeven, overeenkomend met circa 50.000 uur. Dit wordt geclaimd als een belangrijk voordeel van led-armaturen ten opzichte van conventionele armaturen. Er bestaan echter twijfels over deze claims en daarom werd de analyse ook uitgevoerd voor 4, 8, 12 en 16 jaar.

Conventionele armaturen hebben in de praktijk een levensduur van 15-30 jaar afhankelijk van het beleid van de eigenaar. Gemiddeld genomen wordt 20 jaar gehanteerd. Er zijn echter aanwijzingen dat moderne elektronische voorschakelapparaten een lagere levensverwachting hebben en daarom is veiligheidshalve een levensduur van 15 jaar aangehouden. Zo wordt ook door enkele led fabrikanten een hogere levensduur gepropageerd. Vanwege de beperkte ervaring met led is in dit onderzoek een voorzichtige aanname gedaan van 50.000 branduren.

De materiaalsamenstelling van de armaturen werd bepaald op basis van informatie verkregen door de fabrikanten. Over het algemeen was deze informatie onvoldoende en daarom werd door middel van disassemblage en weging een schatting gemaakt (zie Tabellen A7 en A8 in Annex 2).

Tabel 5 Parameters voor de inventory analysis

Parameter	Conventioneel	led
Branduren per jaar (hr)	4.100	
Levensduur lamp (jr)	4	12
Levensduur armatuur (jr)	15	12
Dieselolie hoogwerker voor reiniging armatuur (kg)	-	0,83
Dieselolie hoogwerker voor vervanging lamp en reinigen armatuur (kg)	1,65 (lamp)	1,65 (armatuur)
Levensduur mast (jr)	30	
Gewicht mast (hoogte is 4, 5, 7,5 of 8 m)	35, 45, 80, 91 kg	
Kwik in TC-T (g)	0,01	-

2.5 Impact assessment

De ketenanalyse werd uitgevoerd *zonder* correctie voor mesopisch zicht. De resultaten van de analyse zijn dus terug te voeren op een functionele eenheid, gebaseerd op verlichtingsklassen ME4a, S4, S5, en S6 van de Nederlandse Praktijk Richtlijn (NPR, 2002).

2.5.1 Midpoint indicatoren

De milieueffecten werden als *midpoint*-indicatoren berekend volgens de methodiek CML 2000 (Guinée, 2002). Deze methode wordt internationaal geaccepteerd en is gebaseerd op midpoint-karakterisatiefactoren die relatief robuust zijn.

De interpretatie van midpoint-indicatoren is doorgaans wat lastiger maar dit bezwaar vervalt in een vergelijkende studie wanneer in beide opties ingrepen in het milieu (emissies of onttrekkingen van natuurlijke hulpbronnen) sterk op elkaar lijken. Dat is in deze studie het geval. Kenmerkend voor midpoints is het hanteren van equivalenten zoals "CO2 equivalenten" voor het milieuthema klimaatverandering. De *schade* aan mens en milieu als gevolg van die CO2 uitstoot, uitgedrukt als *endpoint*-indicatoren, is voor dit onderzoek van minder belang. De midpoint impact scores werden berekend met het LCA systeem SimaPro 7.1.

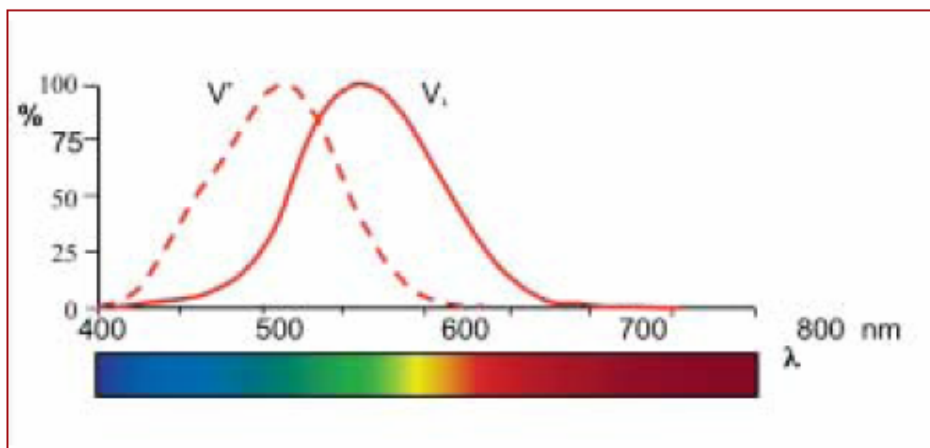
2.5.2 CED

Behalve verschillende midpoint-indicatoren werd ook CED als single issue uitkomst van een LCA berekend. CED is cumulative energy demand in megajoule (MJ), waarin niet alleen het verbruik van elektrische energie tijdens de gebruiksfase is verdisconteerd maar ook de energiebehoefte elders in de keten (winning grondstoffen, transport en bewerking materialen et cetera). CED, ook wel bekend onder de term GER (gross energy requirement), kan voor veel producten en diensten als geschikte indicator dienen (Huijbregts et al., 2006) en dat geldt ook voor het energie-intensieve productsysteem OVL. Met CED (keten) wordt de energiebehoefte over de hele keten aangegeven en met CED (stroom) de energiebehoefte die gerelateerd is aan de productie van elektrische energie (en levering aan het grid). CED (stroom) bestaat uit energie in de vorm van de energiemix voor het betreffende land op basis van niet-hernieuwbare brandstoffen (steenkool, aardgas en uranium), biobrandstoffen en wind en zonne-energie en tevens uit de energie nodig voor de winning en transport van de energiedragers. De verhouding CED (stroom)/CED (keten) geeft een indicatie voor de milieudruk tijdens de gebruiksfase. Behalve CED van één kWh geproduceerd in een gespecificeerd land (hier Nederland), werden tevens de impact scores (als equivalenten) voor alle milieuthema's berekend die uitsluitend het gevolg zijn van

de productie van één kWh. Hieruit kan het relatieve belang van onzekerheid worden afgeleid ten aanzien van bijvoorbeeld de mate waarin metalen gerecycled worden of de levensduur van led-armaturen. CED (stroom) en CED (keten) werden berekend met SimaPro 7.1.

2.6 Correctie voor mesopische zicht

Het effect van de spectrale verdeling van een lichtbron op de beleving van kunstlicht wordt bij het afleiden van de internationale richtlijnen (voor lichtklassen) nog niet verdisconteerd. Deze richtlijnen zijn gebaseerd op de lichtstroom (in lumen) van een lamp, berekend in termen die daarvan afgeleid zijn zoals *verlichtingssterkte* in lux of *helderheid* (luminantie) in candela/m², ongeacht de kleur van het licht. Het menselijk oog is niet voor alle kleuren van het spectrum even gevoelig. Overdag ligt het optimum rondom het groen-gele spectrum (Figuur 1). In de nacht zonder kunstlicht, verschuift het maximum van de ooggevoeligheidskromme naar blauw/groen licht. Bekend is dat bij lage lichtniveaus de kleur van de lichtbron effect heeft op de zichtbaarheid voor het menselijke oog. Het menselijk oog bezit lichtreceptoren achter het netvlies in de vorm van staafjes en kegeltjes. De werking van de kegeltjes (kleurherkenning) is optimaal bij fotopische lichtniveaus (daglicht) met luminanties groter dan enkele cd/m². Bij lagere lichtniveaus zoals het mesopisch niveau (0,035-3,5 cd/m²) of het laagste niveau dat bekend staat als scotopisch (<0,05 cd/m²) is de spectrale gevoeligheid van het oog anders omdat de receptoren voor nachtzien (staafjes) dan een grotere rol spelen. Een fabrikant van led-verlichting produceert lichtbronnen met een groen lichtspectrum om zo door het mesopische effect een maximaal verlichtingsrendement te behalen. De staafjes die van dit effect profiteren bevinden zich echter aan de buitenste rand van ons netvlies zodat uitsluitend het zicht in de periferie van het gezichtsveld verbetert.



Figuur 1. Spectrale ooggevoeligheidskrommen voor het kegelsysteem (fotopisch zicht, gestroefde lijn) en voor het staafjessysteem (scotopisch zicht, gestippellijn)

Luxmeters en luminantiemeters hebben een standaard spectrale gevoeligheid die gebaseerd is op de gevoeligheid van de kleurenreceptoren in het menselijke oog (kegeltjes). De standaard lichtmeters zijn bij lage lichtniveaus dus minder geschikt omdat de gemeten waarden met deze lichtmeters niet goed meer corresponderen met de menselijke waarneming (Alferdinck, 2008).

De spectrale gevoeligheid is voornamelijk niet gestandaardiseerd, maar in de wetenschappelijke literatuur worden met modellen schattingen gemaakt van deze mesopische spectrale gevoeligheid, zoals met het MOVE-model, (Goodman et al., 2007). Met dit model kan de (effectieve) mesopische luminantie worden berekend aan de hand van de fotopische luminantie waaraan de waarnemer is geadapteerd, de zogenaamde S/P-ratio en de positie ten opzichte van de blikrichting (excentriciteit). De S/P-ratio is de

verhouding tussen de scotopische luminantie (S) en de fotopische luminantie (P) en is afhankelijk van de kleur van het licht. Een lichtbron met relatief veel blauw licht en een hoge kleurtemperatuur heeft een hoge S/P-ratio en een lichtbron met relatief veel geel en rood licht en een lage kleurtemperatuur heeft een lage S/P-ratio. Het MOVE-model geldt voor excentriciteiten van 0 graden (blikrichting) en 10 graden (10 graden buiten blikrichting ofwel 'off-line zien'). Voor een excentriciteit van 0 graden is de mesopische luminantie gelijk aan de fotopische luminantie. Dus voor waarneming in het midden van het gezichtsveld ('on-line zien') kan men volstaan met de normale lichtmeters met een standaard spectrale gevoeligheid. Straatverlichting bevindt zich op het niveau van mesopisch zien (tussen 0,035 en 3,5 cd/m²). Bij deze lage lichtniveaus is het ooggevoelheidsoptimum verschoven naar kortere golflengtes ten opzichte van fotopisch zien. Wanneer de kleur van de verlichting hiermee zou corresponderen dan zou minder licht nodig zijn voor de gewenste functie vervulling. Dit geldt echter vooralsnog voor 'off-line zien'.

Op basis van een analyse door TNO werden effectiviteitsfactoren (f) berekend (zie Annex 4) waarmee de lichtbron versterkt (of verzwakt) zou moeten worden om de verlichtingssterkte te verkrijgen die nodig is voor de gekozen profielen. De toepassing van f-waarden wordt toegelicht aan de hand van het volgende voorbeeld. Een waarde van $f = 1,1$ impliceert dat in plaats van een lampvermogen van 22 W slechts 20 W nodig zou zijn, met als consequentie dat de verbruikte elektrische energie (nominaal) door 1,1 kan worden gedeeld. Deze factor geeft weer hoe de lichtstroom en dus de energiebehoefte verminderd kan worden om toch de vereiste prestaties te leveren. Op basis daarvan zouden energiezuiniger verlichtingsontwerpen ontwikkeld kunnen worden waarin de masten verder uit elkaar staan of een dimfactor gekozen. Het laatste heeft als bezwaar dat dimmen tot ongeveer 7 % energieverlies leidt. Daarom hebben we in de berekening gekozen voor het delen van het nominale verbruik van elektrische energie ('norm', zie Tabellen A5 en A6 van Annex 2) door f. In de kolom naast 'norm' wordt dat aangegeven als 'mesopisch'. Omdat de lichtoutput evenredig is met het elektriciteitsverbruik, wordt deze situatie gemodelleerd onder de aanname dat lampen een enigszins gewijzigd vermogen kunnen hebben terwijl de armatuur gelijk blijft. We hebben hiervoor gekozen als alternatief voor het aanpassen van alle profielen door middel van het vergroten (of verkleinen) van de afstanden tussen de lichtpunten, uitgaande van bestaande lampen.

De analyse werd uitgevoerd met de aanname dat alle TC-L-armaturen voorzien zijn van een TC-L/840-lamp (helder wit licht) en dat de correctie geldt voor asfaltwegen met uitzondering van de woonstraat. De verlichtingsklassen die gebaseerd zijn op Egem (in lux) moeten ten behoeve van de mesopische correctie omgerekend worden naar luminanties (in cd/m²). Hiervoor werd de gemiddelde luminantie-coëfficiënt (Q₀) van het wegdek als evenredigheidsfactor genomen. Q₀ werd op 0,07 gesteld conform CIE (2001). Deze waarde geldt echter alleen voor (zwart) asfalt. Voor de woonstraat is dit een minder bevredigende keuze en daarom werd daarvoor Q₀ op 0,10 gesteld. L_{gem} (gemiddelde fotopische wegdek luminantie) voor de vijf wegtypen werd aldus berekend. De kleurtemperatuur (T_c) van leds, nodig voor de berekening, wordt gegeven door Tabel A2 in Annex 1. Met het MOVE-model werd vervolgens L_{mes} (gemiddelde mesopische wegdek luminantie) bepaald. Uit L_{mes}/L_{gem} volgt de effectiviteitsfactor (f). Deze factor f bevindt zich in de range tussen 0,9 en 1,38 afhankelijk van de kleurtemperatuur en de klasse (S4, S5 of S6). Uitsluitend bij HST-lampen is $f < 1$.

3 Resultaten

3.1 Verbruik van elektrische energie

3.1.1 Nominaal

Het nominale elektriciteitsverbruik (in kWh_e) werd berekend uit het lampvermogen, het aantal lichtpunten per 100 meter en het aantal branduren in 20 jaar. Het subscript ‘e’ in kWh_e betekent hier elektriciteit en is de eenheid voor elektrische energie. Dit om onderscheid te maken met thermische energie (in megajoule, MJ; 1 kWh = 3,6 MJ) dat bijvoorbeeld in de vorm van gas wordt ingezet om elektriciteit te maken. Bij een traditionele centrale is de thermische energie ongeveer 2,5 keer zo groot als de geproduceerde elektrische energie. Deze worden gegeven in de Tabellen A5 en A6 van Annex 2 onder *heading* "norm" (dus zonder correctie voor mesopisch zien). Per wegtype worden deze waarden in Tabel 6 geaggregeerd tot het gemiddelde en standaarddeviatie en in een staafdiagram (Figuur 2a) weergegeven.

Ten opzichte van een fietspad verbruikt een gebiedsontsluitingsweg gemiddeld meer dan drie keer zoveel elektrische energie. Bij conventionele armaturen is de spreiding opvallend lager vergeleken met leds wat een weerspiegeling lijkt van de voltooide ontwikkeling van TC-L en HST. Dit stadium is bij leds toegepast bij openbare verlichting nog niet bereikt. Het verschil in spreiding tussen conventionele OVL en leds werkt door in de energiereductie door de introductie van leds (Figuur 2b).

Tabel 6 Gemiddelde (Avg) en standaarddeviatie (s.d.) van de verbruikte elektrische energie in kWh_e; CV is coefficient of variation (Avg/s.d.)

profiel	conventioneel			led		
	Avg	s.d.	CV	Avg	s.d.	CV
Woonstraat (TC-L)	8.872	828	9%	7.564	1756	23%
Erftoegangsweg (TC-L)	16.210	795	5%	13.157	3079	23%
Gebiedsontsluitingsweg (HST)	21.231	2161	10%	21.733	4559	21%
Fietspad (TC-L)	7.410	374	5%	5.434	915	17%
Industrieterrein (TC-L)	15.729	1274	8%	12.689	2379	19%
Industrieterrein (HST)	11.241	843	7%			

Tabel 7 geeft de milieudruk als gevolg van de productie van één kWh_e in Nederland en vermenigvuldiging met het elektriciteitsverbruik in de Tabellen A5 en A6 geeft de milieudruk voor alle milieuthema's en als CED (stroom) als gevolg van elektriciteitsverbruik. Vanwege de evenredigheid is het reductiepercentage (en variabiliteit) voor milieueffecten en CED (stroom), geheel identiek aan Figuur 2b.

Tabel 6 en Figuur 2b laten zien dat toepassing van led-verlichting bij fietspaden de grootste energiebesparing oplevert en ook dat led ongunstiger is dan HST-verlichting (gebiedsontsluitingsweg en bedrijventerrein). Leds gebruiken altijd minder stroom dan TC-L-armaturen.

Tabel 7. Milieu effecten van de productie van één kWh_e elektrische energie in Nederland

Milieuthema	eenheid	waarde
Uitputting abiotische hulpbronnen	kg Sb eq	$4,4 \cdot 10^{-3}$
Verzuring	kg SO ₂ eq	$2,9 \cdot 10^{-3}$
Vermesting	kg PO ₄ ³⁻ eq	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Klimaatverandering	kg CO ₂ eq	$5,9 \cdot 10^{-1}$
Aantasting ozonlaag	kg CFC-11 eq	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Humane toxiciteit	kg 1,4-DCB eq	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Aquatische ecotoxiciteit	kg 1,4-DCB eq	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Terrestrische ecotoxiciteit	kg 1,4-DCB eq	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Fotochemische oxidatie (zomersmog)	kg C ₂ H ₄	$1,1 \cdot 10^{-4}$
CED _e (Cumulative Energy Demand)	MJ	12,76

3.1.2 Gecorrigeerd voor mesopisch zicht

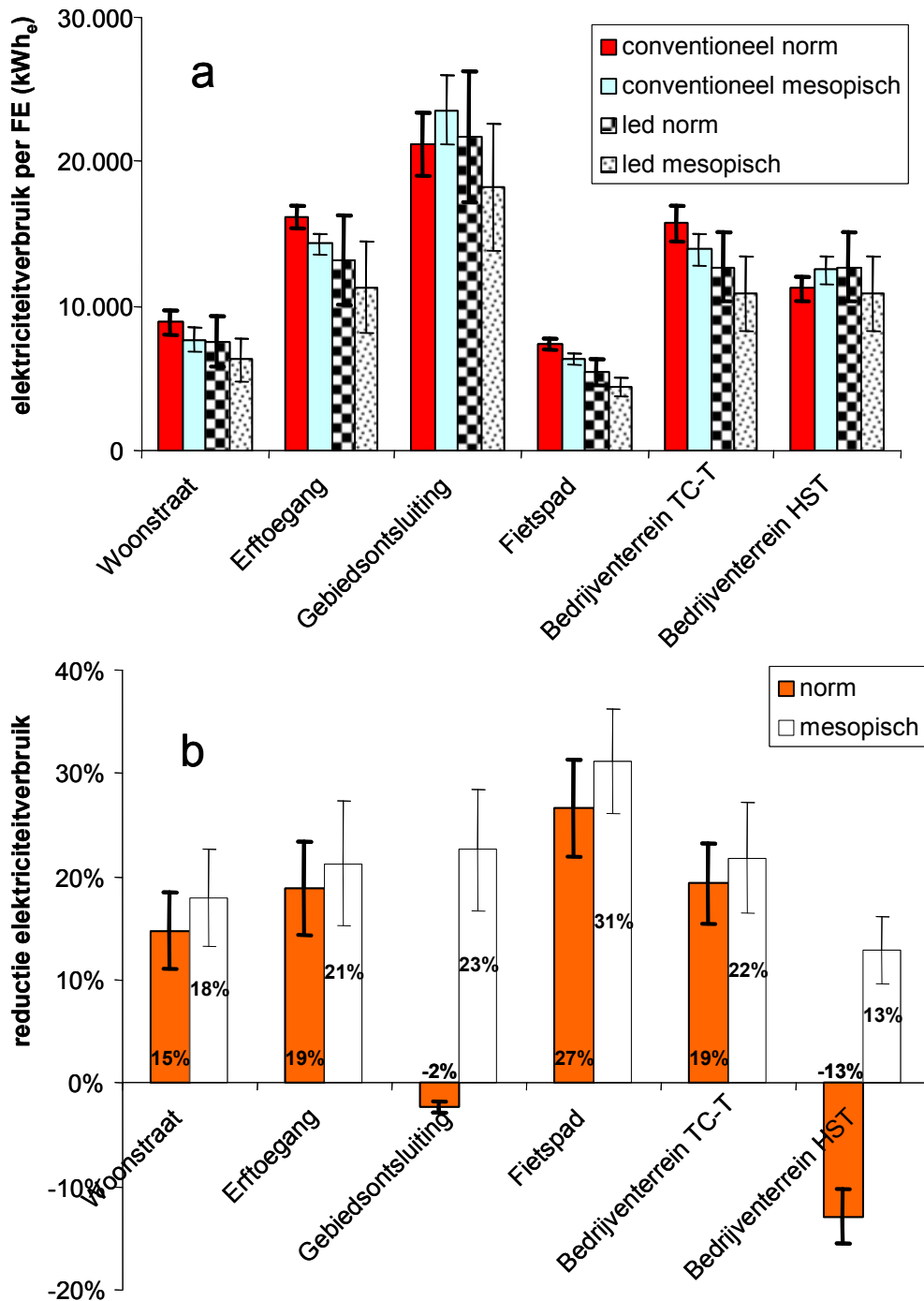
Voor mesopisch zien is een licht output nodig die een factor f verschilt van nominaal. Figuur 2a geeft per straattypen het gemiddelde en de standaarddeviatie van waarden voor het verbruik van elektrische energie. Ook deze geaggregeerde resultaten zijn berekend uit individuele waarden onder heading "mesopisch" in Tabellen A5 en A6 (Annex 2). De energiezuinige HST-lampen (zonder mesopische correctie efficiënter dan leds) blijken na correctie voor mesopisch zien *meer* energie nodig te hebben om voldoende licht te kunnen uitstralen om vergelijkbaar te kunnen functioneren.

Voor alle straattypen verlicht door leds is minder elektrische energie nodig. De energiereductie kan voor fietspaden oplopen tot 40 %. Figuur 2b laat zien dat bij openbare ruimte verlicht door HST-lampen (gebiedsontsluiting en bedrijventerrein) het reductiepercentage circa 25 % in positieve richting verschuift.

Aangezien bij armaturen binnen één straattypen de factor f kan verschillen, neemt de variabiliteit zowel bij conventionele als bij led-armaturen toe. Dit werkt door in de berekening van het reductiepercentage (Figuur 2b).

De correctie voor mesopisch zien werkt gunstig uit voor profielen met TC-L-lichtbronnen. Het elektriciteitsverbruik (onder heading 'norm') in Tabel A5 van Annex 2 wordt immers gedeeld door effectiviteitsfactoren (f) die liggen tussen 1,13 en 1,19 (zie Tabel A1, Annex 1). Dit resulteert in waarden onder heading 'mesopisch'. Voor leds ligt f tussen 1,07 en 1,38 maar meestal tussen 1,17 en 1,25 (Tabel A2). De meeste leds gaan dus aanzienlijk beter presteren door deze correctie.

HST armaturen (gebiedsontsluiting en bedrijventerrein) presteren door die correctie slechter met als resultaat dat er nu wel sprake is van verlaging van het elektriciteitsverbruik wanneer HST armaturen vervangen worden door leds.



Figuur 2 (a) Nominaal elektriciteitsverbruik van conventionele openbare verlichting en led-verlichting zonder (norm) en met (mes) correctie voor mesopisch zien
 (b) reductie van het elektriciteitsverbruik bij toepassing van leds

3.2 LCA

De resultaten van de ketenanalyse zijn niet gecorrigeerd voor mesopisch zicht. De emissie van stoffen die de ozonlaag aantasten is bij dit productsysteem verwaarloosbaar en wordt niet gerapporteerd. Om vergelijkbare redenen worden ook de thema's "humane toxiciteit" en "mariene ecotoxiciteit" niet gerapporteerd.

3.2.1 CED

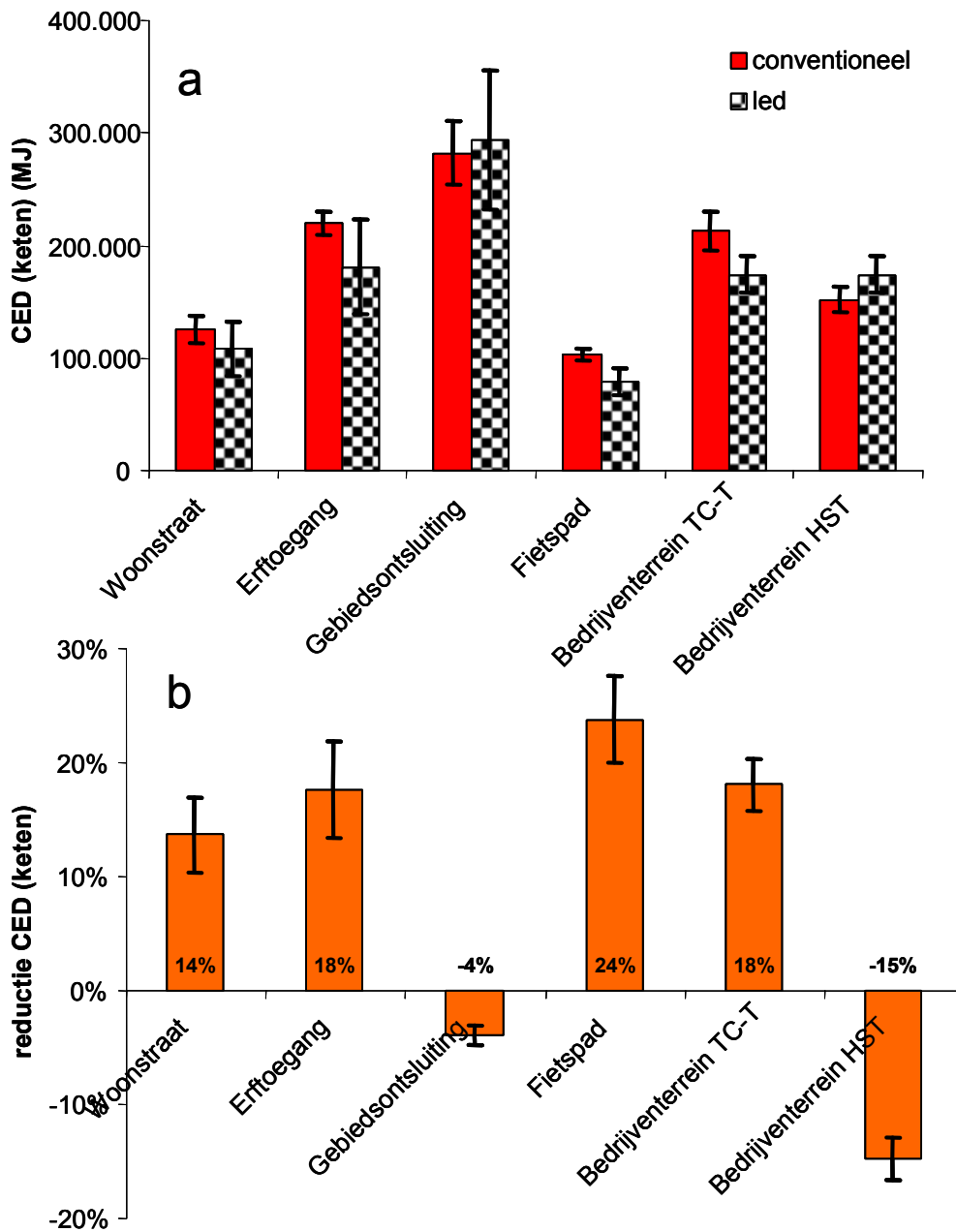
De energievraag over de gehele keten wordt gegeven door Figuur 3a. Bij alle wegtypen met TC-L-armaturen levert vervanging door leds milieuwinst op. Reductiepercentages voor CED (keten) vallen enigszins lager uit (Figuur 3b) dan voor elektrische energie (Figuur 2b). Dit wordt veroorzaakt doordat energievraag bij beide opties ongeveer in gelijke mate toeneemt wanneer de gehele keten berekend wordt. Die toename is gerelateerd aan het fabriceren van masten, lampen en armaturen en de energie voor het onderhoud.

Tabel 8 Aandeel van milieudruk door het nominale verbruik van elektrische energie

Functionele eenheid	Conventioneel		led	
	CED	CO ₂	CED	CO ₂
Woonstraat	90%	87%	89%	86%
Erftoegangsweg	94%	92%	93%	91%
Gebiedsontsluitingsweg	96%	95%	95%	93%
Fietspad	91%	89%	88%	85%
Industrieterrrein TC-L	94%	93%	93%	91%
Industrieterrrein HST	95%	93%	93%	91%

Bij beide opties is de bijdrage van het verbruik van elektrische energie tijdens de gebruiksfase aan CED (keten) groot. Tabel 8 laat zien dat CED (keten) voor ongeveer 90 % kan worden toegeschreven aan het nominale verbruik van elektrische energie. Dit geldt ook voor de emissie van broeikasgassen. Voorlopig kan worden geconcludeerd dat onzekerheid over de levensduur van leds of ten aanzien van gebruikte materialen (al dan niet gerecycled) of ten aanzien van onderhoud, de uitkomst van deze LCA maar in geringe mate zullen beïnvloeden.

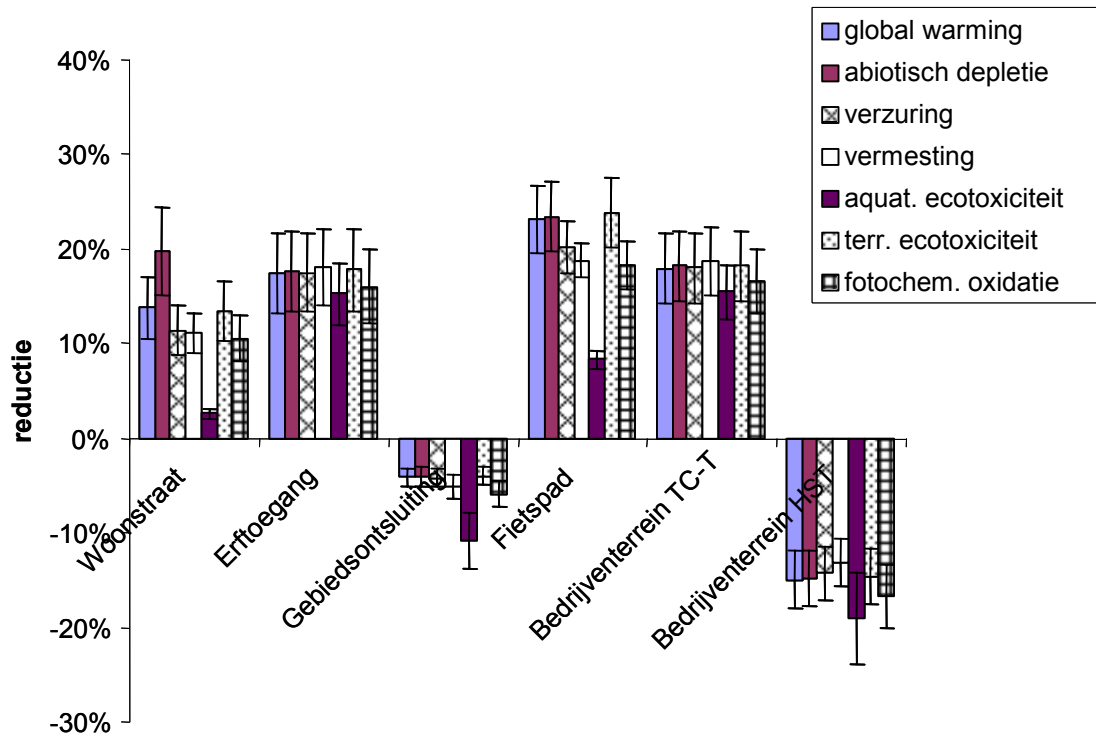
De analyse aan de hand van CED (keten) wijst wederom uit dat volgens de vigerende normen toepassing van HST minder milieudruk geven dan leds (Figuur 3a). Dit patroon is ook te zien bij klimaatverandering en andere milieuthema's, zoals uitputting abiotische natuurlijke hulpbronnen, verzuring, vermesting, ecotoxiciteit en fotochemische smogvorming (Figuur 4).



Figuur 3 Leds vergeleken met conventionele armaturen: a) CED over de gehele keten; b) reductie door toepassing van leds

3.2.2 Milieu

Zoals Figuur 4 laat zien levert vervanging van TC-L-armaturen door leds milieuwinst op voor alle milieuthema's. Ten opzichte van HST-verlichting geven de leds gemiddeld meer milieubelasting. De reductiepercentages in Figuur 3 werden berekend uit de milieu-impactscores die door middel van staafdiagrammen zijn afgebeeld in Annex 3 (Life Cycle Impact Assessment).



Figuur 4. Resultaten van de LCA als reductiepercentages voor de verschillende milieuthema's door toepassing van leds

4 Discussie en conclusies

De milieudruk van openbare verlichting wordt grotendeels bepaald door het verbruik van elektrische stroom tijdens het gebruik. Uit de analyse blijkt dat CED (keten) voor 90 % bestaat uit CED (stroom). Reductie van elektrische energie door toepassing van leds zal leiden tot een navenante vermindering van CO₂-emissie. Dit geldt ook voor verzurende en vermestende emissies en andere milieueffecten. Dat komt doordat fossiele brandstoffen de belangrijkste energiebron zijn. In het kader van het terugbrengen van de CO₂ uitstoot zijn veel gemeenten in Nederland overgestapt op de inkoop van groene energie. De milieubelasting wordt dan aanzienlijk gereduceerd.

Voor Frankrijk waar het aandeel kernenergie groter is dan 75 %, zou Tabel 7 er geheel anders uitzien met verstrekkende gevolgen voor de emissies (CO₂-emissie per kW_e is bijvoorbeeld een factor zes lager). De uitkomsten van een dergelijke LCA zouden wezenlijk verschillen, aangenomen dat de richtlijnen voor OVL in de bebouwde kom vergelijkbaar zijn. De belangrijke rol van fossiele brandstoffen in Nederland verklaart waarom alle figuren in Annex 3 sterk lijken op Figuur 2a. Omdat fossiele brandstoffen eveneens tot de categorie abiotische hulpbronnen behoren, laat ook het staafdiagram in Annex 3 voor het milieuthema Abiotische uitputting een tendens zien vergelijkbaar met Figuur 1a evenals het milieuthema terrestrische ecotoxicologie. Dit lijkt erop te wijzen dat de emissies van toxische stoffen eveneens sterk gerelateerd zijn aan de productie van elektriciteit en niet zozeer bepaald worden door de stadia fabricage en afval van de armaturen. Alleen de uitkomsten voor aquatische ecotoxicologie wijken enigszins af.

4.1 Profielen en richtlijnen

De analyse werd uitgevoerd op basis van profielen en daarin verschilden de prestaties van leds van conventionele armaturen op een manier die niet met Tabel 1 had kunnen worden voorspeld. Dit wordt veroorzaakt door het voordeel van gericht schijnen van led-armaturen. De richtlijnen van klasse S5 en S6 (Tabel 3) schrijven voor dat de horizontale verlichtingssterkte gemiddeld gelijk is aan 3, respectievelijk 2 lux, en met eisen aan gelijkmatigheid van de verlichtingssterkte (respectievelijk 0,2 en 0,3) met een absoluut minimum van 0,6 lux. Alleen met behulp van profielen kan de vergelijking tussen conventionele armaturen en leds tot de uitkomsten van dit rapport leiden. Er is een aantal opmerkingen te plaatsen. Enkele led armaturen produceren weinig strooilicht. Dit heeft als voordeel dat het licht niet wordt verspild en dat de energie zoveel mogelijk nuttig gebruikt wordt. Weinig strooilicht resulteert in een donkere strook langs het openbare gebied. Bewoners zullen zich dan genoodzaakt zien om aanvullende voorzieningen te monteren om het pad naar de voordeur zichtbaar te maken en het sleutelgat van de voordeur terug te vinden. Om er zeker van te zijn dat de verlichting nog voldoende strooilicht produceert werd de bermfactor gehanteerd bij de berekening van het profiel van een woonstraat. De bermfactor geeft de verhouding tussen de verlichting 5 meter binnen en 5 meter buiten het profiel en is oorspronkelijk bedoeld om bij verkeersfuncties voldoende licht te hebben om overstekende fietsers en voetgangers te kunnen waarnemen. Ook bij verlichting van het bedrijventerrein (weg met groenstrook en voetgangerspad) doet dit probleem zich voor. Het blijkt dat bij toepassing van TC-L-verlichting er voldoende strooilicht op het pad komt. Bij veel led-verlichting zou dit een probleem kunnen zijn waardoor in sommige gevallen aanvullende verlichting op het voetpad nodig is ondanks het feit dat het voetpad maar 2 meter van de rijbaan ligt. Dit effect is dus onwenselijk omdat dan meer energie nodig is. Het strekt tot aanbeveling dat led-fabrikanten meer aandacht geven aan het fenomeen strooilicht.

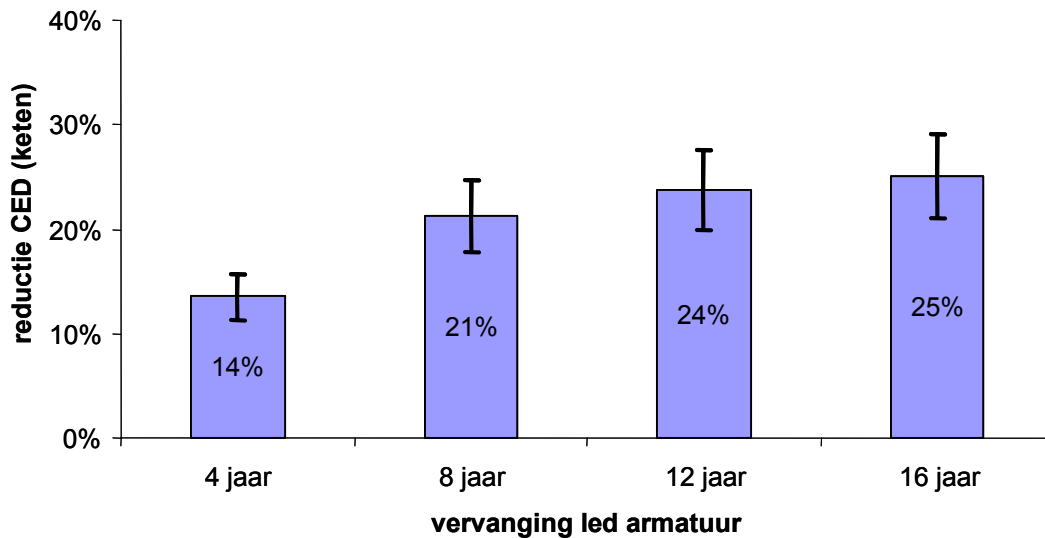
De berekening van fietspaden laat de hoogste gemiddelde besparing zien. Dit kan worden verklaard vanwege het smalle profiel van fietspaden (uitgangspunt 3 meter) en het feit dat veel leds nog een smalle bundel bezitten en minder een diepstralende bundel, noodzakelijk voor bredere (verkeers)wegen.

4.2 Onzekerheid materiaalverbruik

Het was onmogelijk om op korte termijn voldoende informatie over alle gebruikte materialen te verzamelen. Vooral over de kunststof onderdelen is onzekerheid maar het gewicht van de gebruikte metalen (en de identiteit) kon meestal redelijk goed geschat worden. In het volgende voorbeeld kan de relatief grote invloed van metalen op de CED-balans duidelijk worden. Uit de Tabellen 6 en 7 kan worden berekend dat het verbruik van elektrische energie nodig voor het conventioneel verlichten van een woonstraat, gemiddeld 113.200 MJ aan energie-input vergt. Dit werd aangeduid met CED (stroom) en beslaat volgens Tabel 8 gemiddeld 90 % is van CED (keten). Dit betekent dat circa 12.600 MJ nodig is voor de rest van de keten maar ook voor onderhoud gedurende de gebruiksfase. Gemiddeld is voor de woonstraat per functionele eenheid 24 kg aluminium nodig. De productie van 1 kg aluminium uit erts vergt 140 MJ. Hieruit kan worden afgeleid dat alleen al voor de aluminium onderdelen van deze armaturen meer dan een kwart van die 12.600 MJ nodig is.

4.3 Invloed van levensduur van leds

In de berekeningen werd uitgegaan van een levensduur van 50.000 uur voor leds. Dat betekent dat de leds om de 12 jaar (~ 50.000 uur) moeten worden vervangen. De meningen lopen uiteen maar naar verwachting dient led-verlichting eenmaal per 4 tot 6 jaar te worden schoongemaakt. In een gevoeligheidsanalyse werd nagegaan hoe de milieuwinst van led-OVL verandert als de vervanging om de 16, 8 of 4 jaar dient plaats te vinden. De analyse werd uitgevoerd voor het fietspad omdat de milieuwinst door leds daar het grootst is. Figuur 5 maakt duidelijk dat een verlaging van de levensduur van 50.000 jaar (~ 12 jaar) naar 33.000 uur (~ 8 jaar) de milieuwinst slechts 3 % minder wordt. Pas als de levensduur net zo kort is als die van conventionele *lampen*, dus als de led-armatuur om de 4 jaar vervangen moet worden, daalt de milieuwinst belangrijk. Een verlenging van de levensduur naar 16 jaar levert nauwelijks milieuwinst op. Uit verlichtingsoogpunt is het beter om de leds tijdig te vervangen om de lichterugval te compenseren.



Figuur 5 Invloed van vervanging van leds na 16.000, 33.000, 50.000 en 66.000 branduren. Geen correctie voor mesopisch zicht

4.4 Mesopisch zien en OVL

De mogelijkheden (en beperkingen) met betrekking tot de zintuigfysiologische aspecten van mesopisch zicht vallen in principe buiten het kader van een levenscyclusanalyse (LCA). Doel en reikwijdte van een LCA zijn immers in principe gebaseerd op gevalideerde modellen en op bestaande en geaccepteerde afspraken en normen. Resultaten gebaseerd op correctie van mesopisch zicht worden in dit rapport uitsluitend gepresenteerd voor verbruik van elektrische energie met als doel de potentie van het led-alternatief aan te geven indien richtlijnen voor lichtontwerpen aangepast zouden zijn aan mesopisch zien. Er zijn echter nog veel bedenkingen ten aanzien van de toepasbaarheid:

Aanpassing van hoog (fotopisch) lichtniveau naar een lager (mesopisch) niveau vereist adaptatie van het oog en dat kan 3-5 minuten duren. In een woonomgeving bevinden zich binnen het gezichtspunt meestal lichtpunten met helder wit licht met een relatief hoge intensiteit waardoor het mesopisch zicht verstoord wordt.

De berekende effectiviteitsfactoren gelden niet voor visuele taken die de weggebruiker uitvoert in het centrale gezichtsveld (scherp zien). Hieronder vallen bijvoorbeeld het uitvoeren van de rijtaak, het lezen van borden en huisnummers en het herkennen van gezichten. Alleen in het perifere gezichtsveld is winst te behalen (detecteren bewegingen). Ook zal de rijtaak bij mesopisch zicht worden bemoeilijkt door het ontmoeten van een (auto)mobilist met voertuigverlichting. Door de tegenligger stelt het oog zich in op fotopisch kijken waarna adaptatie naar de mesopische toestand enkele minuten duurt.

Verschillende type led lichtbronnen worden geleverd, variërend van 3.000 K (warmwit/gloeilamplicht) tot en met 6.000 K (koelwit/daglicht). De koelwitte leds hebben een hogere effectiviteitsfactor (f) dan warmwitte leds en daarom is het vergelijken van deze installaties problematisch. Men geeft over het algemeen bij laag lichtniveau de voorkeur aan een wat warmere witte kleur, bij blauw voelt men zich eerder onveilig. De uitkomsten van de pilots met led-straatverlichting die thans in verschillende gemeenten lopen, zullen hierover meer duidelijkheid geven.

De effectiviteitsfactoren afgeleid uit berekeningen met het MOVE-model gelden dus alleen voor visuele taken die de weggebruiker uitvoert in het perifere gezichtsveld. Dit heeft betrekking op bijvoorbeeld het detecteren en tijdig reageren op voetgangers in de berm of verkeer dat van kruisende wegen of paden komt. Ook het waarnemen van de helderheid van het gehele gezichtsveld wordt voor een groot

deel gedaan met het perifere gezichtsveld. Hierdoor kan de weggebruiker het gevoel krijgen dat de omgeving goed verlicht is waardoor het gevoel voor veiligheid kan toenemen. Deze effecten zijn nog niet in de praktijk systematisch onderzocht. In een aantal gemeenten worden pilots met led-verlichting uitgevoerd om de bedrijfszekerheid te testen en om via enquêtering de appreciatie van bewoners te kunnen schatten.

4.5 De *stand alone*-verlichting

Deze systemen werken op foto-voltaïsche energie en hebben lampen met een gering vermogen. Van twee *stand alone*-systemen, de Ecosol van Indal/Industria en de Parasol van IP Lighting, kon informatie vergaard worden. Het lag in de bedoeling deze variant in de analyse te betrekken.

De Ecosol is een systeem van bijna 34 kg (zonder mast) en werkt met een 9 W lamp. De accu weegt bijna 15 kg en moet na 2 of 3 jaar vervangen moet worden. Het aantal branduren is waarschijnlijk aanzienlijk lager dan de voor OVL gebruikelijke 4.100 uur. Een lichtberekening voor dit lampvermogen kan nauwelijks gemaakt worden omdat dit systeem meer lijkt op oriëntatieverlichting. Zelfs met een lichtpuntafstand van 15 meter zullen de normen voor woonstraat of fietspad niet gehaald kunnen worden.

De Parasol is een mast met een lichtpunthoogte van 4 meter. Dit *stand alone* systeem is geschikt voor een 7 Watt lamp met een variabel in te stellen brandduur van 8,5 uur gedurende de winterperiode. Het gewicht van het gehele systeem (inclusief mast) is 160 kg en het totale oppervlak van het zonnepaneel 1,44 m². De lamp kan 30 dagen blijven branden indien er niet voldoende zon is om het laadproces van de accu's te starten. Ook voor dit systeem is het met de vergaarde informatie op dit moment nog niet mogelijk om een lichtontwerp te maken voor een vergelijkingsstudie. En ook voor dit systeem zal een lichtontwerp conform de huidige richtlijnen waarschijnlijk niet haalbaar zijn.

Anders dan de op het elektriciteitsnet aangesloten led- en conventionele verlichting, waar de milieubelasting voor 90 % veroorzaakt wordt door het verbruik van elektrische energie, zijn voor de beoordeling van *stand alone* systemen vooral meer gegevens over de materialen en de vervangingsnelheid nodig. Vooral gegevens over de accu zijn nodig. Het onderhoud, dat frequenter zal plaatsvinden (schoonmaken van de zonnepanelen eens per jaar) zal een groter aandeel in de milieubelasting geven. Tevens zou een schatting gemaakt moeten worden van de mate van onderbelichting om een vergelijking met de elektriciteit verbruiken van de conventionele en led systemen te kunnen maken.

4.6 Conclusies en aanbevelingen

Invoering van leds levert, uitgedrukt als *cumulative energy demand*, milieuwinst op voor woonstraten (14 %), erftoegangswegen (18 %) en fietspaden (24 %). Ook voor het industrieterrein dat verlicht wordt door TC-L-armaturen is er sprake van milieuwinst (18 %). De spreiding in de onderzochte led-verlichting is hoog en varieert tussen 17 en 23 %. Dit houdt in dat de besparing sterk afhankelijk is van het type led-systeem.

De gemiddelde milieuwinst van led-armaturen ten opzichte van HST-armaturen is daarentegen op dit moment nog negatief: - 4 % voor gebiedsontsluitingswegen en -15 % voor bedrijventerreinen. Ook hier is de spreiding hoog hoewel aangetekend moet worden dat voor gebiedsontsluitingswegen slechts twee leds in het onderzoek werden betrokken. De spreiding in de prestaties van leds toegepast bij bedrijventerreinen impliceert dat er led-verlichting bestaat waarmee wel winst behaald kan worden ten opzichte van HST. Naar verwachting zal in de nabije toekomst de balans kunnen doorslaan naar led

wanneer naast een hoge efficiency ook aandacht besteed wordt aan de specifieke lichttechniek voor deze toepassingsgebieden.

De levenscyclusanalyse wijst uit dat onzekerheid ten aanzien van de levensduur van led armaturen van gering belang is.

Uit analyse van de *in dit onderzoek geselecteerde armaturen* blijkt dat de prestaties van led-armaturen binnen een type openbare ruimte een grote spreiding vertonen. Dit weerspiegelt het ontwikkelingsstadium waarin deze technologie zich momenteel bevindt. De verschillen tussen conventionele armaturen binnen een functionele eenheid (type openbare ruimte) zijn over het algemeen kleiner.

Een correctie voor mesopisch zien zou de energievraag van armaturen met compacte fluorescentielampen (TC-L) met 12 tot 14 % kunnen verminderen maar die van hoge druk natrium-armaturen echter met 11 % doen toenemen. Met deze correctie zouden leds 13 tot 31 % minder elektrische energie nodig hebben. Met moderne apparatuur kan dimmen van TC-L lichtbronnen in de nachtelijke uren ook een energiereductie van 25 % opleveren.

In verblijfsgebieden is de sociale veiligheid de belangrijkste functie van openbare verlichting. Het is nog onduidelijk of een laag lichtniveau in combinatie met een kleurenspectrum waarmee optimaal geprofiteerd wordt van mesopisch zien, wel acceptabel is. Bovendien kan de adaptatiesnelheid van het oog een beperkende factor zijn. In de bebouwde kom komt een snelle afwisseling van mesopisch en fotopisch licht vaak voor door bijvoorbeeld (fotopische) lichtpunten bij voordeuren. Dit kan het mesopisch voordeel aanzienlijk verminderen. Binnenkort verschijnt van de internationale organisatie CIE DIV 1, 2 en 4 een publicatie over dit onderwerp waarbij internationale onderzoeksresultaten worden besproken.

De veel toegepaste hoge kleurtemperaturen bij leds hebben een aantal nadelen. Veel gemeenten rapporteren dat burgers de voorkeur geven aan een kleurtemperatuur rond de 3000 tot 4000 Kelvin. De veel hogere kleurtemperaturen bezitten meer blauwe lichtgolven en dit licht wordt als kil ervaren. Eveneens blijkt uit onderzoek dat ouderen vanwege vergeling van de ooglens niet gebaat zijn bij hoge lichttemperaturen. De blauwe golven worden door het oog geabsorbeerd met als resultaat is een slechter gezichtsvermogen.

Bij de start van dit onderzoek waren er nog maar weinig leds op de markt die geschikt zijn voor wegen waar openbare verlichting primair bedoeld is om de verkeersveiligheid te ondersteunen. Slechts twee leds konden worden geanalyseerd die geschikt zijn voor gebiedsontsluitingswegen. Het verdient daarom aanbeveling om dit onderzoek na enige tijd te herhalen, gezien de snelle ontwikkeling van leds. De *stand alone*-verlichting op basis van fotonvoltaïsche energie zou in een afzonderlijke LCA moeten worden geanalyseerd zodra er meer gegevens beschikbaar zijn.

Literatuur

- Alferdinck, J.W.A.M. (2008). Waarnemingsexperimenten bij verschillende kleuren mesopische verlichting. In: Het Nationale Lichtcongres 2008. Ede: Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSVV).
- CEN (2003), Road lighting - Part 2: Performance requirements (European Standard EN 13201-2:2003), Brussels: European Committee for Standardisation (CEN).
- CEN (2004), Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes (Technical Report CEN/TR 13201-1:2004), Brussels: European Committee for Standardisation (CEN).
- CIE (2001). Road surface and road marking reflection characteristics (Publication CIE 144). Vienna, Austria: International Commission on Illumination CIE.
- Goodman, T., Forbes, A., Walkey, H., Eloholma, M., Halonen, L., Alferdinck, J.W.A.M., Freiding, A., Bodrogi, P., Varady, G., & Szalmás, A. (2007). Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications. *Lighting Research and Technology*, 39, (4), 365-392.
- Guinée J.B. (Ed). (2002). Handbook on Life Cycle Assessment, operational guide to the ISO standards, VROM -CML, ISBN 1-4020-0228-9.
- Huijbregts M.A.J., L.J.A. Rombouts, S. Hellweg, R. Frischknecht, A.J. Hendriks, D. van de Meent, A.M.J. Ragas, L. Reijnders, J. Struijs (2006). Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? (*Env. Science & Technology* 40 (3) 641-648).
- GWV (2005) Bepaling energieverbruik en besparingpotentieel GWV-sector, nov. 2005.
- NPR (2002), Nederlandse Praktijk Richtlijn voor openbare verlichting 13201-1 deel 1 kwaliteitscriteria (mei 2002 NSVV Ede) afgeleid van de Europese norm CEN (2004).
- Nuijten J. en P. Verburg (2007) Verkennend onderzoek naar besparing CO2-uitstoot in openbare verlichting. Dynamicom. Dynamicom is een onderdeel van de NUON-groep.

Annex 1 Armaturen en effectiviteitsfactoren

Tabel A1 Conventionele armaturen en effectiviteitsfactoren afgeleid met behulp van Tabellen A3, A4, A9 en A10

Conventionele armaturen	<i>f</i>
Indal/Industria 2000 TC-L 24W	1,17 (S6)
Indal/Industria 2550 TC-L 24W	1,19 (S6)
Indal/Industria ARC 2680 HST 50W	0.9 (S4)
Indal/Industria ARC 2685 HST 70W	0.9 (S4)
Indal/Industria Aurora 2650 HST 50W	0.9 (S4)
Indal/Industria Aurora 2650 HST 70W	0.9 (S4)
Indal/Industria Iris 2552 TC-L 55W	1.13 (S4)
Indal/Industria Libra 2565 TC-L 24W	1.16 (S5)
Indal/Industria Libra 2570 TC-L 55W	1.13 (S4)
Lightronics KFK TC-L 24W	1.14 (S5)
Lightronics LUZ Helder TC-L 24W	1.14 (S5)
Lightronics Mistral TC-L 24W	1.16 (S5)
Philips Cityzen HP100 TC-L 24W	1,17 (S6)
Philips FGS 103 TC-L 24W	1.16 (S5)
Philips FGS 105 TC-L 55W	1.13 (S4)
Philips Iridium SGS252 GB HST 50W	0.9 (S4)
Philips Iridium SGS252 GB HST 70W	0.9 (S4)
Philips Residium FGS223 TC-L 24W	1.16 (S5)
Philips Residium FGS225 TC-L 55W	1.13 (S4)
Philips SGS203 HST 50W	0.9 (S4)
Philips SGS203 HST 70W	0.9 (S4)
Schreder Altra 2 TC-L 24W	1.16 (S5)
Schreder Altra 3 TC-L 55W	1.13 (S4)
Schreder Alura TC-L 24W	1,17(S6)
Schreder Furyo-1 HST 70W	0.9 (S4)
Schreder Onyx-2 HST 50W	0.9 (S4)
Schreder Onyx-2 HST 70W	0.9 (S4)

Tabel A2 Led armaturen, kleurtemperatuur en effectiviteitsfactoren afgeleid met behulp van Tabellen A3, A4, A9 en A10

Led armaturen	T_c	f
Indal/Industria Stela square 10 LED 14W	3000-5700 °K	1,18 (S5; Q ₀ = 0.10); 1,24 (S6)
Indal/Industria Stela square 14 LED 22W	3000-5700 °K	1,21(S6)
Indal/Industria Stela Wide 36 LED 52W	3000-5700 °K	1,17 (S4)
Indal/Industria Stela Wide 52 LED 70W	3000-5700 °K	1,17 (ME4a)
Innolumis Lemnis Eco White 16 LED 20W	4152 °K	1,33 (S5)
Innolumis Lemnis Eco White 24 LED 30W	4152 °K	1,38 (S5)
Lioris Aduro 20 LED 22W	5600 °K	1,25 (S5)
Lioris Aduro 22 LED 25W	5600 °K	1,25 (S5)
Lioris Aduro 52 LED 58.8W	5600 °K	1,20 (S4)
Philips CitySpirit Cone 22 LED 25W	3000 °K	1,08 (S5)
Philips Urban line BPP406 24 LED 69W	3000/4000 °K	1,07 (S4)
Philips Urban line BPP406 6 LED 18W	3000/4000 °K	1,09 (S5)
Ruud Lighting Leedway Str. TS40 LED 55W	6000 °K	1,22 (S4)
Ruud Lighting Leedway Str. TLB40 LED 55W	6000 °K	1,22 (S4)
Ruud Lighting Leedway Str. TS20 LED 28W	6000 °K	1,27 (S5)
Ruud Lighting Leedway Str. TSB 60 LED 79W	6000 °K	1,22 (ME4a)
Schreder Altra 16 LED 22W	5000 °K	1,21 (S5)
Schreder Altra 16 LED 32W	5000 °K	1,18 (S5)

Annex 2 Lichtontwerpen of profielen

Voor de berekening wordt gebruikgemaakt van profielen. Hiermee is het mogelijk een configuratie te definiëren die het meest energiezuinig is maar nog wel aan de norm voldoet. Bureau De Kruijter heeft voor de verschillende straattypen in stedelijk gebied de berekeningen uitgevoerd voor de verlichtingsprofielen. De profielen zijn gebaseerd op veel voorkomende situaties in Nederland. Bij het opstellen is voor zowel conventionele armaturen als ook voor de led-armaturen de meest voordelige situatie uitgekozen. In de praktijk zullen altijd compromissen moeten worden gesloten om een aanvaardbaar lichtplan te verkrijgen. Bij renovaties worden veelal nooit de ideale mastafstanden bereikt of worden de masten niet verplaatst. De energiebesparing zal bij renovaties en rehabilitaties altijd minder zijn dan de in dit rapport genoemde getallen.

1) Straat in een woonwijk

De rand van het profiel van een woonstraat wordt de erfgrens genoemd. Tussen de erfgrenzen is de woonstraat gemiddeld 10 meter breed. Aan de rand van het profiel bevinden zich aan weerszijden voetpaden. Het midden van het profiel is de rijbaan met of zonder mogelijkheden voor langs- of dwarsparkeren. De lichtmasten staan op 0,5 meter afstand van de rand van de rijbaan, conform de RVV-eis die gesteld wordt aan een obstakelvrije zone langs rijbanen en fietspaden binnen de bebouwde kom. Overhang is de afstand tussen het hart van de armatuur en de erfgrens. Door de lichtmast afstand te variëren in de lengterichting van het profiel is het mogelijk om die afstand te vinden waarbij de gemiddelde horizontale verlichtingssterkte ($E_{h\text{ gem}}$) en de gelijkmatigheid (U_h , het quotiënt van laagste horizontale verlichtingssterkte, $E_{h\text{ min}}$, en $E_{h\text{ gem}}$) nog net voldoen aan de norm. In de praktijk zal één van beide de beperkende factor zijn voor een maximale mastafstand.

Voor woonwijkverlichting heeft de fabrikant de armatuur ontworpen voor een bepaalde lichtpunthoogte. Armaturen die geschikt zijn voor paaltoplichtmasten en die een kegelvormige lichtkap hebben, zijn ontwikkeld om voor dit doel toegepast te worden op een lichtpunthoogte van 4 meter. De verlichtingarmaturen die een kofferachtige vorm hebben, zijn ontwikkeld voor een lichtpunthoogte van 5 of 6 meter. Van deze waarden werd uitgegaan bij het ontwerp van de profielen.

Bij alle opties gaan we uit van een de eis die voor woonwijkverlichting geldt. In de praktijk worden de klassen S5 en S6 door elkaar gebruikt vanwege de oudere NSVV-eisen en het huidig Politiekeurmerk Veilig Wonen[®]; de ene klasse heeft een hoger lichtniveau ($E_{h\text{ gem}}$) met een lagere gelijkmatigheid (U_h) en de andere een lager lichtniveau met een hogere gelijkmatigheid. Doordat de verlichtingsarmaturen een vast uitstralingspatroon hebben kan het zijn dat ze in de gekozen opstelling bij klasse S5 beter presteren dan in klasse S6. Omdat de beide klassen door elkaar gebruikt worden kijken we naar de klasse waarbij het armatuur het beste qua energiezuinigheid presteert.

2) Erftoegangsweg

De erftoegangsweg is de weg waar de woonstraten op uitkomen. Deze weg heeft in de regel een breedte die varieert tussen de 6 en 7 meter en er bevinden zich soms woningen of woonblokken aan beide zijden van de weg. De masten die er staan hebben meestal een lichtpunthoogte van 6, 7, 5 of 8 meter, afhankelijk van het beleid van de gemeente. We gaan in ons rekenvoorbeeld even uit van 8 meter omdat dit een optie is die het meest voorkomt. De lichtmasten hebben een uithouder die varieert tussen de 1,25 en 2 meter waarbij 1,25 de ongunstigste is en dan ook als uitgangspunt wordt gekozen.

De maximale mastafstand wordt in de praktijk vaak niet gehaald omdat in een lichtplan ook een aantal vaste punten c.q. strategische plekken waar de lichtmasten zeker moeten staan zijn opgenomen, zoals op koppen van middendruppels, tangentpunten van bochten en op de kopse kanten van T- splitsingen. Verder dient er rekening gehouden te worden met uitritten, parkeervakken en bomen. Bij het profiel van de erftoegangsweg wordt bij een bepaalde armatuur een maximale mastafstand van 49 meter berekend. In de praktijk zal de mastafstand 10 % minder zijn.

3) Gebiedsontsluitingsweg

De erftoegangswegen sluiten aan op de gebiedsontsluitingsweg en worden meestal verlicht met hogedruk natrium verlichting. De lichtmasten hebben hier een hoogte van 8 of 9 meter.

We gaan in dit voorbeeld uit van masten met een lichtpunthoogte van 8 meter. De weg heeft een breedte van 7,2 meter waarbij de masten enkelzijdig of aan weerszijden van de weg staan. Gescheiden door een groenstrook bevinden zich een fiets- en voetpad. Omdat de invulling en maatvoering van het profiel in de praktijk sterk uiteenlopen, richten we ons alleen op de rijbaan. De rijbaan heeft een verkeersfunctie als doel en daarbij is gezichtherkenning van ondergeschikt belang. Bij de berekening is de hoeveelheid licht die via het wegdek ons oog bereikt van belang. De waarden die worden berekend, hebben niet meer betrekking op verlichtingssterkte (E in lux) maar op luminantie (L in cd/m^2). Verder is het van belang dat het verlichte wegdek aan twee eisen van gelijkmatigheid voldoet, te weten de gelijkmatigheid in de lengterichting van de weg ('langsgelijkmatigheid') en de gelijkmatigheid over de breedte van de weg ('overall gelijkmatigheid') en als laatste mag de verblinding van de verlichting niet boven de 15 % uitkomen. De verlichtingsklasse volgens de NPR (2002) is van het ME4a-type.

4) Het fietspad

Het fietspad heeft vaak een breedte van 3 meter en er worden vaak paaltoplichtmasten langs geplaatst met een lichtpunthoogte van 5 meter. De lichtmasten staan ook hier conform de RVV eis 0,5 meter uit de kant van het fietspad. Er wordt in het onderzoek uitgegaan van een vrij liggend fietspad met als reden dat het meenemen van strooilicht alleen mogelijk is indien er meer informatie van de naastgelegen installatie bekend is.

5) Het bedrijventerrein

Het bedrijventerrein lijkt op een erftoegangsweg met een wegbreedte die circa 6,5 meter is. Vaak is er een groenstrook van 2 meter waarin lichtmasten met een lichtpunthoogte van meestal 7,5 meter staan met daarachter nog een voetpad van tussen de 1,5 en 2 meter. Dit voetpad wordt achterwaarts verlicht met strooilicht van de openbare verlichting die langs de hoofdrijbaan staat. Voor TC-L-verlichting is dit doorgaans geen probleem maar bij led-verlichting meestal wel.

Bij de HST-varianten (hoge druk Na-lampen) wordt gezocht naar de lamp/spiegel-instelling die binnen het opgegeven profiel het beste resultaat oplevert.

Karakteristieken van de profielen.

De codering van de armaturen is als volgt: C en L staat voor conventioneel, respectievelijk led. C_i en L_i hebben betrekking op een woonstraat (i = 1), op een erftoegangsweg (i = 2), op een gebiedsontsluitingsweg (i = 3), op een fietspad (i = 4) en op een bedrijven- of industrieterrein (i = 5). De masthoogte (h) en de lichtpuntafstand (d) werden door Bureau De Kruijter gerelateerd aan de verlichtingsklasse conform de NPR (2002). In de laatste kolom wordt het energieverbruik (E) per functionele eenheid gegeven, gebaseerd op het systeemvermogen (P van de lamp + P voorschakelapparatuur of driver) en het aantal armaturen per 100 meter over 20 jaar.

Tabel A3 Karakteristieken van 32 op conventionele armaturen gebaseerde profielen

Profiel	Type	h (m)	d (m)	klasse	P systeem (W)
C _{1,1}	TC-L	4	27	S6	26
C _{1,2}	TC-L	4	22	S5	26
C _{1,3}	TC-L	4	22	S5	26
C _{1,4}	TC-L	4	24	S6	26
C _{1,5}	TC-L	4	26	S6	26
C _{2,1}	TC-L	8	29	S4	58
C _{2,2}	TC-L	8	29	S4	58
C _{2,3}	TC-L	8	29	S4	58
C _{2,4}	TC-L	8	28	S4	58
C _{2,5}	TC-L	8	32	S4	58
C _{3,1}	HST	8	33	ME4a	80
C _{3,2}	HST	8	33	ME4a	80
C _{3,3}	HST	8	28	ME4a	80
C _{3,4}	HST	8	27,5	ME4a	80
C _{3,5}	HST	8	30	ME4a	80
C _{3,6}	HST	8	35,5	ME4a	80
C _{4,1}	TC-L	5	31	S6	26
C _{4,2}	TC-L	5	28	S5	26
C _{4,3}	TC-L	5	30	S5	26
C _{4,4}	TC-L	5	28	S5	26
C _{4,5}	TC-L	5	27	S5	26
C _{4,6}	TC-L	5	29	S5	26
C _{5,1}	TC-L	7,5	31	S4	58
C _{5,2}	TC-L	7,5	31	S4	58
C _{5,3}	TC-L	7,5	28	S4	58
C _{5,4}	TC-L	7,5	28	S4	58
C _{5,5}	TC-L	7,5	34	S4	58
C _{5,6}	HST	7,5	47	S4	59,5
C _{5,7}	HST	7,5	47	S4	59,5
C _{5,8}	HST	7,5	41	S4	59,5
C _{5,9}	HST	7,5	40	S4	59,5
C _{5,10}	HST	7,5	43	S4	59,5

Tabel A4 Karakteristieken van 25 op led-armaturen gebaseerde profielen

Profiel	Type	h (m)	d (m)	klasse	P systeem (W)
L _{1,1}	led	6	25	S5	30
L _{1,2}	led	6	28	S5	24,9
L _{1,3}	led	4	22	S5	25
L _{1,4}	led	6	32	S5	28
L _{1,5}	led	6	31	S5	32
L _{1,6}	led	4	22	S5	14
L _{1,7}	led	6	32	S6	22
L _{2,1}	led	8	33	S4	69
L _{2,2}	led	8	33	S4	52
L _{2,3}	led	8	30	S4	55
L _{2,4}	led	8	42	S4	58,5
L _{2,5}	led	8	49	S4	55
L _{3,1}	led	8	23	ME4a	70
L _{3,2}	led	8	35	ME4a	79
L _{4,1}	led	5	28	S6	14
L _{4,2}	led	5	29	S6	20
L _{4,3}	led	5	29	S5	22
L _{4,4}	led	5	31	S5	18
L _{4,5}	led	5	35	S5	28
L _{4,6}	led	5	34	S5	22
L _{5,1}	led	8	36	S4	69
L _{5,2}	led	8	35	S4	52
L _{5,3}	led	8	48	S4	55
L _{5,4}	led	8	32	S4	55
L _{5,5}	led	8	40	S4	58,8

Tabel A5 Verbruik van armaturen, lampen, masten en energie per functionele eenheid van op profielen gebaseerd op conventionele armaturen

Profiel	Type	Armaturen (aantal)	Lampen (aantal)	Masten (aantal)	Elektrische energie (kWh _e)		Dieselolie (kg)
					norm	mesopisch	
C _{1,1}	TC-L	4,94	18,5	2,5	7896	6749	30,6
C _{1,2}	TC-L	6,06	22,7	3	9691	8501	30,3
C _{1,3}	TC-L	6,06	22,7	3	9691	8501	37,5
C _{1,4}	TC-L	5,56	20,8	2,8	8883	7593	27,8
C _{1,5}	TC-L	5,13	19,2	2,6	8200	7009	25,6
C _{2,1}	TC-L	4,60	17,2	2,3	16400	14513	28,4
C _{2,2}	TC-L	4,60	17,2	2,3	16400	14513	28,4
C _{2,3}	TC-L	4,60	17,2	2,3	16400	14513	28,4
C _{2,4}	TC-L	4,76	17,9	2,4	16986	15032	29,5
C _{2,5}	TC-L	4,17	15,6	2,1	14863	13153	25,8
C _{3,1}	HST	4,04	15,2	2	19879	22088	25
C _{3,2}	HST	3,03*	15,2	2	19879	22088	25
C _{3,3}	HST	4,76	17,9	2,4	23429	26032	29,5
C _{3,4}	HST	3,64	18,2	2,4	23855	26505	30
C _{3,5}	HST	3,33	16,7	2,2	21867	24296	27,5
C _{3,6}	HST	2,82	14,1	1,9	18479	20532	23,2
C _{4,1}	TC-L	4,3	16,1	2,2	6877	5779	26,6
C _{4,2}	TC-L	4,76	17,9	2,4	7614	6564	29,5
C _{4,3}	TC-L	4,44	16,7	2,2	7107	6126	27,5
C _{4,4}	TC-L	4,76	17,9	2,4	7614	6564	29,5
C _{4,5}	TC-L	4,94	18,5	2,5	7896	6807	30,6
C _{4,6}	TC-L	4,6	17,2	2,3	7352	6338	28,4
C _{5,1}	TC-L	4,3	16,1	2,2	15342	13577	26,6
C _{5,2}	TC-L	4,3	16,1	2,2	15342	13577	29,5*
C _{5,3}	TC-L	4,76	17,9	2,4	16986	15032	29,5
C _{5,4}	TC-L	4,76	17,9	2,4	16986	15032	29,5
C _{5,5}	TC-L	3,92	14,7	2	13988	12379	24,3
C _{5,6}	HST	2,84	10,6	1,4	10381	11534	17,6
C _{5,7}	HST	2,84	10,6	1,4	10381	11534	17,6
C _{5,8}	HST	3,25	12,2	1,6	11900	13222	20,1
C _{5,9}	HST	3,33	12,5	1,7	12198	13553	20,6
C _{5,10}	HST	3,1	11,5	1,6	11347	12607	19,2

Tabel A6 Verbruik van armaturen, masten en energie per functionele eenheid van op profielen gebaseerd op led-armaturen; *armatuur waarbij na 12 jaar alleen de leds en de driverlektronica worden vervangen

Profiel	Type	Armaturen (aantal)	Masten (aantal)	Elektrische energie (kWh _e)		Dieselolie (kg)
				norm	mesopisch	
L _{1,1}	led	6,67	2,7	9840	7398	22
L _{1,2}	led	5,95*	2,4	7292	5977	19,6
L _{1,3}	led	7,58	3,03	9318	8628	25
L _{1,4}	led	5,21	2,1	7175	5786	17,2
L _{1,5}	led	5,38	2,2	8465	7173	17,7
L _{1,6}	led	7,58	3	5218	4422	25
L _{1,7}	led	5,21	2,1	5638	4659	17,2
L _{2,1}	led	5,05	2,02	17145	16024	16,7
L _{2,2}	led	5,05	2,02	12921	11044	16,7
L _{2,3}	led	5,56	2,22	15033	12322	18,3
L _{2,4}	led	3,97	1,59	11480	9567	13,1
L _{2,5}	led	3,40	1,36	9204	7544	11,2
L _{3,1}	led	7,25	2,9	24957	21330	23,9
L _{3,2}	led	4,76	1,9	18509	15171	15,7
L _{4,1}	led	5,95	2,4	4100	3306	19,6
L _{4,2}	led	5,75	2,4	5655	4098	19
L _{4,3}	led	5,75*	2,3	6221	4977	19
L _{4,4}	led	5,38	2,3	4761	4368	17,7
L _{4,5}	led	4,76	1,9	6560	5165	15,7
L _{4,6}	led	4,9	2	5306	4385	16,2
L _{5,1}	led	4,63	1,9	15717	14688	15,3
L _{5,2}	led	4,76	1,9	12183	10413	15,7
L _{5,3}	led	3,47	1,4	9396	7702	11,5
L _{5,4}	led	5,21	2,1	14094	11552	17,2
L _{5,5}	led	4,17	1,7	12054	10045	13,8

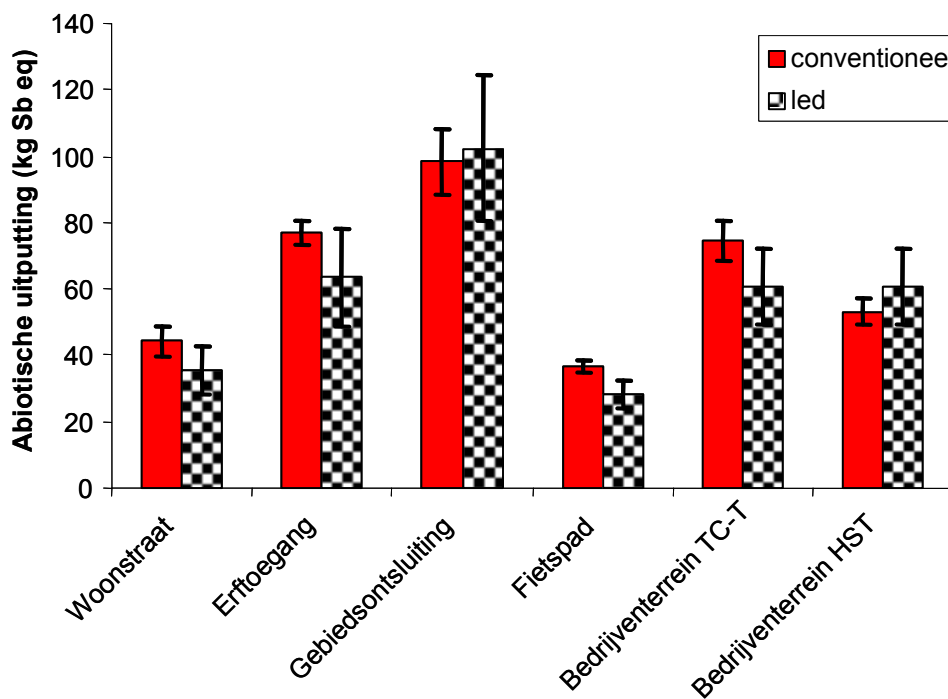
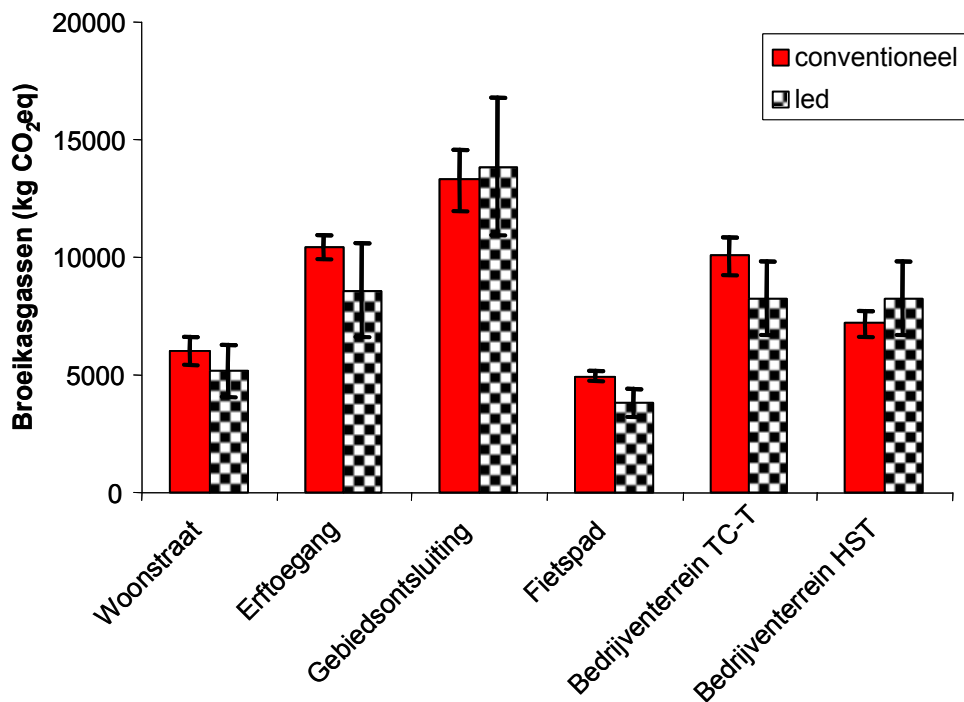
**Tabel A7 Materiaal van de armatuur met lamp (kg) a = polyester b polycarbonaat
c acrylaat styreenacrylonitril**

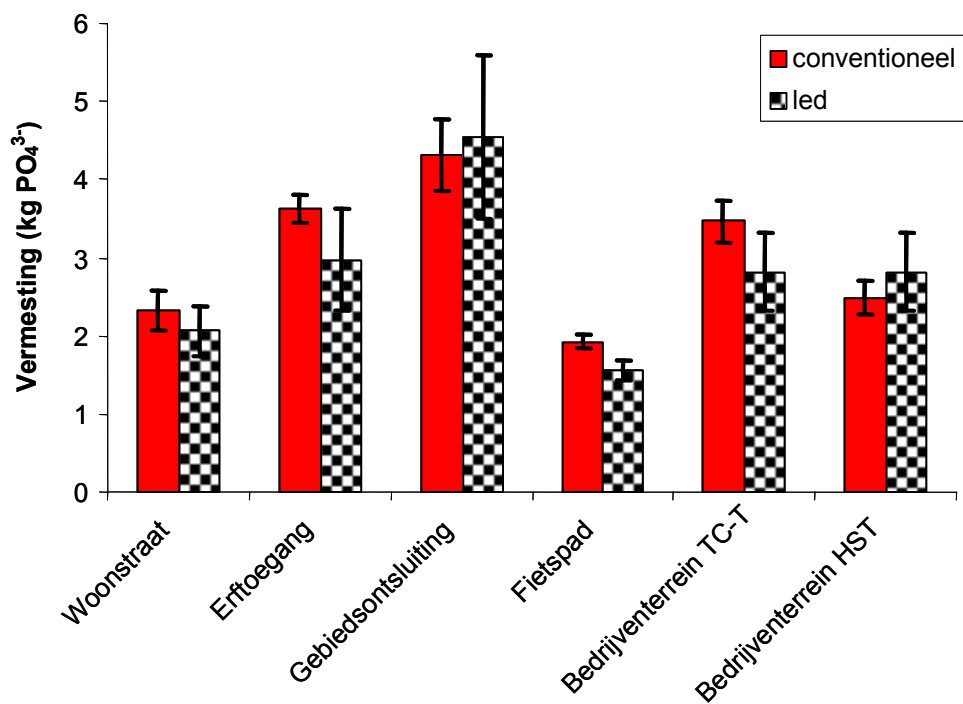
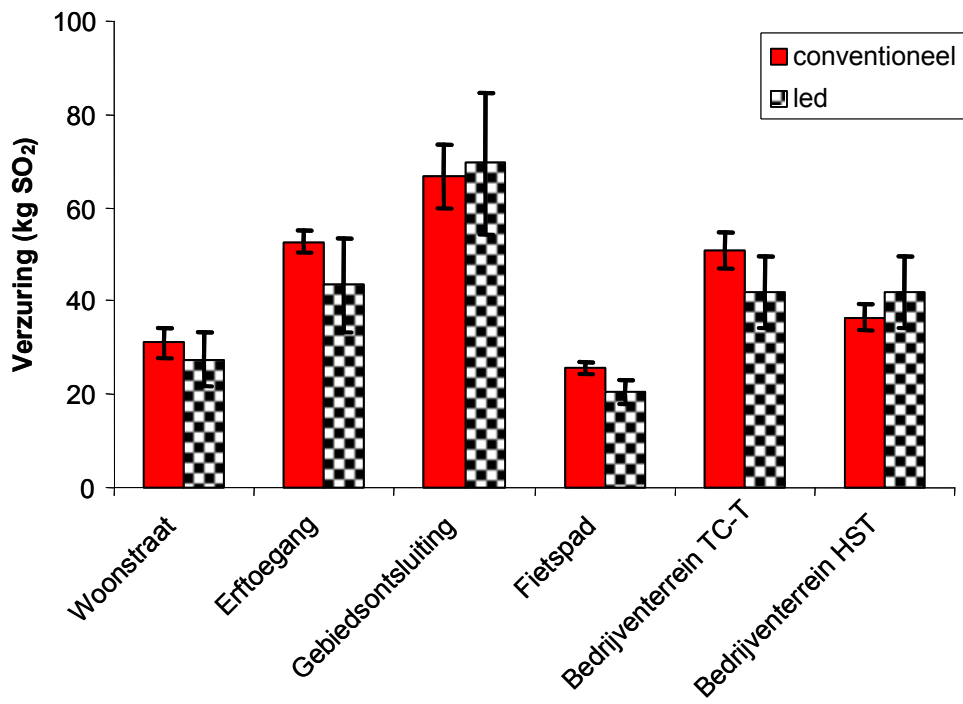
Profiel	Al		ijzer	kunststof			glas	electr
	giet	anod.		a	b	c		
C _{1,1}	1	0,5		1	1		0,1	0,5
C _{1,2}	1,5	0,65	2,5		4		0,1	0,5
C _{1,3}	5	1,1	2,5		1,5		0,1	0,5
C _{1,4}	1,5	0,4			3	2,5	0,1	0,5
C _{1,5}	7,5	0,4			7,5		0,1	0,5
C _{2,1}	2	0,5	1	1,5	1		0,1	0,5
C _{2,2}	2,4	0,5	0,8		1,5	0,5*	0,1	0,5
C _{2,3}	0,3		0,2	2,5	1,1	1	0,1	0,5
C _{2,4}	0,5	0,35	0,8		2,6	1	0,1	0,5
C _{2,5}	4,2	0,2	1		1		0,1	0,5
C _{3,1}	3	0,5	0,5	1	1,5		0,15	1
C _{3,2}	1,93	0,5	0,5	2			2,15	1
C _{3,3}	0,5	0,5	0,5	0,85			1,15	1
C _{3,4}	5,65	0,5	0,5				2,15	1
C _{3,5}	6,65	0,5	0,5				1,65	1
C _{3,6}	6,35	0,5	0,5				1,15	0,5
C _{4,1}	2	0,5	0,9	1	1		0,1	0,5
C _{4,2}	3,5	0,2	1		0,5		0,1	0,5
C _{4,3}	4,3	0,5	1		1,5		0,1	0,5
C _{4,4}	0,3		0,7	1,5	0,6		0,1	0,5
C _{4,5}	0,3	0,35	0,8	1	2,1		0,1	0,5
C _{4,6}	2,4		1,3	1		0,5*	0,1	0,5
C _{5,1}		0,5	1	3	1		0,1	0,5
C _{5,2}	2,4	0,5	0,8		1,5	0,5*	0,1	0,5
C _{5,3}	0,3		0,7	1,1	2,5		0,1	0,5
C _{5,4}	0,5	0,35	0,8	,5	2,6		0,1	0,5
C _{5,5}	4,2	0,2	1		1		0,1	0,5
C _{5,6}	3	0,5	0,5	1	1,5		0,15	1
C _{5,7}	1,93	0,5	0,5	2			2,15	1
C _{5,8}	1	0,5	0,5	0,85			2,15	1
C _{5,9}	5,65	0,5	0,5	1?			2,15	1
C _{5,10}	5,85	0,5	0,5				2,10	1

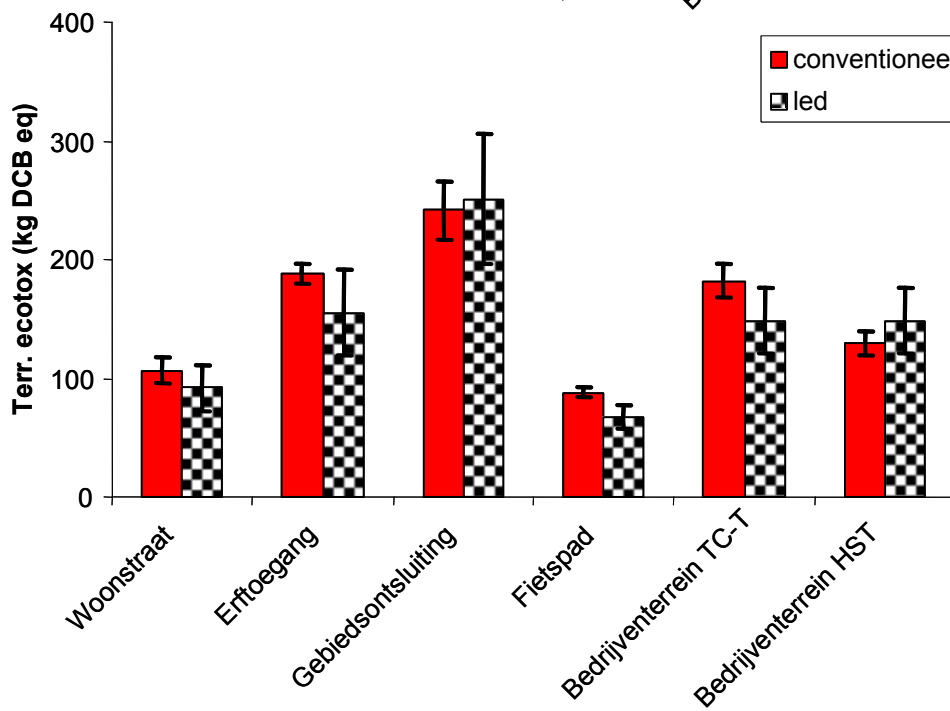
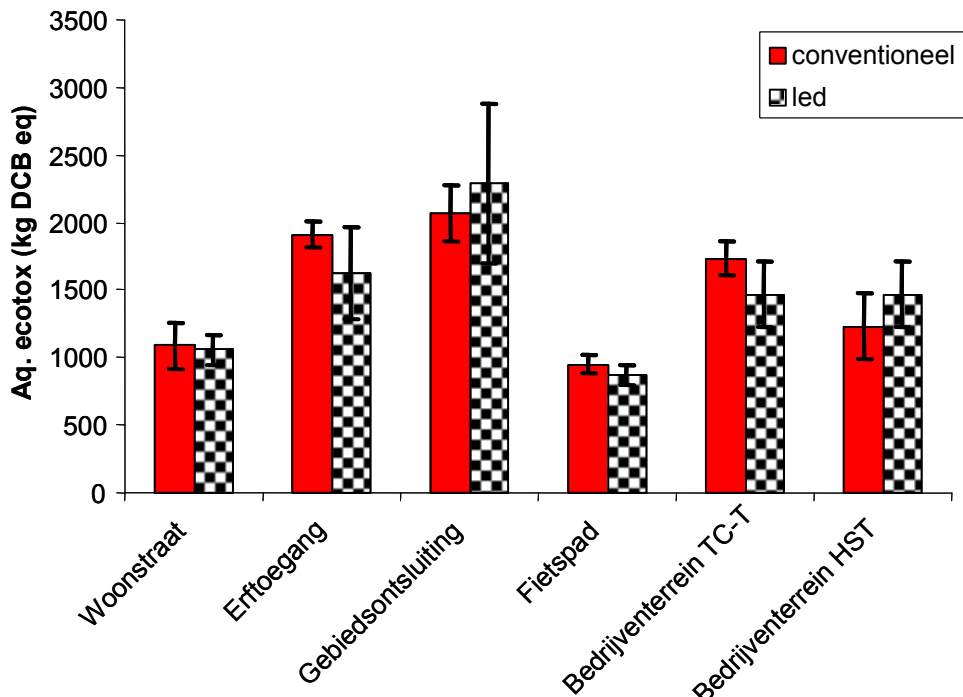
Tabel A8 Materiaal van de led-armatuur (kg) a = polyester b polycarbonaat c acrylaat styreenacrylonitril

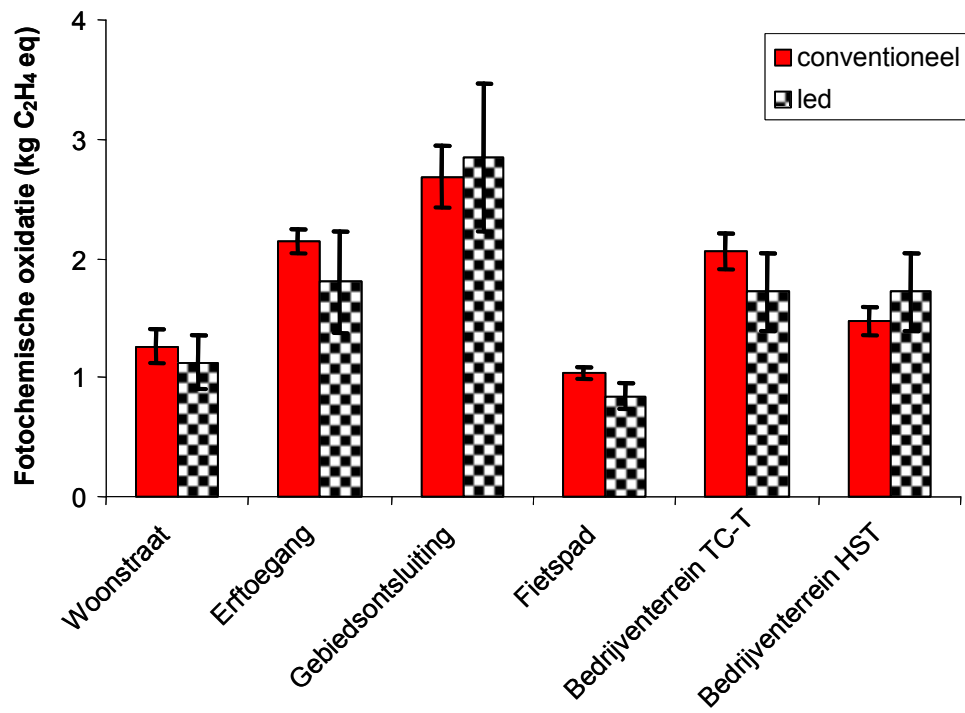
Profiel	Al		ijzer	kunststof			glas	electr
	giet	anod.		a	b	c		
L _{1,1}	3	0,4					0,1	0,3
L _{1,2}	8,8			0,3	0,5		0,1	0,3
L _{1,3}	5,4	1			2		0,1	0,3
L _{1,4}	7,75						0,1	0,15
L _{1,5}	3,5		1,1	0,4	0,7		0,1	0,3
L _{1,6}	4,1		0,8				0,1	0,3
L _{1,7}	4,1		0,8				0,1	0,3
L _{2,1}	15,9	0,2				0,1	0,1?	0,15
L _{2,2}	7		0,8		0,1		0,1	0,3
L _{2,3}	8,75				0,1		0,1	0,15
L _{2,4}	8,8			0,1	0,5	0,2		0,3
L _{2,5}	8,75				0,1			0,15
L _{3,1}	7		0,8		0,1			0,3
L _{3,2}	9,6				0,1			0,3
L _{4,1}	4,1		0,8		0,1			0,3
L _{4,2}	3	0,4					0,8	0,3
L _{4,3}	8,8			0,1	0,5	0,3		0,3
L _{4,4}	7,5	0,2				0,1	0,5	0,2
L _{4,5}	7,75				0,15			0,3
L _{4,6}	3,5		1,1	0,4	0,7	0,1		0,3
L _{5,1}	15,9	0,2	0,8		0,1		0,5	0,3
L _{5,2}	7		0,8		0,1			0,3
L _{5,3}	8,75				0,1			0,15
L _{5,4}	8,75				0,1			0,15
L _{5,5}	8,8			0,1	0,5	0,3		0,3

Annex 3 Life Cycle Impact Assessment









Annex 4 Mesopisch zicht en effectiviteitsfactoren

De berekeningen zijn gebaseerd op gegevens van de lichtontwerpen van bureau De Kruijter voor een vijftal gebieden (woonstraat, fietspad, erftoegangsweg, bedrijventerrein, gebiedsontsluiting). Onderstaande analyse werd door TNO uitgevoerd. Voor elk gebied is een aantal ontwerpen gemaakt met conventionele lichtbronnen (compactfluorescentie, hogedruk natrium) en led-verlichting volgens de verlichtingsklassen S4, S5, S6 en ME4a van de normen voor openbare verlichting (NPR, 2002).

Tabel A9 Soorten lichtbronnen met hun aanduidingen en de toepassingsgebieden. S4, S5 en S6 zijn aanduidingen van de verlichtingsklassen (CEN, 2003, 2004)

Soort lichtbron	Aanduiding	Woonstraat	Fietspad	Erftoegangsweg	Bedrijventerrein	Gebiedsontsluiting
		S5, S6	S5, S6	S4	S4	ME4a
Fluorescentielamp	TC-L/830					
Fluorescentielamp	TC-L/840	X	X	X	X	X
Hogedruk natrium	HST	-	-	-	X	X
LED	LED 3000 K	X	X	X	X	-
LED	LED 5000 K	X	X	X	X	X
LED	LED 5600 K	X	X	X	X	-
LED	LED 6000 K	X	X	X	X	X
LED	LED Ecowhite	X	X	-	-	-

In Tabel A9 staat een overzicht van de lichtbronnen die in de lichtontwerpen zijn toegepast. De fluorescentielamp TC-L/830 (warm wit) werd nergens in de analyse toegepast maar is ter vergelijking meegenomen in de verdere berekeningen.

De mesopische luminantie en de effectiviteitsfactor werden berekend voor alle combinaties van deze lichtbronnen en verlichtingsklassen.

De S/P-ratio

Voor de berekening van de mesopische luminantie met het MOVE-model moet de S/P-ratio van de combinatie van lichtbron en armatuur bekend zijn. De S/P-ratio staat meestal niet in de specificaties van de fabrikanten. In dat geval moet het berekend worden uit de spectrale samenstelling van het licht van de lamp. Aangenomen wordt dat van het armatuurtype de lichtkleur niet verandert en daarom werd de S/P-ratio uitgerekend op basis van de spectrale output van de lichtbronnen. Het is goed om hier te vermelden dat ook de kleurweergave fotopisch wordt bepaald en hiervoor eigenlijk ook een "correctiefactor" nodig is voor mesopisch zicht.

Tabel A10 Lichtbronnen met kleurtemperaturen, S/P-ratio's en kleurweergave

Soort lichtbron	Aanduiding	Kleurtemperatuur T _c (K)	S/P-ratio	Kleurweergave	
				Kleurweergave index Ra ¹	Waardering
Fluorescentielamp	TC-L/830	2981	1,23	81	goed
Fluorescentielamp	TC-L/840	4008	1,56	80	goed
Hogedruk natrium	HST	1965	0,63	28	slecht
LED	LED 3000 K	3000	1,30	70 tot 80	matig tot goed
LED	LED 5000 K	5000	1,74	70 tot 80	matig tot goed
LED	LED 5600 K	5600	1,87	70 tot 80	matig tot goed
LED	LED 6000 K	6000	1,96	70 tot 80	matig tot goed
LED	LED Ecowhite	4152	2,40	29	slecht

De S/P-ratio's voor de verschillende lichtbronnen staan in Tabel A10. De S/P-ratio's van de fluorescentielampen en de hoge druk natriumlamp zijn berekend uit spectrale gegevens die beschikbaar zijn geteld door de fabrikant of in de literatuur te vinden zijn (Hunt, 1991).

In de lichtontwerpen komen zestien verschillende led-armaturen voor van zes verschillende fabrikanten. Op één armatuur na (Ecowhite) zijn al deze armaturen voorzien van witte leds die gebaseerd zijn op een blauwe led in combinatie met een fluorescerende laag. De blauwe leds hebben een golflengte van ongeveer 450 nm en de fluorescerende laag geeft een emissie met een maximum tussen 550 nm en 650 nm. De spectra van de witte leds zijn afkomstig van internet en uit direct contact met fabrikanten. De meeste fabrikanten van led-lampen gebruiken witte leds van Lumileds of Cree.

De kleurweergave index is een getal tussen 1 (zeer slecht) en 100 (uitstekend) en geeft aan in hoeverre kleuren natuurgetrouw door het menselijk oog worden waargenomen. Het Politiekeurmerk Veilig Wonen[®] stelt eisen aan de kleurweergave bij bepaalde lichtintensiteiten.

¹ Door een fabrikant wordt gesteld dat de Ra waarde met meetinstrumenten wordt bepaald die zijn gebaseerd op fotopisch zicht en niet op het menselijk oog onder mesopische zichtomstandigheden. Daardoor zou hun product een te lage Ra waarde bezitten.