

Rapport D.2010.0909.00.R004

IPO Instrument Lichthinder
DGMR - KEMA - Sotto le Stelle

Validatie

Status: DEFINITIEF



Dit rapport is opgesteld door:

dGm^R

KEMA

SOTTO
LE
STELLE
ONDERZOEK EN ADVIES LICHTHINDER

Adviseurs voor bouw, industrie, verkeer, milieu en software

NL^{IND}INGENIEURS

info@dgmr.nl
www.dgmr.nl

Van Pallandtstraat 9-11, Postbus 153
NL-6800 AD Arnhem
T +31 (0)26 351 21 41
F +31 (0)26 443 58 36

Eisenhowerlaan 112, Postbus 82223
NL-2508 EE Den Haag
T +31 (0)70 350 39 99
F +31 (0)70 358 47 52

Morra 2, Postbus 671
NL-9200 AR Drachten
T +31 (0)512 52 23 24
F +31 (0)512 52 25 19

Geerweg 11, Postbus 640
NL-6130 AP Sittard
T +31 (0)46 411 39 30
F +31 (0)46 411 39 31



Colofon

Rapportnummer:	D.2010.0909.00.R004	
Plaats en datum:	Den Haag, 15 maart 2011	
Versie:	003	Status: DEFINITIEF
Opdrachtgever:	Interprovinciaal overleg Postbus 16107 2500 BC DEN HAAG	
Opdrachtnummer:	MIL 03991/2010	
Contactpersoon:	Mevrouw ir. M.J. van Asten/Provincie Utrecht	
Telefoon:	030 258 91 11	
Fax:	030 258 24 24	
E-mail:	marian.van.asten@provincie-utrecht.nl	
Uitgevoerd door:	DGMR Software B.V.	
Informatie:	ing. R.G. (Richard) Schmidt	
E-mail:	sd@dgmr.nl	
Telefoon:	070 350 39 99	
Fax:	070 358 47 52	
Auteur(s):	DGMR - ing. R.G. (Richard) Schmidt KEMA - ing. H. (Henk) Spoelstra Sotto le Stelle - drs. W. (Wim) Schmidt	
Eindverantwoordelijke: Voor deze:	ing. S.E. (Erwin) Hartog van Banda ing. R.G. (Richard) Schmidt	
Verwerkt door:	SD SBA	

©DGMR Software B.V., Ministerie I&M en IPO Alle rechten voorbehouden. Wilt u (delen van) dit rapport kopiëren of vermenigvuldigen, vraagt u dan schriftelijk toestemming daarvoor bij DGMR Software B.V.

Inhoudsopgave

Pagina

1. INLEIDING.....	4
2. VALIDATIE HEMELHELDERHEID.....	5
2.1 Inleiding.....	5
2.2 Validatie.....	5
3. VALIDATIE HORIZON	14
3.1 Probleemstelling	14
3.2 Maximale afstand waarop een lamp te zien is	14
3.3 Stemmen waarnemingen overeen met de gevonden waarden?.....	17

Bijlage 1: meetmethode hemelhelderheid Sotto le Stelle

Bijlage 2: meetlocaties en meetresultaten

Bijlage 3: metingen horizonvervuiling

1. Inleiding

In dit rapport wordt een beperkte validatie van het opgeleverde IPO Licht-rekeninstrument beschreven. De validatie betreft de hemelhelderheid en de horizonvervuiling.

Door Sotto le Stelle zijn op een aantal locaties rondom Tiel en Andelst metingen aan de hemelhelderheid uitgevoerd. Daarnaast zijn metingen in de buurt van Eemnes uitgevoerd aan de helderheid van armaturen ten behoeve van de vergelijking de resultaten voor horizonvervuiling.

Voor de vergelijking met de gemeten waarden van de hemelhelderheid zijn in het rekeninstrument brongebieden aangemaakt en precies op de meetlocaties zijn de waarden berekend. Hiermee zijn vergelijkingen uitgevoerd.

Voor de validatie van de berekende waarden voor de horizonvervuiling zijn op verschillende afstanden van armaturen de helderheid van de lichtbron van de armaturen gemeten.

2. Validatie hemelhelderheid

2.1 Inleiding

De uitkomsten van het rekenmodel zijn beperkt gecontroleerd (gevalideerd) met daadwerkelijke metingen van de hemelhelderheid op een aantal locaties rond Tiel en Andelst. De metingen zijn uitgevoerd door Sotto le Stelle. De meetmethode is beschreven in bijlage 1.

De meetpunten zijn ingevoerd in het IPO-rekenmodel en er zijn brongebieden aangemaakt, waarna een vergelijking tussen de gemeten en berekende waarden is uitgevoerd.

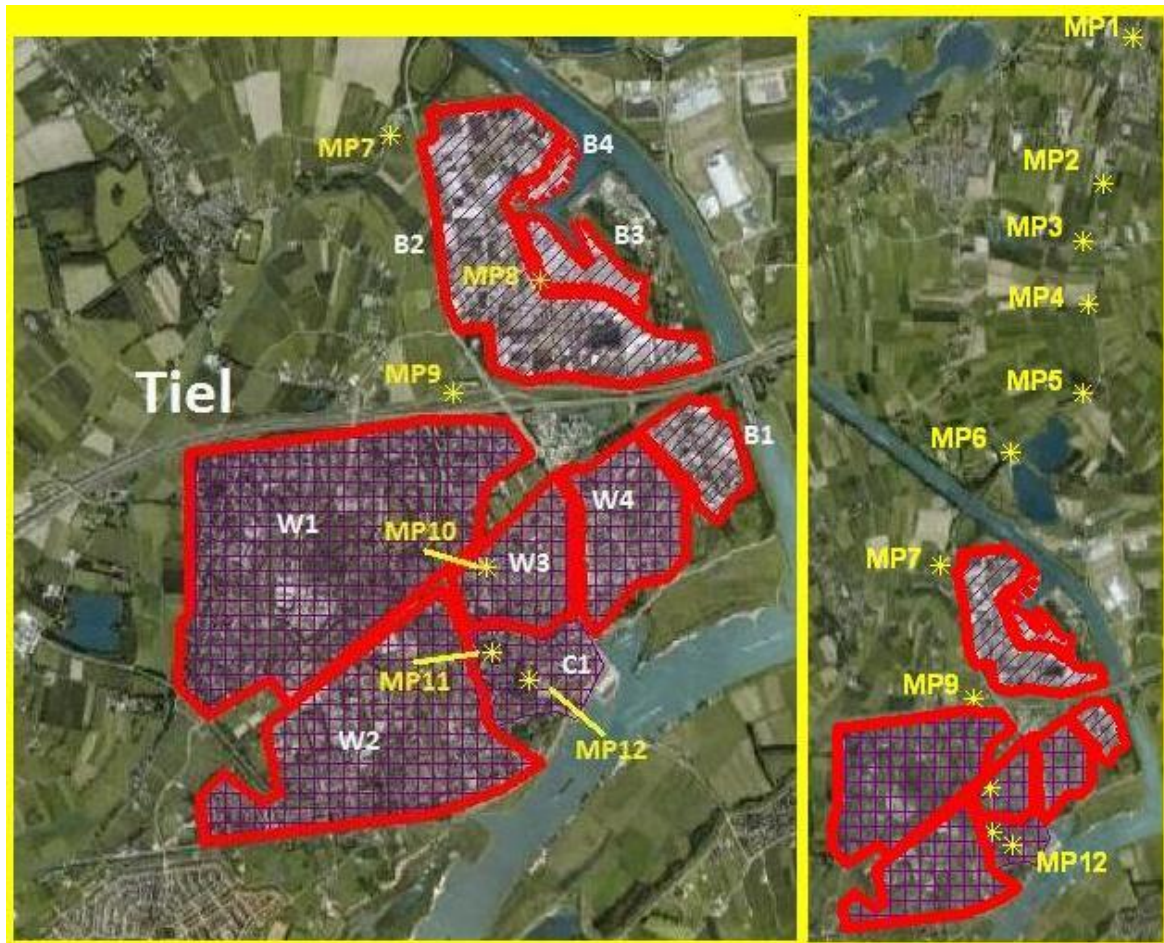
2.2 Validatie

2.2.1 Meetlocaties

Er zijn metingen in en rondom Tiel en bij een bedrijventerrein nabij Andelst uitgevoerd. In bijlage 2 staan de meetpunten met coördinaten en gemeten waarden getabelleerd.

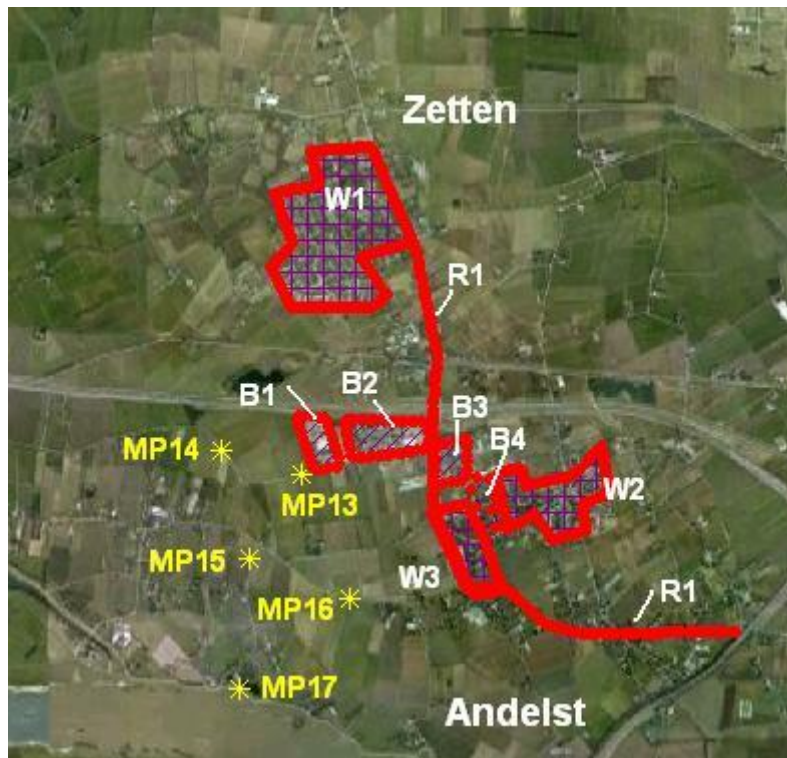
2.2.2 Aanmaken gebieden in het rekenmodel

Er zijn voor beide locaties (Tiel en Andelst) in het rekenmodel verschillende typen brongebieden aangemaakt. In figuur 1 is dit voor Tiel en omgeving weergegeven. En in figuur 2 voor Andelst en omgeving.



Figuur 1: aangemaakte brongebieden en meetpunten (linker figuur alleen Tiel in meer detail en in de rechter figuur ook de overige meetpunten daar verder buiten)

In figuur 1 zijn zowel de meetpunten (gecodeerd met MP) als de aangemaakte brongebieden (W voor Woonwijk, C voor Centrum en B voor Bedrijventerrein) aangegeven.



Figuur 2: aangemaakte brongebieden en meetpunten te Andelst en omgeving

In figuur 2 zijn de meetpunten en aangemaakte brongebieden aangegeven (meetpunten gecodeerd met MP, de woonwijken met W, B voor Bedrijventerrein en R (Road) voor de wegen).

In tabellen 1 en 2 zijn de kenmerken van de brongebieden, voor Tiel en Andelst, zoals deze in het model zijn ingebracht weergegeven. Hiervoor zijn diverse scenario's gebruikt, waarin verschillende instellingen voor de brongebieden zijn toegepast.

Tabel 1
Gemodelleerde brongebieden Tiel

brongebied		scenario T1	scenario T2	scenario T3	scenario T4	scenario T5	scenario T6	scenario T7
woonwijk	W1	eensgezins 1.5 lux	idem	idem	eensgezins 1.5 lux	idem	idem	idem
	W2	eensgezins 1.5 lux	idem	appartem. 2 lux	eensgezins 1.5 lux	idem	idem	appartem. 2 lux
	W3	eensgezins 1.5 lux	idem	appartem. 2 lux	eensgezins 1.5 lux	idem	idem	appartem. 2 lux
	W4	eensgezins 1.5 lux	idem	appartem. 2 lux	eensgezins 1.5 lux	idem	idem	appartem. 2 lux
centrum	C1	klassieke lantaarn	kegel-armatuur	idem	klassieke lantaarn	idem	idem	kegelarmatuur
bedrijven-terrein	B1	gemengd (aangepast) niet bebouwd 25%, verlicht 25%	idem	idem	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	idem	distributie niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°	idem
	B2	gemengd (aangepast) niet bebouwd 25%, verlicht 25%	idem	idem	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°	distributie (aangepast) niet bebouwd 25%, verlicht 25% schijnwerper tilthoek 0°
	B3	gemengd (aangepast) niet bebouwd 75%, verlicht 25%	idem	idem	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	idem	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°	idem
	B4	gemengd (aangepast) niet bebouwd 75%, verlicht 25%	idem	idem	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	idem	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°	idem

Tabel 2
Gemodelleerde brongebieden Andelst

brongebied		scenario A1	scenario A2	scenario A3
woonwijk	W1	eensgezins 2 lux	idem	idem
	W2	eensgezins 1,5 lux	idem	idem
	W3	eensgezins 1,5 lux	idem	idem
weg	R1	gemengd verkeer (integraal) modern	idem	idem
bedrijven- terrein	B1	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	gemengd (aangepast) niet bebouwd 51%, verlicht 100%	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°
	B2	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	gemengd (aangepast) niet bebouwd 51%, verlicht 100%	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°
	B3	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	gemengd (aangepast) niet bebouwd 51%, verlicht 100%	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°
	B4	gemengd (standaard) niet bebouwd 51%, verlicht 75%	gemengd (aangepast) niet bebouwd 51%, verlicht 100%	distributie (standaard) niet bebouwd 41%, verlicht 75% schijnwerper tilthoek 0°

2.2.3 Vergelijking met metingen

Voor de vergelijking tussen de metingen en berekende waarden is het van belang de natuurlijke hemelhelderheid van de gemeten waarden af te trekken. Immers het model berekent de ***bijdrage*** van brongebieden aan de hemelhelderheid. Daartoe zijn de gemeten waarden verminderd met een waarde voor de natuurlijke hemelhelderheid van 0,25 mcd/m².

Bij een eerste vergelijking tussen de berekende waarden en de meetwaarden bleek bij meetlocatie (meetpunt 8) op het bedrijventerreinen in Tiel de waarde ongeveer een factor 2 te hoog te zijn. Ongeacht de keuze mogelijkheden bleek het niet mogelijk het verschil substantieel te verkleinen. Bij nadere evaluatie bleek dat het percentage voor 'overige verlichting' bij bedrijventerreinen aan de hoge kant is. Dit is ook de meest onzekere factor. Daarnaast wordt het opslagpercentage berekend over alle verlichting (inclusief openbare verlichting). Beide zijn dan de verklarende reden voor een te hoge berekende waarde. Om de berekende waarden in lijn te brengen met de gemeten waarden is voor alle typen bedrijventerreinen het percentage overige verlichting op 10% gesteld. Bij een eventuele toekomstige uitbreiding van het model wordt aanbevolen voor meer verschillende typen bedrijventerreinen een vergelijking tussen berekende en gemeten waarden uit te voeren.

Op de meetlocaties (meetpunten Tiel 1 - 6 en Andelst 13 en 15 - 17) die buiten de brongebieden liggen, zijn lager dan de gemeten waarden. Naarmate de meetpunten verder van het brongebied weg liggen zijn de waarden ook steeds lager. Dit komt doordat in de buitengebieden alle lichtbrongebieden in de wijde omgeving bijdragen aan de hemelhelderheid. Om dit goed te modelleren zouden dus alle brongebieden in de wijde omgeving ingevoerd dienen te worden, hetgeen ondoenlijk is. Bedacht moet worden dat dit rekeninstrument bedoeld is om de ***bijdrage*** van een brongebied aan de hemelhelderheid op een bepaalde locatie te berekenen en niet om de hemelhelderheid zelf op een willekeurige plek in Nederland te bepalen.

In tabel 3 zijn de gemeten en berekende waarden weergegeven (na aanpassing van het model voor het percentage overige verlichting van de bedrijventerreinen), waarbij de meetpunten met de lagere waarden buiten de brongebieden in grijs zijn aangegeven.

Tabel 3
 Gemeten en berekende waarden Tiel (na aanpassing van het model)

meetpunt	bijdrage in mcd/m ²							
	meting	scenario's						
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1 ¹⁾	0,51	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
2 ¹⁾	0,60	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
3 ¹⁾	0,55	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
4 ¹⁾	0,56	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,07	0,07
5 ¹⁾	0,62	0,11	0,11	0,11	0,13	0,14	0,12	0,11
6 ¹⁾	0,76	0,19	0,18	0,19	0,22	0,25	0,22	0,19
7	0,98	0,51	0,51	0,53	0,67	0,75	0,66	0,52
8	1,84	1,52	1,51	1,55	2,09	2,24	2,04	1,59
9	1,22	0,86	0,85	0,93	1,02	1,10	1,00	0,88
10	1,34	1,14	1,11	1,25	1,19	1,23	1,18	1,21
11	1,45	1,20	1,08	1,16	1,23	1,25	1,22	1,18
12	1,33	1,13	0,99	1,05	1,16	1,18	1,14	1,06

¹⁾ Gemeten en berekende waarden alleen ter informatie (zie tekst voor nadere toelichting).

Wanneer de standaardtilthoek van 30° wordt gekozen, is de bijdrage op meetpunt 8 gelijk aan 5.44 mcd/m². Dit is erg hoog en niet realistisch.

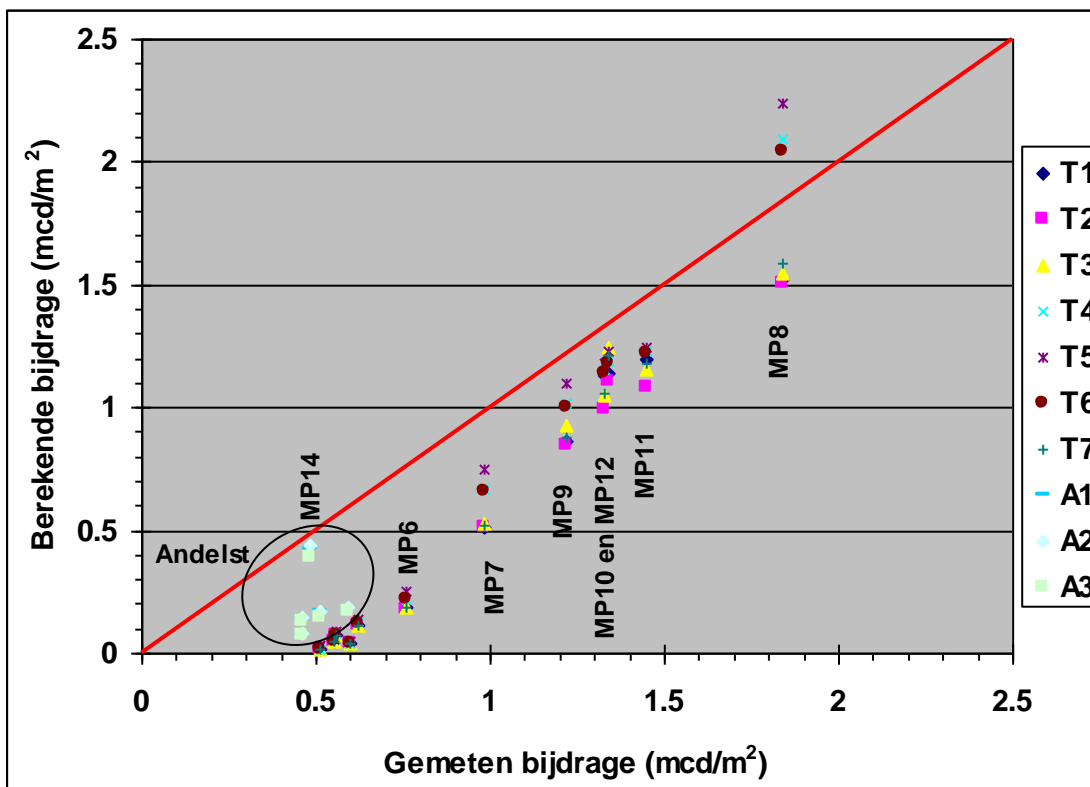
Tabel 4
 Gemeten en berekende waarden Andelst (na aanpassing van het model)

Meetpunt	bijdrage in mcd/m ²			
	meting	scenario's		
		A1	A2	A3
13 ¹⁾	0,59	0,18	0,19	0,17
14	0,48	0,42	0,44	0,39
15 ¹⁾	0,46	0,14	0,15	0,13
16 ¹⁾	0,51	0,17	0,17	0,15
17 ¹⁾	0,46	0,07	0,08	0,07

¹⁾ Gemeten en berekende waarden alleen ter informatie (zie tekst voor nadere toelichting).

2.2.4 Evaluatie van de vergelijking

Voor een vergelijking van de berekende en gemeten bijdragen zijn in figuur 3 de resultaten van zowel Tiel als Andelst grafisch weergegeven.



Figuur 3: resultaten tussen de gemeten bijdrage en de berekende bijdrage

Op de horizontale X-as zijn de gemeten bijdragen weergegeven (daarbij zijn de meetpuntnummers in de figuur aangegeven). Op de verticale Y-as staan de berekende bijdragen voor de verschillende scenario's. In de cirkel staan de resultaten van de berekeningen en metingen te Andelst. Op de verticale Y-as staan de berekende bijdragen voor de verschillende scenario's.

De figuur laat zien dat de orde van grootte de berekende waarden en meetwaarden op de meetlocaties in Tiel op het bedrijventerrein, in de woongebieden en het centrum goed met elkaar in overeenstemming zijn (meetpunten 8, 9, 10, 11 en 12). Ook de resultaten van meetpunt 14 te Andelst liggen dicht bij de rode 1:1-lijn (berekend = gemeten).

In de verticale richting in de figuur variëren de resultaten logischerwijs, afhankelijk van het scenario. Men dient zich te realiseren dat het model uitgaat van standaardsituaties met moderne openbare verlichting. In werkelijkheid is dit niet het geval. Daarnaast zijn er zowel in het lichtbronnenonderzoek als bij het opstellen van de modelleringsmethodiek verscheidende aannames gedaan, om de werkelijkheid te benaderen. Ondanks dit alles blijkt dat bij deze eerste validatie dat de berekende waarden (zeer) goed overeenstemmen.

Zoals al eerder is aangegeven: op de meetlocaties (meetpunten Tiel 1 - 6 en Andelst 13 en 15 - 17) die buiten de brongebieden liggen, zijn lager dan de gemeten waarden. Naarmate de meetpunten verder van het brongebied weg liggen zijn de waarden ook steeds lager. Dit komt doordat in de buitengebieden alle lichtbrongebieden in de wijde omgeving bijdragen aan de hemelhelderheid. Om dit goed te modelleren zouden dus alle brongebieden in de wijde omgeving ingevoerd dienen te worden, hetgeen ondoenlijk is. Bedacht moet worden dat dit rekeninstrument bedoeld is om de **bijdrage** van een brongebied aan de hemelhelderheid op een bepaalde locatie te berekenen en niet om de hemelhelderheid zelf op een willekeurige plek in Nederland te bepalen.

Wanneer de meetpunten die verder van de brongebieden afliggen buiten beschouwing worden gelaten, blijkt voor de meetpunten binnen de bebouwing en direct bij bebouwing (meetpunten 8 - 12 en 14) de relatieve afwijking tussen gemeten en berekende bijdragen < 15% te zijn. Dit kan als een zeer goed resultaat worden beschouwd, voor een eerste rekeninstrument op basis van vuistregels.

Het verdient aanbeveling om de validatie in de toekomst uit te breiden voor grotere steden, sportvelden en verschillende soorten bedrijventerreinen. Daarnaast dient ook te worden nagegaan hoe de hemelhelderheid (absolute waarde en niet de bijdrage) berekend kan worden op punten die buiten de bebouwing liggen.

3. Validatie horizon

3.1 Probleemstelling

We willen gaan onderzoeken hoe we een lamp in de verte zien. Als een lamp dichtbij is, is hij sterker en dat neemt langzaam af als je ervan af gaat. Dat gaat kwadratisch want de oppervlakte die de lamp beslaat, neemt kwadratisch met de afstand af.

Verder is er een extra verzwakking die te maken heeft dat de atmosfeer niet onbeperkt doorzichtig is. Dat wordt in het Nederlands uitgedrukt met de term zicht. Ons model rekent uit hoeveel licht er bij elk zicht van een lamp nog te zien is op elke afstand. Daarbij wordt ingevoerd van elke armatuur hoeveel licht er horizontaal uitgaat en hoe sterk dat op verschillende afstanden te zien is.

We hebben het probleem dat de theorie overdag redelijk goed bekend is maar 's nachts toch weer anders in elkaar zit. Ook de metingen van lampen is iets dat nog nooit uitgevoerd is en levert problemen op. Er is een poging uitgevoerd om mogelijk alle losse eindjes aan elkaar te knopen maar de validatie is nog niet volledig afgerond.

Een eerste probleem is dat moeilijk in de praktijk te bepalen is tot hoever je een lamp kan zien. Als we dat weten dan kunnen we tussenliggende afstanden gaan indelen en ook bekijken of het model berekent wat we ook meten.

Validatie bestaat dus uit twee onderdelen:

1. Wat is de maximale afstand waarop we een lamp met een bepaalde sterkte en een bepaald armatuur nog kunnen zien?
2. Stemmen de waarden die we meten overeen met de waarnemingen.

3.2 Maximale afstand waarop een lamp te zien is

Wat is de maximale afstand waarop we een lamp met een bepaalde sterkte en een bepaald armatuur nog kunnen zien?

Allereerst is er het probleem dat de aarde gekromd is en je dus niet om een hoek kan kijken. Hieronder is in een tabel uitgezet welke afstand in kilometers een waarnemer op een bepaalde hoogte een object op een bepaalde hoogte kan zien. We zien dat een waarnemer met zijn ogen op 2 meter nog tussen de 17 en 20 kilometer lampen op masten tussen de 10 en 15 meter kan zien.

Tabel 5

Maximale afstand in kilometers waarop een lamp te zien is door de kromming van de aarde

hoogte waarnemer in meters	hoogte van de lamp in meters								
	0	1	2	3	4	5	10	15	20
1	3,7	7,4	8,9	10,1	11,1	12,0	15,4	18,0	20,2
2	5,2	8,9	10,5	11,6	12,6	13,5	16,9	19,6	21,8
5	8,3	12,0	13,5	14,7	15,7	16,5	20,0	22,6	24,8
10	11,7	15,4	16,9	18,1	19,1	20,0	23,4	26,0	28,2
20	16,5	20,2	21,8	23,0	23,9	24,8	28,2	30,9	33,1

De uiterste afstand ligt dus ongeveer bij 15 tot 20 kilometer.

Deze gegevens zijn ontleend aan een rijke bron voor informatie over deze materie 'Navguide'. Dit is een gids die de IAMA, the Association of Marine Aids, uitgeeft. Deze organisatie heeft natuurlijk al eeuwenlang ervaring met hoe een lamp op grote afstand 's nachts nog te zien is. Ook zij werken met horizontale problemen, wat verschilt van de luchtvaart die ook verticale afstanden in aanmerking moet nemen. Maar kun je een lamp op een afstand van 15 tot 20 kilometer echt nog zien en een kaars ook?

De IAMA geeft aan dat een lamp nog te zien is als die een verlichtingssterkte van 0,2 microlux geeft. Hieronder is voor verschillende lichtsterkten de afstand aangegeven waarbij een lamp nog te zien is. Hierbij wordt door de IAMA een transmissie van 0,74 aangehouden. Voor Nederland hanteren we toevallig ongeveer dezelfde maat per kilometer en dus kunnen we onderstaande tabel opvatten voor Nederland als een kilometertabel¹.

Table 3.5 IALA conversion table for Luminous Intensity and Nominal Range for night observations .
This assumes an atmospheric transmissivity of T=0.74 and a threshold of illumination of 0.2 microlux.

Nominal Range nautical miles	Luminous Intensity candela	Nominal Range nautical miles	Luminous Intensity candela
1	0.9	12	3600
1.5	2.4	13	5700
2	5	14	8900
2.5	9	15	14000
3	15	16	21000
3.5	24	17	32000
4	36	18	49000
4.5	53	19	73000
5	77	20	110000
6	150	21	160000
7	270	22	240000
8	480	23	360000
9	820	24	520000
10	1400	25	770000
11	2200	26	1100000

Figuur 4: tabel

Als we dit mogen geloven dan is een lamp van 150 candela op een afstand tot 6 kilometer te zien en een kaars van 1 candela nog op een afstand tot 900 meter.

3.2.1 Extinctie en zicht

Lampen en kaarsen kunnen we in de praktijk veel minder ver zien. Dat komt omdat een deel van licht tegengehouden wordt. Vlak bij de grond zijn er veel moleculen en stofdeeltjes. In Nederland wordt dat uitgedrukt door het begrip zicht. Het zicht in Nederland wordt een zicht van

¹ In Nederland is de transmissie 0.77 per kilometer. Dat is af te leiden uit de formule: extinctie= e tot de macht (-3maal afstand/normzicht). Als we hier 1 kilometer voor de afstand invullen volgt een transmissie van 0.7686 per kilometer bij normzicht.)

11.400 meter als normzicht beschouwd. Op deze afstand is de transmissie van de atmosfeer verlaagd tot 5% en met dat contrast kun je overdag nog net een zwart vlak zien.

Op deze manier was oorspronkelijk het zicht gedefinieerd. Het zicht werd vroeger gemeten door te kijken tot welke afstand een zwart vlak dat hoog bevestigd was nog te onderscheiden was van de omgeving.

Tegenwoordig gebeurt dit met een precies geijkte lamp die in een bepaalde richting uitstraalt waarvan gemeten wordt hoeveel van het licht door een bepaalde horizontale lichtkolom gaat. Je kunt het zicht van een groot aantal weerstations in Nederland van de laatste 24 uur opvragen op: <http://www.weer.nl/nl/home/weer/10-minuten-waarnemingen.html>

De relatie tussen zicht en afstand staat aangegeven in de volgende tabel, die de transmissie door de atmosfeer aangeeft.

Tabel 6
 Relatie tussen zicht en afstand

	zicht	zicht	zicht	zicht	zicht	zicht	zicht	zicht
afstand	1.000	2.000	4.000	8.000	11.400	15.000	20.000	25.000
1.000	0,049787068	0,22313	0,472367	0,687289	0,768621	0,818731	0,860708	0,88692
2.000	0,002478752	0,049787	0,22313	0,472367	0,590778	0,67032	0,740818	0,786628
5.000	3,05902E-07	0,000553	0,023518	0,153355	0,268262	0,367879	0,472367	0,548812
10.000	9,35762E-14	3,06E-07	0,000553	0,023518	0,071965	0,135335	0,22313	0,301194
11.400	1,40323E-15	3,75E-08	0,000194	0,013912	0,049787	0,102284	0,180866	0,254616
15.000	2,86252E-20	1,69E-10	1,3E-05	0,003607	0,019305	0,049787	0,105399	0,165299

De tabel geeft de verzwakking aan van het licht door de atmosfeer bij een bepaald zicht. De getallen komen uit de volgende formule:

Formule 1
$$\text{verzwakking} = e^{-3 \cdot D / \text{zicht}}$$

Horizontaal staat het zicht aangegeven en verticaal de afstand waarop je iets waarneemt. In de tabel wordt het deel aangegeven dat dan overblijft, bij die afstand en dat zicht.

Te zien is dat bij een zicht van 1.000 meter (mistig) 0,049 deel (bijna 5%) van het licht nog op 1.000 meter te zien is. Dat is dus overdag net de grens van wat je zou kunnen zien. Als het helder is met een zicht van 25 kilometer is er nog 88 % over na een kilometer.

Als we de kwadratische afname verbinden met de verzwakking komen we op formule 2.

Voor een willekeurige lichtbron van cd_0 candela geldt de volgende formule:

Formule 2
$$cd_{\text{veid}} = \frac{cd_0}{D^2} * e^{-3 \cdot D / \text{zicht}}$$

Waarin:

- cd_{veid} de gemeten lichtsterkte op afstand D
- cd_0 de originele lichtsterkte van de lamp in horizontale richting
- D afstand waarop de lamp waargenomen wordt

Het zicht wordt ook 's nachts bijgehouden en die verwerken we met de bovenstaande gegevens voor 1 candela. Zonder extinctie zouden we een kaars op 711 meter nog zien. Dat is dus nog net te zien. Bij normzicht blijkt dat 650 meter te zijn.

$$cd_0 \quad cd_{veld} = \frac{cd_0}{D^2} * e^{-3 \cdot D / \text{zicht}} \quad cd_{veld} \quad cd_0$$

Als we het voorbeeld van de IAMA weer overnemen dan komt er uit dat de lamp van 150 candela maximaal over 6.400 meter kunnen zien. Alle formules lijken dus in de zelfde richting te wijzen en we mogen ervan uitgaan dat de redenering tot nu toe klopt.

Hieruit bepalen we ook dat een kaars op 1.000 meter afstand een magnitude heeft van 0,75 bij uitstekend zicht en van 1,03 als er normzicht is. Daarmee kunnen we ook de ondergrens van de lichtsterkte berekenen wanneer we nog een lamp kunnen zien. Dat blijkt 2,35 magnitude te zijn.

Dat is de absolute ondergrens waarbij we soms wel een lamp en soms niet een lamp zouden kunnen zien en ook met perifere deel van onze ogen. Dat is in de praktijk niet werkbaar en daarom hebben we een lichtsterkte van een lamp die we nog net kunnen zien gesteld op 10^{-7} candela. Dat is de laagste waarde.

De hoogste waarde ligt in de orde van 5.000 candela als je vlak bij een lamp recht in de lamp kijkt. We hebben dus een enorm verschil.

We stellen zes klassen voor. Dat lijkt nog een aantal waarin de verschillen te onderscheiden zijn.

Tabel 7
 Klassen

magnitudes	candela	klasse	beschrijving	andere beschrijving
< 2,3	< 10^{-7}	0	net wel/niet zichtbaar	
2,2 tot -2,2	10^{-7} tot $6,3 \cdot 10^{-6}$	1	zwak	als sterretjes
-2,2 tot -6,6	$6,3 \cdot 10^{-6}$ tot $4 \cdot 10^{-4}$	2	zichtbaar	
-6,6 tot -11	$4 \cdot 10^{-4}$ tot $2,5 \cdot 10^{-2}$	3	goed zichtbaar	
-11 tot -15,4	$2,5 \cdot 10^{-2}$ tot 1,58	4	helder	als volle maan
> -15,4	> 1,58	5	zeer helder	verblindend

3.3 Stemmen waarnemingen overeen met de gevonden waarden?

Om na te gaan of de waarnemingen overeen stemmen met de modelwaarden, zijn er metingen uitgevoerd aan een lamp op de A1 bij Baarn. Het land naar het noorden toe is open, vlak en breed. De A1 bij Baarn kan al gezien worden als je op de A27 rijdt van Almere naar Utrecht op de brug over het Eemmeer. Dat is een afstand van bijna 9 kilometer. In Nederland lukt het nauwelijks om locaties te vinden waar verder gekeken kan worden.

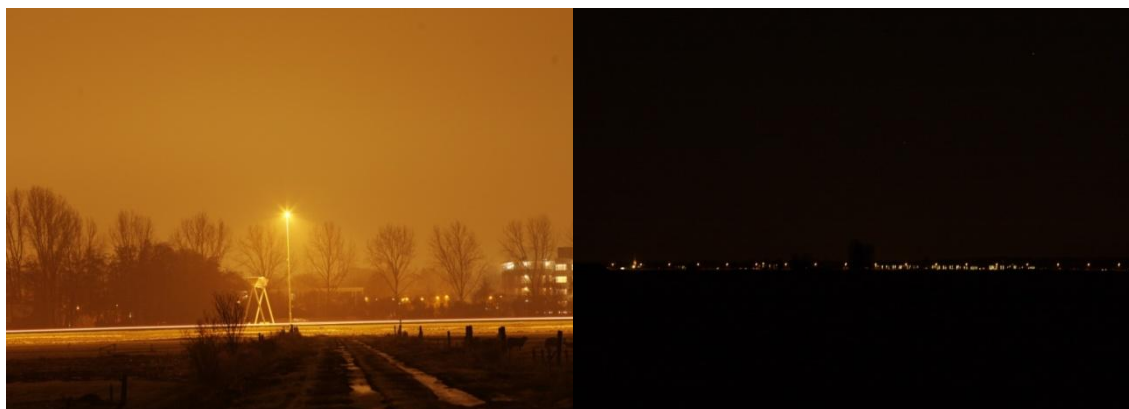
Er zijn metingen uitgevoerd op de rood aangegeven wegen, de Ervenweg en de Oostermeent in Eemnes (zie figuur 2). De eerste weg loopt netjes loodrecht op de A1 en de lamp in kwestie staat precies in het verlengde van de Ervenweg zodat de gegevens simpel te herleiden zijn.

Van Rijkswaterstaat² zijn de gedetailleerde gegevens verkregen van de lampen op de A1.



Figuur 5: situatietekening uitgevoerde metingen

Hieronder staan twee foto's respectievelijk gemaakt op 540 meter en 7.300 meter. Dat zijn de twee uiterste waarden waar gemeten is.



Figuur 6: foto's van de twee uiterste meetlocaties

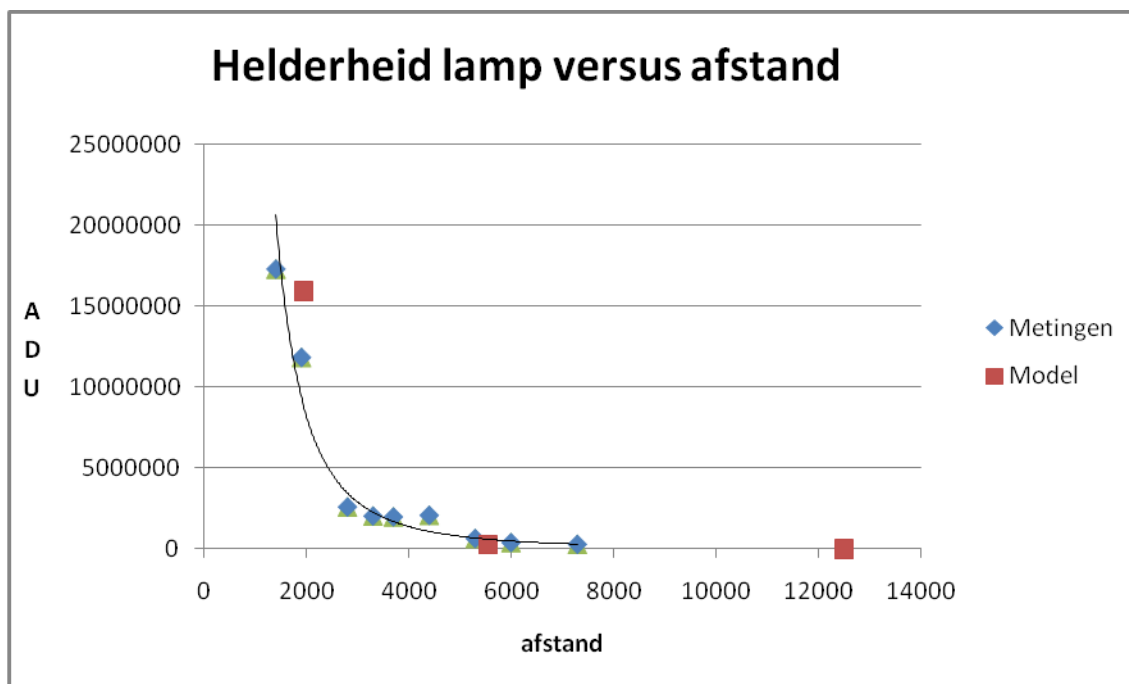
Er is op één nacht op tien locaties gemeten. Er zijn foto's genomen van de lampen en tevens van Sirius, de helderste ster, die laag in dezelfde richting in de hemel die nacht aanwezig was. Tevens zijn er luminantiemetingen uitgevoerd op de afstanden waar dit nog mogelijk was (tot 3 kilometer; daarboven kon de lamp waar het om ging niet meer gemeten worden). De resultaten van de luminantiemetingen zijn niet verwerkt. Daar bleek geen zinnig resultaat uit te komen. De standaardmanier werkt goed voor afstanden tot een paar honderd meter. Dezelfde methode uitbreiden naar afstanden boven een kilometer lijkt geen zinnige resultaten op te leveren.

² Van Ton van Midden van Rijkswaterstaat midden Nederland een gedetailleerde kaart gekregen van het wegstuk A1 van Eemnes naar Hoevelaken. Op kaart DR000469 armatuur nummer 533 is. De armaturen zijn van het type SGS 306 van Philips op 18 meter masten met 250 watt lampen.

Resultaten foto's

De foto's zijn gekalibreerd met zogenaamde darks. Daarna is via een astronomisch softwarepakket (AIP2) via photometrie single star de zogenaamde ADU-waarde van de lamp gemeten.

De resultaten staan in de volgende grafiek met horizontaal de afstand en verticaal ADU-waarde.



Figuur 7: helderheid lamp versus afstand

Tevens zijn in de grafiek de waarden opgenomen die met IPOlicht verkregen zijn met drie overgangen van de ene klasse naar een andere. De transformatie van de candelawaarden naar de ADU-waarden is, verkregen door Sirius, als standaard te nemen. Bekend is hoe hoog hij stond en hoe helder hij was.

Het model en de waarnemingen zijn goed met elkaar in overeenstemming. De waarden op grote afstand passen precies. De waarde op 2 kilometer afstand wijkt enigszins af. De lamp wordt op die afstand meer als een vlekje dan als een punt afgebeeld en de sterrenkundige techniek die wordt gebruikt wordt dan onnauwkeurig.

Daarmee is de validatie van alle andere armaturen ook in orde. Aangezien de gegevens betreffende de overige armaturen op dezelfde manier verwerkt worden en de wiskunde achter de resultaten van de horizon vervuiling relatief simpel en straight forward is, kunnen we ervan uitgaan dat de resultaten die met het model verkregen worden in overeenstemming zijn met de waarnemingen.

Bijlage 1

Meetmethode hemelhelderheid Sotto le Stelle

Sotto le Stelle heeft een keuze gemaakt voor de toepassing van fotografische opnamen van de hemel met een fotoestel met CMOS-chip. In de astronomie worden voor dit doel gekoelde CCD's toegepast, echter deze worden meestal in een vaste opstelling gebruikt, met de nodige randapparatuur. Dit is voor de toepassing in het vrije veld en mobiele metingen te omslachtig en beperkend. Met de gekozen toepassing door Sotto le Stelle, is de apparatuur en verwerkingsprocedure veel eenvoudiger en kan er op veel meer plaatsen binnen de beschikbare tijd gemeten worden.

Onderbouwing

Sotto le Stelle heeft deze methode overgenomen van P. Cinzano en F. Falchi³. De methode is grotendeels ontleend aan het werk van deze beroepsastronomen en de praktische uitwerking is met hen doorgenomen. Ook is het werk dat een andere sterrenkundige, J. Hollan uit Tsjechië, uitgevoerd heeft naar de effecten van extinctie op de hemelhelderheid in de procedure meegenomen. Zijn methode om de extinctie in sterk verlichte landen zoals Nederland te verwerken is integraal overgenomen⁴. Ook astronoom Hähnel in Osnabrück past dezelfde techniek toe om de situatie het Ruhrgebied in kaart te brengen.



Bovenstaande wil niet zeggen dat hiermee het laatste woord over het meten van de hemel gezegd is. Het aantal mensen dat hiermee bezig is, is gering en ook de ontwikkeling van de meetapparatuur gaat snel. Er is een redelijke kans dat de methodiek in de nabije toekomst nog aangepast gaat worden. De gegevens zoals die nu verzameld zijn met deze methodiek vormen echter het best denkbare dat op dit moment uitvoerbaar is.

³ <http://www.lightpollution.it/cinzano/en/sbeam2.html>

⁴ <http://amper.ped.muni.cz/light>

Bijlage 2

Meetlocaties en meetresultaten

Tiel	Amerfoortse coördinaten		Locatie	Meetwaarden	Bijdrage ¹⁾
	Meetpunt	X		Y	mcd/m ²
1	159715	442922	Veenweg	0,76	0,51
2	159367	441140	Dwarsweg	0,85	0,60
3	159101	440441	N320	0,80	0,55
4	159182	439670	Haagweg	0,81	0,56
5	159115	438575	Beldertseweg	0,87	0,62
6	158215	437843	Mauriksestraat	1,01	0,76
7	157371	436448	Lingeweg	1,23	0,98
8	158337	435498	Zuiderhavenweg	2,09	1,84
9	157771	434830	Staartsestraat	1,47	1,22
10	157971	433737	Jan D. van Zeeuwenstraat	1,59	1,34
11	158010	433194	Sint walburg	1,70	1,45
12	158243	433021	Achterweg	1,58	1,33

Andelst	Amerfoortse coördinaten		Locatie	Meetwaarden	Bijdrage ¹⁾
	Meetpunt	X		Y	mcd/m ²
13	177165	435984	Engelandstraat	0,84	0,59
14	176561	436159	Engelandstraat (2)	0,73	0,48
15	176772	435350	Horstweg	0,71	0,46
16	177521	435050	Tielsestraat	0,76	0,51
17	176684	434362	Waalbandijk	0,71	0,46

De bijdrage is berekend als de meetwaarde minus de natuurlijke hemelhelderheid van 0.25 mcd/m².

Metingen horizonvervuiling

Tijd: nacht van 14 op 15 december 2010 van 00.00 uur tot 01:30 uur.

Helder, zichtwaarden van De Bilt.

Afstand is de afstand tot lantaarnpaal op locatie: 52° 13' 23,68" Noord en 5° 17' 00,80" Oost.

Metingen Eemnes:

nr.	waypoint	afstand	zicht	belichtingstijd	star ADU	ADU per sec	zichtcorrectie
		m	m	s			
		R	Z	t			
58	108	1.400	13.000	250	69248,6	17312150	0,955666
50	107	1.900	13.000	250	47358,1	11839525	0,940315
14	102	2.800	13.000	60	42963,1	2577786	0,913301
13	101	3.300	13.000	60	33561,4	2013684	0,89863
9	100	3.700	13.000	15	130870	1963050	0,887063
21	103	4400	13.000	60	34404,4	2064264	0,867178
34	104	5.300	13.000	60	10425,8	625548	0,842265
35	105	6.000	13.000	15	24521,7	367825,5	0,823384
48	106	7.300	13.000	15	17526,7	262900,5	0,789435