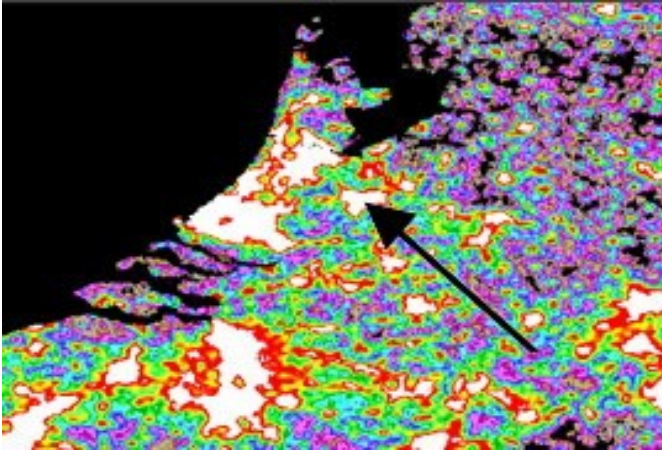


MONITORING

OPSTELLING

De meters hangen aan de zijkant van een woonboot in Utrecht. Utrecht ligt in het midden van het land en is een stad van 300.000 inwoners. De locatie is aangegeven op een DSMP kaart die bewerkt is.



De meters hangen op 4 meter hoogte, ook op 4 meter boven de zeespiegel. Een van beide meters meet bijna de hele hemel. Hieronder is een foto van wat deze meter ziet.



Het grootste deel van de hemel is vrij. Aan de westzijde staat een groot gebouw en aan de oostzijde enige hoge bomen die een deel van de hemel blokkeren.

Doel

Doel van de monitoring is kennis over:

1. De variatie in nachtelijke luminantie van de hemel in Nederland. Kaarten van de nachthemel worden over het algemeen gemaakt bij ideale heldere omstandigheden, zonder wolken en maan. Dat is de situatie waar de minste lichtvervuiling te zien is. Wij zijn ook benieuwd naar de helderheid van de

hemel tijdens bewolking, als er regen is, of als er sneeuw op de grond ligt. Door elke nacht te meten kunnen we de nachtelijke variatie in kaart brengen van de hemel luminantie.

2. De lange termijn ontwikkeling van de hemel luminantie in Nederland. De regering, lokaal provinciaal en sinds kort ook de nationale overheid zijn geïnteresseerd in het maken van duisternisbeleid. Daarvoor worden vele initiatieven ondernomen. Wat is het effect van deze maatregelen? In het verleden nam de sky luminantie met 3 tot 5 percent per jaar toe? Is dat nog steeds zo? Hoe helder zal de hemel de komende jaren zijn.
3. De variabiliteit van de hemelhelderheid gedurende verschillende tijdsintervallen, dag, jaar? We weten nog niet zo goed wat de variabiliteit is gedurende een nacht. Neemt de luminantie af na 12 uur als veel licht uitgaat of neemt hij juist toe door ontwikkelingen in de atmosfeer? Ook is het de vraag of er een seizoensinvloed is: is er gedurende de kersttijd meer en gedurende de zomer, als veel mensen op vakantie zijn, minder licht in Utrecht?

DUISTERNIS METEN

De nachtelijke hemel kan net als elke andere uitgebreide oppervlakte dat licht geeft op twee verschillende manieren gemeten worden: de totale hoeveelheid licht en vanuit een bepaalde richting. De eerste heet in lichttermen verlichtingssterkte, de tweede heet luminantie.

Het scheelt welke je gebruikt: het voordeel van verlichtingssterkte is dat je alle licht meeneemt. Het nadeel is dat je eigenlijk nooit de hele hemel kan meten; altijd zijn er bomen of andere lichtbronnen.

Luminantie heeft het voordeel dat je het goed kan meten. Het nadeel is dat het minder zegt over hoeveel licht dat op de grond valt. Je wilt eigenlijk weten hoeveel licht er uit alle richtingen van de hemel komt en niet van een richting.

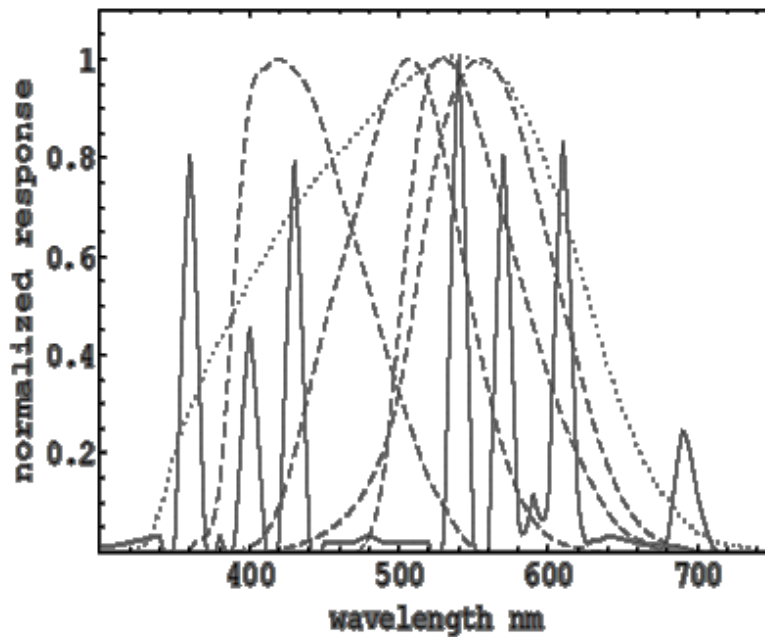
Verlichtingssterkte en luminantie zijn precies gedefinieerd voor het menselijk oog, waarbij de gevoeligheidskromme van de mens gebruikt wordt om beide grootheden te definiëren. Een goede meter zou daar niet veel van af moeten wijken anders wordt de vergelijking tussen uitkomsten van verschillende meters niet meer mogelijk.

De beide gebruikte meters zijn geen van beide goed gekalibreerd als luminantie- of verlichtsterkte meter.

SQM-LE

De SQM-LE meter is direct op het lichtnet aangesloten via een transformator. Tevens is hij verbonden met een ethernetkabel met een laptop. Hij is ingesteld om elke 5 minuten een meting te generen. Hij geeft naast een lichtwaarde ook de temperatuur door.

Als meter van de duisternis zit de SMM-LE tussen een luminantie en een luxmeter in. Hij meet de helderheid van de hemel in een hoek van 20 graden. Een goede luminantie meter heeft een veel kleinere hoek waardoor je veel beter kan zeggen wat je precies meet. De SQM-LE meter staat gericht op het zenit (punt recht omhoog).



Figuur 1 Night sky photometry with sky quality meter, Cinzano 2005.

Kleurgevoeligheid

De gevoeligheid van de SQM-LE wijkt aanzienlijk af van de gevoeligheid van het menselijk oog.

De SQM-LE is de lichte stippellijn die begint bij 320 nm en doorgaat tot 700 nm. 320 nm is diep in het blauw en is voor het menselijk oog niet te zien. Het menselijk oog (daglicht) is de meest rechtse van de streepjeskrommes. De gevoeligheid lijkt dus enigszins op het menselijk oog in het rood maar wijkt sterk af vanaf het groen (550nm) en neemt toe naar het blauw.

Het voordeel van de SQM-LE meter is dat er veel van dit soort meters in verschillende uitvoeringen aanwezig zijn en dat deze meters en de resultaten onderling dus goed te vergelijken zijn.

SQM-LE meet in magnitude per vierkante boogseconde. Hoe hoger de waarde hoe donkerder. Een erg donkere nacht heeft een waarde van magnitude 22; de donkerste metingen in Utrecht liggen iets hoger dan 19. De waarde is afgeleid van het magnitude die ook voor sterren gebruikt wordt. Een ster die goed te zien is heeft een magnitude rond 1 tot 4 magnitude. De zwakste ster met het blote oog is magnitude 6. Een hemel van magnitude 19 betekent dat de hemel zo helder alsof van elke vierkante boogseconde een hoeveelheid licht van een magnitude 19 ster komt.

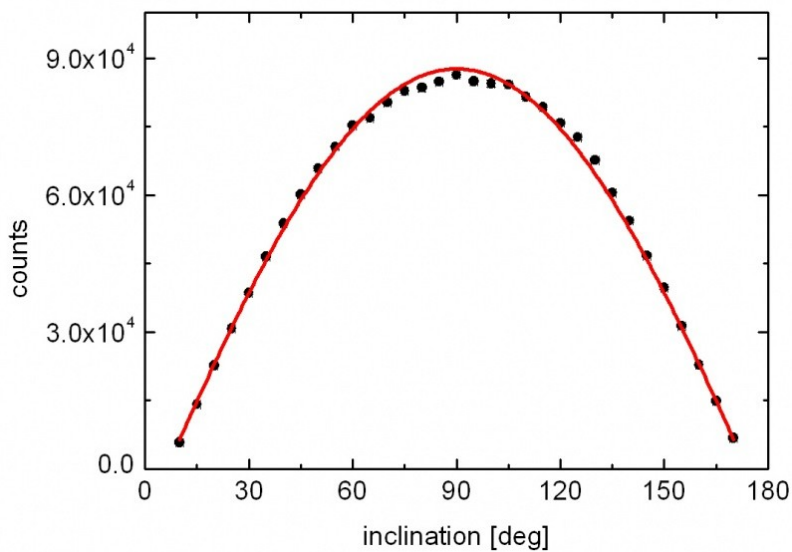
Voor een uitgebreide analyse van de SQM-LE zie

http://www.unihedron.com/projects/darksky/sqmreport_v1p4.pdf.

Lichtmeter Mark 2.3

De Lichtmeter Mark 2.3 is eigenlijk in principe een zonnecel waar energie van fotonen omgezet wordt in een stroompje. Er is dus ook geen stroom nodig; er loopt alleen een usb-kabel naar een laptop. Met de Lichtmeter Mark 2.3 wordt elke 3 minuten een meting uitgevoerd in drie verschillende kanalen.

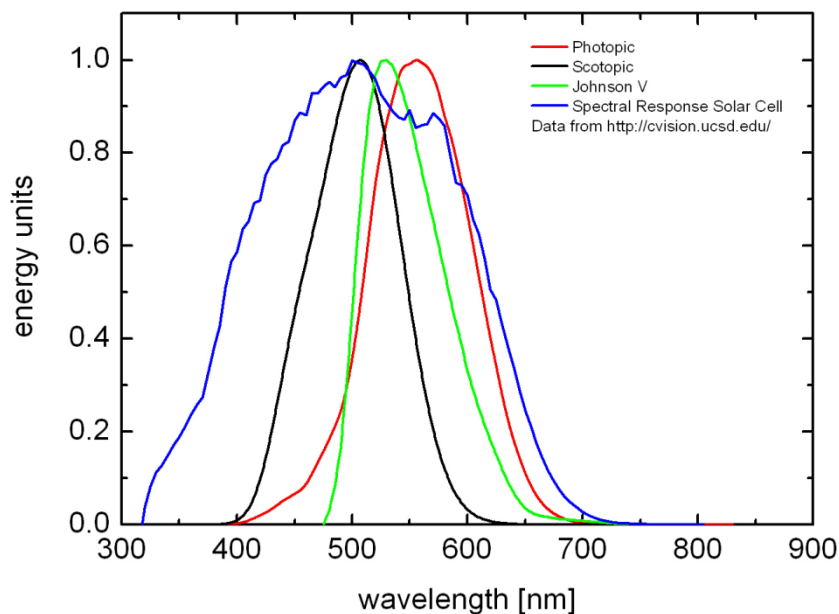
De Lichtmeter Mark 2.3 meet in een hoek van bijna 180 graden. De meter is daarbij redelijk goed geijkt met een cosinus hoekafhankelijkheid zoals een verlichtingssterktemeter.



Hierboven staat de grafiek van de afwijking van de ideale zogenaamde cosinus waar een meter aan moet

voldoen. De afwijking is gering.

Ook de Lichtmeter Mark 2.3 is veel gevoeliger voor het blauw dan ons oog. Hieronder is de curve van de Lichtmeter Mark 2.3 vergeleken met de dag gevoeligheid van het menselijk oog (Photopic) nachtgevoeligheid (Scotopic) en een internationaal gebruikte sterrenkundige gevoeligheidskromme de Johnson V curve.



Figuur 2 Lichtmeter afwijking Zwarte punten meetwaarden, rode lijn cosinus

De kleurgevoeligheid van beide meters lijkt sterk op elkaar en dit maakt het omzetten van elkaars metingen en vergelijken makkelijker.

De Lichtmeter Mark 2.3 meet zelf niet in een lichteenheid. De meter heeft sensoren die alle drie eigenlijk alleen telt hoeveel fotonen de cel bereikt. Aangezien de meter ongeveer een verlichtingssterkte meter is, is de eenheid waarin de meter het beste in werkt de lux.

Voor meer informatie zie: <http://kuffner-sternwarte.at/hms/wiki/index.php5?title=Lightmeter>

Om de metingen over een langer tijd betrouwbaar te houden zullen beide meters elk half jaar gekalibreerd worden met gekalibreerde lux- en luminantiemeters (beide in bezit van Sotto). De volgende kalibratie wordt uitgevoerd in juli 2011.

PROCEDURE

Om de monitoring nuttig en waardevol te laten zijn is een protocol opgesteld. Hieronder staat een beschrijving van de procedure.

Nacht en Astronacht

Bij de doelen wordt steeds gesproken van nacht. Wat is dat eigenlijk? Er zijn een aantal verschillende schemeringen tussen dag en nacht waarbij het steeds donkerder wordt doordat de zon verder onder horizon daalt: burgerlijke schemering $z < 0$ graden, nautisch schemering $z < -6$ graden en astronomische schemering $z < -12$ graden.

Om eenduidigheid te maken hebben we twee definities afgesproken.

De Nacht is de tijd tussen zonsondergang en zonsopgang; in wiskunde $z < 0$ graden. We zijn natuurlijk vooral geïnteresseerd in de variatie in de mate van opgaand licht dat de lichtvervuiling bepaalt. Om alleen daarnaar te kijken hebben we een tweede 'nacht gedefinieerd' de 'Astronacht'. De Astronacht wordt gedefinieerd als de astronomische schemering afgelopen is en de maan onder de horizon staat: $z < -18$ graden en $m < 0$ graden.

Via het programma horizons van de nasa <http://ssd.jpl.nasa.gov> worden de gegevens van de zon en maan opgehaald. Dit wordt gedaan voor de locatie in Utrecht, waar de meters staan. De gegevens worden in UT opgehaald om de 10 minuten. Dat zijn per jaar 52.000 gegevens. Dat aantal is nog door Excel te verwerken.

Er treden door het relatief grote 10 minuten interval, vooral bij zons- opkomst en ondergang enige fouten op, aangezien de meters om de drie of vijf minuten meten. Aangezien niet het gemiddelde van de metingen als kengetal maar de mediaan berekend wordt, heeft dit geen invloed.

GROOTHEDEN, EENHEDEN EN CONVERSIES

SQM-LE

De SQM-EL meet in magnitudes. Dat is voor sterrenkundigen een normale maat en afgeleid van de normale eenheid waarin de helderheid van sterren gemeten wordt. Een hemel van magnitude 22 is ongeveer het donkerste dat op aarde te meten is. In Nederland varieert de helderheid van de hemel tussen 17 en 21. Hoe lager de waarde hoe helderder de hemel.

Om de eenheid magnitude om te zetten in een voor verlichtingskundigen bekende eenheid candela per vierkante meter wordt de volgende formule gebruikt:

Of andersom: $\text{Magnitude} = 12,603 - 2,5 * \text{LOG luminantie}$

Een bekendere grootheid is de verlichtingssterkte. Deze is niet goed af te leiden van de luminantie. Stel dat de hele hemel gelijk verlicht wordt dan zou de omzetting makkelijk zijn: verlichtingssterkte = π maal luminantie.

De hemel is aan de horizon altijd helderder dan recht naar boven (ook zonder lichtvervuiling).

Sotto le Stelle gebruikt als vuistregel de formule:

De waarde van 5 is zeer onzeker. Dit is nog een punt van onderzoek.

SQM-EL

In de resultaten wordt de directe gemeten waarde in magnitude gegeven. Een door amateur sterrenkundigen veel gebruikt apparaat, de SQM, geeft dezelfde eenheid weer.

Lichtmeter Mark 2.3

De Lichtmeter Mark 2.3 meet in principe de verlichtingssterkte. Er zijn drie sensors die een verschillend deel van de helderheden meten. In het begin werden alle drie de sensoren gebruikt. Door de ontwikkelaar Guenther Wuchterl van het apparaat is vastgesteld dat de sensor 1, de nachtsensor, ook overdag de beste resultaten geeft mits voldoende gecorrigeerd voor temperatuur.

Door de ontwikkelaar, is de Lichtmeter Mark 2.3 gekalibreerd met de volgende formule:

$$X = c (b (a \exp (n(1+d*T)/a) - 1) + n)$$

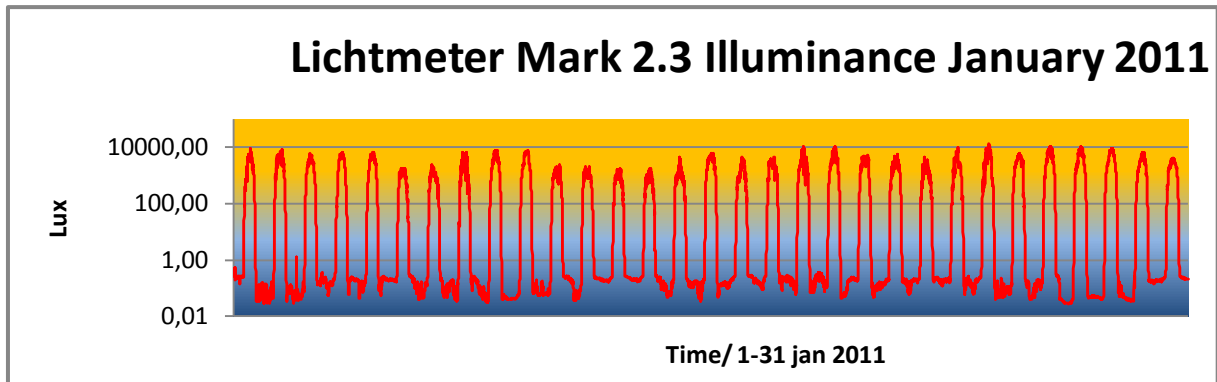
met

n . . .counts (sensor 1 output)

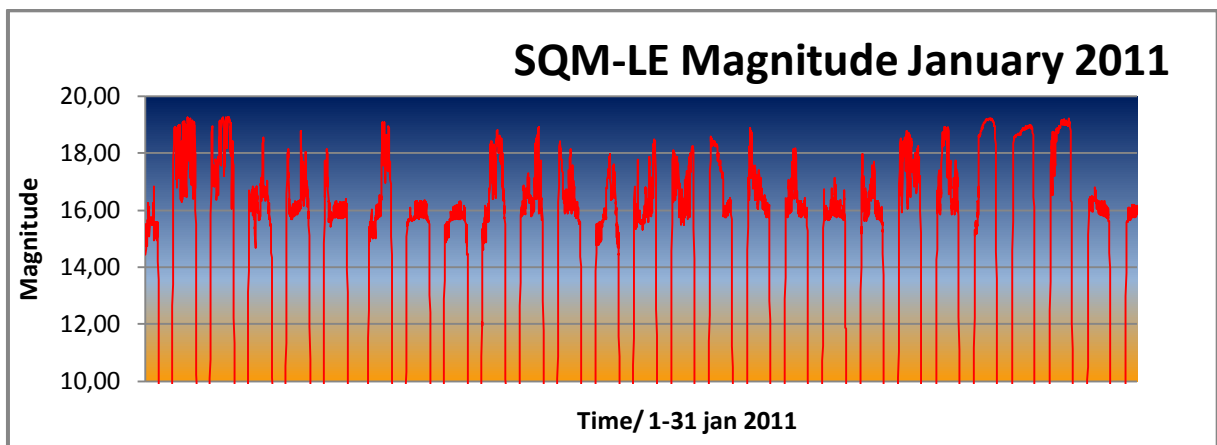
T . . .sensor-temperatuur in °C

X . . .horizontale verlichtingssterkte [Lux])

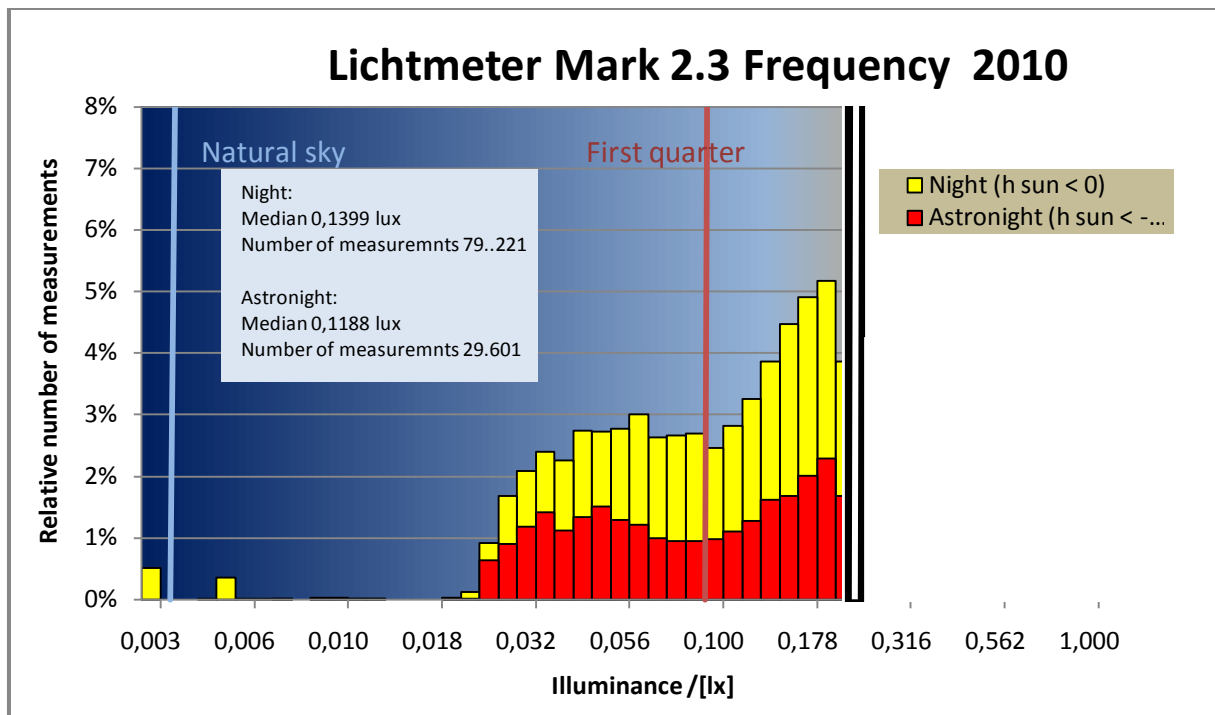
[a,b,c,d = 1.16538e+05, 4.18392e-03, 3.40829e-07, 4.95388e-03 [Lux]]



In bovenstaande grafiek staan alle metingen gedurende de maand jan 2011 van de Lichtmeter Mark 2.3. De nachten zijn te zien aan lage waarden en elke dag het lichter worden. In januari komt de zon niet zo hoog en reiken de waarden tot ongeveer 10.000 lux; in de zomer kan dat oplopen tot 100.000 lux. Te zien is ook dat de nachten langer duren dan de verlichte dagen.



De grafiek van de SQM over de maand jan 2011 ziet er hetzelfde uit. De nachten zijn de waarden rond de magnitude 18 en 19. Het apparaat meet niet overdag en schakelt uit, bij ongeveer magnitude 6. Dat is als de zon net boven de horizon staat. Te zien is dat halverwege de maand de volle maan hoog aan de hemel staat en er ook nog sneeuw in die dagen lag en dat op 27 januari bijvoorbeeld het mooi helder was, waarbij de grafiek netjes verloopt en weinig schommelingen vertoont. De schommelingen worden veroorzaakt door wolken die het licht van de grond sterk weerkaatsen en hoge lichtwaarden (lage magnitude) veroorzaken.



Dit is de grafiek waarmee de resultaten geanalyseerd worden. De wijze van samenvatting is gekozen in overeenstemming met veel andere mensen in de wereld die vergelijkbare metingen doen. Links is donker en rechts de schemering.

Er is horizontaal de lux waarde uitgezet tegen vertikaal het relatieve aantal waarnemingen. Er waren in het jaar 2010 79.221 metingen uitgevoerd in de nacht en 29.601 in de Astronacht.

De laagste waarden liggen bij 0,02 lux. Dat is dus het donkerste dat in Utrecht voorkomt. De gele blokjes bij 0,004 lux zijn metingen uitgevoerd toen er sneeuw op de sensor lag.

De top van de waarnemingen ligt bij 0,2 lux; dat is bijna de waarde van de volle maan die aangegeven staat met de verticale witte lijn. De mediaan ligt bij 0,1399 lux wat iets lichter is dan eerste kwartier. Een echt donkere nacht is in Utrecht dus niet te vinden. Dan zou er een waarde moeten zijn in de orde van 0,004 lux zoals te zien is bij de blauwe verticale lijn aangegeven met natural sky.

De mediaan bij de Astronacht ligt bij 0,1188 lux. Dat is ruwweg dezelfde waarde als bij eerste kwartier. De lichtvervuiling in Utrecht geeft dus evenveel licht gemiddeld als de maan met eerste kwartier.

Bovenstaande grafiek is van de Lichtmeter Mark 2.3. Er is een vergelijkbare grafiek van de SQM-EL meter. De waarden zijn dan in magnitude gegeven. Verder wordt dezelfde opbouw van de waarnemingen gehanteerd.

Elke maand worden de resultaten bekend gemaakt. Er zal ook een verdere analyse van de data van de afgelopen jaren in de loop van 2011 gemaakt worden.