

# Visueel waarnemen: Aanpassing van het oog aan het donker<sup>1</sup>

(Jan van Gastel)

Zoals iedereen weet, past je oog zich aan het donker aan als je van licht naar donker gaat en omgekeerd. Het eerste noemen we *donkeraanpassing*, het omgekeerde *lichtaanpassing*. Als je visueel aan het waarnemen bent, wisselt je oog steeds tussen donker- en lichtaanpassing. Zelfs gedurende de nacht, als je regelmatig opkijkt van je oculair en als je van een lampje gebruik maakt om op een zoekkaart te kijken of van je laptop om een object op te zoeken. Hoe erg is dat nou? Het gebruik van rood licht heeft geen invloed op de donkeraanpassing hoor je vaak. Is dat wel zo?

Als het zo donker is dat het op een bepaalde nacht niet donkerder meer wordt, is je oog voor die mate van duisternis volledig aangepast. In een situatie van lichtverontreiniging, is die donkeraanpassing minder dan onder een echt donkere hemel. Kijk ja bij hoge vergroting in een oculair dan gaat de aanpassing nog verder, omdat je door vergroten de achtergrond donkerder maakt. Duurt dat lang? Dat hangt (behalve van persoonlijke eigenschappen) af van de mate van lichtverontreiniging. Alvorens daar dieper op in te gaan, eerst wat informatie over hoe die donkeraanpassing werkt.

## *Kegeltjes en staafjes*<sup>2</sup>

De belangrijkste orgaantjes in ons oog voor aanpassing aan donker en licht zijn de kegeltjes en de staafjes in het netvlies. In één oog zitten ongeveer zes miljoen kegeltjes en honderdtwintig miljoen staafjes. Het aantal staafjes per mm<sup>2</sup> is echter nergens groter dan de grootste dichtheid van de kegeltjes. De kegeltjes werken vooral als er relatief veel licht is. Ze reageren, aldus Schaefer (lit.1) zolang de luminantie<sup>3</sup> van een voorwerp of de hemel hoger is dan ongeveer 4.7 millicandela's per vierkante meter, hetgeen overeenkomt met ongeveer 19.2 magnituden per vierkante boogseconde (mag/bs<sup>2</sup>)<sup>4</sup>. Is er nog minder licht, dan nemen de staafjes het over<sup>5</sup>. De werking van de staafjes houdt pas op bij een lichtniveau van bijna 10<sup>-6</sup> candela's per vierkante meter (cd/m<sup>2</sup>), ofwel zo'n 27 mag/bs<sup>2</sup>. Is er nog minder licht, dan wordt dat niet meer geregistreerd. Iemand wiens ogen volledig aan het donker zijn aangepast is in staat is om slechts vijf tot tien<sup>6</sup> fotonen te detecteren, zolang die binnen korte tijd binnen een gebied van zo'n 10.000 staafjes<sup>7</sup> terechtkomen (lit. 2 en 3). De staafjes zijn dus *veel lichtgevoeliger* dan de kegeltjes, waardoor we er lichtzakkere objecten mee kunnen waarnemen. Die grote gevoeligheid heeft te maken met het feit, dat er (1) zo'n 20-50 staafjes

---

<sup>1</sup> Dit artikel is een deel van een veel uitgebreider artikel: "Visueel waarnemen: het oog en het brein", dat ik over deze materie schreef voor 'Zenit' (februari 2009, deel 1 en maart 2009, deel 2) en (het Belgische) 'Heelal' (geplaatst in Heelal, augustus 2008), in het kader van mijn in beide bladen verschenen artikelenserie over "Visueel waarnemen".

<sup>2</sup> De oogpupil slaan we hier even over. Het volstaat om te weten dat de aanpassing daarvan in eerste instantie vrij snel gaat, maar dat het langer dan een half uur duurt voordat de pupil zijn maximale diameter heeft bereikt. Het is dus niet zo, zoals vaak gezegd wordt, dat de aanpassing van de pupil al na een minuut of tien voltooid is.

<sup>3</sup> De luminantie geeft aan hoe helder een voorwerp of de hemel wordt waargenomen. De eenheid van luminantie is candela's per vierkante meter (cd/m<sup>2</sup>). Een computerbeeld scherm heeft een luminantie van ongeveer 150 – 300 cd/m<sup>2</sup>. De volle maan heeft bij een hoogte van 60 graden een luminantie van ongeveer 4000 cd/m<sup>2</sup>. De natuurlijke hemelhelderheid op een niet met lichtverontreinigde donkere locatie is ongeveer 0,25 mcd/m<sup>2</sup>.

<sup>4</sup> Omrekening (een goede benadering) van cd/m<sup>2</sup> naar mag/bs<sup>2</sup> kan met formule  $M = -2.5 * \log(C) + 13.39$ , waarin M het aantal mag/bs<sup>2</sup> is en C het aantal cd/m<sup>2</sup>. Het omgekeerde, berekening van C uit M gaat met formule  $C = 10^{0.4(M-13.39)}$ .

<sup>5</sup> Er is ook een overgangsgebied, waarin zowel kegeltjes als staafjes actief zijn, het gebied van 'mesopic vision'.

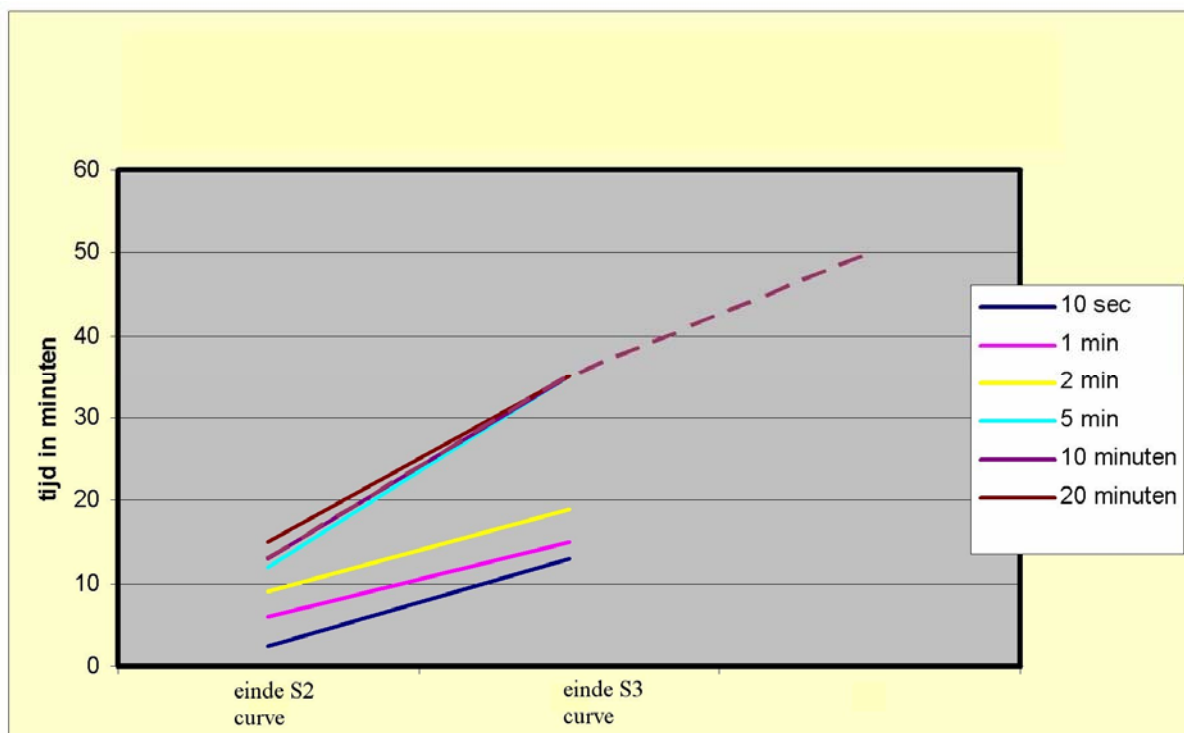
<sup>6</sup> Er zijn zelfs experimenten waarin de reactie op slechts één enkel foton is geregistreerd.

<sup>7</sup> Hetgeen overeenkomt met een gebied van ongeveer een graad.

verbonden zijn met één bipolaire cel en (2) ongeveer 125 bipolaire cellen met één ganglioncel, dus met één zenuwbaan<sup>8</sup>. Daardoor wordt het licht van een groot aantal staafjes 'gebundeld'. Dit is er tegelijk de oorzaak van dat waarnemen met de staafjes een *lage resolutie* oplevert. De kegeltjes zijn voor een groot deel, met name in de fovea -de meest gevoelige plaats van het netvlies- slechts één op één verbonden met een ganglioncel. Voordeel van de kegeltjes daardoor ten opzichte van de staafjes, is de veel *grotere resolutie*. Daarbij zijn de kegeltjes, in tegenstelling tot de staafjes *gevoelig voor kleur*. Met de staafjes zien we alleen grijstinten.

De donkeraanpassing van de kegeltjes gaat vrij snel en is na een minuut of acht voltooid. De aanpassing van de staafjes gaat in eerste instantie ook redelijk vlot, maar volledige aanpassing aan het donker duurt veel langer dan bij de kegeltjes. In de donkeraanpassing van de staafjes, zijn twee fasen te herkennen: een relatief snelle fase, waarin de gevoeligheid toeneemt met 0.24 logaritmische eenheden per minuut en een fase waarin de toename van de gevoeligheid toeneemt met 0.06 logaritmische eenheden per minuut<sup>9</sup> en tenslotte op hetzelfde niveau blijft. De snelle fase (in een grafiek te zien als curven, zie figuur 2) noemt men wel de S2-curve, de langzame fase de S3-curve (lit. 3, 5 en 6). Deze twee fasen zijn niet alleen aanwezig als het gaat om aanpassing vanuit daglicht naar geheel donker, maar ook bij her-aanpassing aan het donker, nadat met aan het donker aangepaste ogen in het licht is gekeken.

In figuur 2 zien we de beide curven geïllustreerd. De lijnen in figuur 1 hieronder, markeren de S3-curve. Zowel de S2 als de S3-fase duurt korter naarmate men aan *minder fel licht* is blootgesteld. Beide fasen duren ook korter, naargelang we korter aan een *bepaalde hoeveelheid* licht zijn blootgesteld.



Figuur 1: Duur S2 en S3 curve, na een bepaalde tijd van blootstelling aan licht van dezelfde intensiteit (1100 candela's/m<sup>2</sup>).

<sup>8</sup>De uitlopers van alle ganglioncellen samen vormen een bundel van ongeveer een miljoen zenuwen, die vanuit het oog naar de hersenen gaan

<sup>9</sup>Ofwel  $2.51 \cdot 0.24 = 0.6$  magnituden per minuut voor de S2 en  $2.51 \cdot 0.06 = 0.15$  magnituden per minuut gemiddeld. Tijdconstanten zijn respectievelijk 1.8 en 7.2 minuten.

De lijnen in figuur 1 laten het volgende zien:

- aanpassing volgens de relatief snelle S2-curve duurt, afhankelijk van de tijd dat we in de lichte omgeving waren (variërend van 10 seconden tot 20 minuten) 2 tot 15 minuten (= einde S2-curve);
- aanpassing volgens de langzame S3-curve, duurt afhankelijk van de tijd dat we in de lichte omgeving waren (we bekijken nu alleen de variatie van 10 seconden tot 2 minuten): 12 tot 19 minuten (einde S3-curve).
- aanpassing volgens de trage S3-curve duurt vooral erg lang, als we 5 minuten of langer (bovenste drie lijnen en onderbroken lijn) in een verlichte omgeving<sup>10</sup> verkeren, variërend van ongeveer 30 minuten tot langer dan een uur (onderbroken lijn).

Als we aangepast aan daglicht in het donker komen, is de donkeraanpassing na ongeveer 40 minuten zo goed als volledig, maar het kan wel een uur of twee duren voordat de maximale aanpassing geheel is bereikt. In figuur 1 lopen daarom de bovenste curven verder door (onderbroken lijn)<sup>11</sup>. Als men de hele dag met onbeschermden ogen in zonlicht heeft rondgelopen, kan dat zelfs nog veel langer duren dan enkele uren. Wil men 's nachts op de grens van het mogelijke waarnemen, kan men daarom overdag het best binnen blijven of een zonnebril dragen.

### ***Her-aanpassing aan het donker na gebruik van zwakke verlichting***

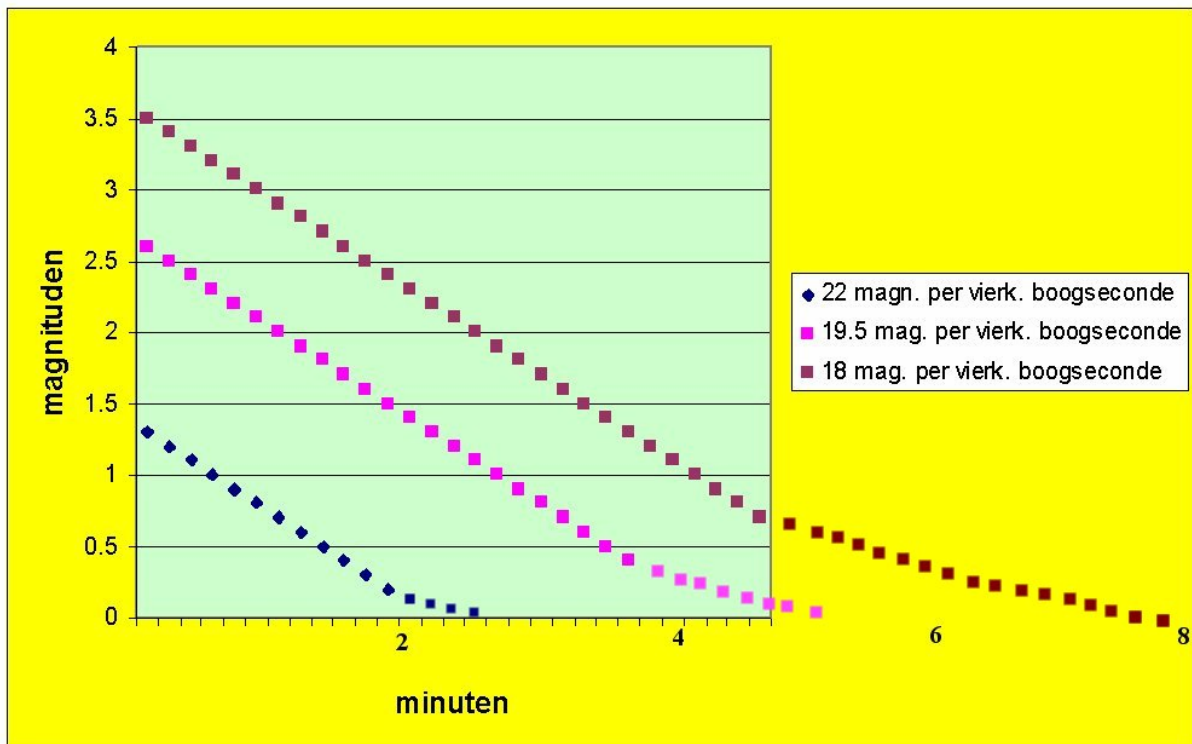
In de praktijk van het waarnemen wordt, zolang we niet langdurig van vrij helder licht gebruik maken bij het lezen of het bekijken van zoekkaarten, maar heel weinig rhodopsine afgebroken: (veel) minder dan één procent. Er blijft dus eigenlijk voldoende rhodopsine in de staafjes aanwezig om zwakke objecten te kunnen waarnemen. Gebrek aan rhodopsine vormt dan ook geen verklaring voor de tijd die nodig is voor de heraanpassing aan het donker. De verklaring is, aldus Lamb en Pugh (lit. 5 en 6) vooral de aanwezigheid van ongebonden *opsine* in de staafjes. Rhodopsine wordt gevormd door verbinding van *opsine* met *11-cis retinal*, een vitamine A-derivaat. Het 11-cis retinal komt maar langzaam beschikbaar, waardoor er na afbraak van rhodopsine enige tijd vrije *opsine* in de staafjes aanwezig is. Deze, door verbinding met 11-cis retinal afnemende hoeveelheid *opsine*, gedraagt zich 'als licht' en fungeert zodoende als een steeds zwakker wordend 'nabeeld', dat op zijn beurt weer hetzelfde effect heeft als afnemende achtergrondverlichting van dezelfde intensiteit. Dit verschijnsel, dat werkzaam is in situaties waarin weinig rhodopsine is afgebroken, is al sinds 1932 (Stiles & Crawford, zie lit. 6) bekend onder de naam "equivalent background illumination". Als alle *opsine* weer is verdwenen (verbonden met 11-cis retinal) is de aanpassing aan het donker weer volledig.

Ook de trage aanpassing in geval van vitamine A gebrek wordt hierdoor, aldus Lamb en Pugh, verklaard: gebrek aan vitamine A leidt tot het langzamer beschikbaar komen van 11-cis retinal, waardoor er langer vrije *opsine* in de staafjes aanwezig is.

---

<sup>10</sup> De 1100 cd/m<sup>2</sup> in figuur 1, is vergelijkbaar met de hoeveelheid licht op een bewolkte dag.

<sup>11</sup> Uit de gegevens waarop de figuur is gebaseerd werd niet duidelijk wanneer de aanpassing volgens de S3-curve na blootstelling van 10 en 20 minuten aan de in de figuur vermelde verlichting, voltooid was. Het einde van deze curven (onderbroken lijn) is dus arbitrair.



Figuur 2: duur van de aanpassing achter een hoge vergroting oculair, bij verschillende graden van lichtpollutie

En nu terug naar de aanpassing achter het oculair. We bekijken daartoe figuur 2 hierboven wat nader.

In figuur 2 geeft de onderste, blauwe curve de situatie onder een echt donkere hemel: een achtergrondhelderheid van 22 mag/bs<sup>2</sup>. Bij hoge vergroting (uittreepupil tussen de 0.5 en 1 millimeter), bereikt de achtergrond een donkerte van 27 mag/bs<sup>2</sup>. De blote oog grensmagnitude is dan magnitude 8.3<sup>12</sup>. Bij een donkerte van 22 mag/bs<sup>2</sup> hoort een grensmagnitude van 7<sup>13</sup>, een verschil dus van 1.3 magnituden. De trage S3-fase, zo hebben we gezien, speelt vooral een grote rol bij aanpassing na veel licht en is hier dus bijna te verwaarlozen, zodat de aanpassing zo goed als geheel volgens de snellere S2-curve gaat en na 2-2.5 minuten voltooid is. Bij mij in de tuin is de achtergrondhelderheid gemiddeld zo'n 19.5 mag/bs<sup>2</sup> (parse curve). Het verschil in grensmagnitude tussen de situatie bij 19.5 mag/bs<sup>2</sup> en die bij hoge vergroting in die situatie, is 2.6 magnituden. De S3-curve speelt een iets grotere rol en de duur van de aanpassing zal zo tussen de 5 en de 5.5 minuten zitten. Woon je in Amsterdam, bij een donkerte van slechts 18 mag/bs<sup>2</sup> (bruine curve), duurt de aanpassing achter het oculair een minuut of 8.

Duidelijk is, dat, als je een zeer zwak object wil zien, je er zelfs bij een echt donkere hemel niet bent met een half minuutje in het oculair kijken. Stop je dan al, dan doe je jezelf tekort en zul je objecten die je wel zou kunnen zien, niet waarnemen.

Moet je nu steeds, als je heel even van achter het oculair hebt opgekeken, 2-2.5 minuten (of langer bij een niet optimaal donkere hemel) wachten alvorens je oog zich opnieuw heeft aangepast? Nee, gelukkig niet. Even kort opkijken of even snel op een kaart kijken bij *zeer*

<sup>12</sup> Zo blijkt uit laboratoriumexperimenten, want in de natuur is het nooit zo donker.

<sup>13</sup> Te berekenen met formule:  $G = 8.5 - 5 \cdot \log(1 + 10^{(4.4 - A/5)})$ , waarin G=grensmagnitude en A=achtergrondhelderheid. Formule voor 'omgekeerde' berekening:  $A = 22 - 5 \cdot \log(10^{(1.7 - G/5)} - 1)$ .

zwak rood licht, helpt niet de hele aanpassing om zeep. Maar ergens tussen de kwart en de halve minuut moet je ook daarvoor toch wel rekenen.

### **Rood licht?**

Hoe lang her-aanpassing duurt als we, na volledige aanpassing aan het donker, van verlichting gebruik maken, hangt dus af van de duur en de intensiteit van de verlichting. Gebruiken we minimale verlichting waarbij we maar net kunnen lezen of ons maar net kunnen oriënteren op een zoekkaart en doen we dat kort, bijvoorbeeld niet langer dan een seconde of vijftien, dan duurt de volledige her-aanpassing slechts een minuut of nog minder<sup>14</sup>. Daarbij maakt het wel uit van welke kleur licht we gebruik maken. Theoretisch is rood licht minder erg dan wit, geel of groen licht, omdat de staafjes veel minder gevoelig zijn voor rood licht dan voor licht van de andere genoemde golflengten, maar we moeten wel voor het juiste rode licht kiezen: dieprood licht met een golflengte van rond de 700 nanometer<sup>15</sup>, in elk niet minder rood dan ergens rond de 600 nanometer. Het best zouden leds voldoen met licht van bovengenoemde dieprode golflengte, waarbij er voor gewaakt moet worden, dat het echt monochromatisch licht is en er geen wit, groen of geel licht in zit. In een aantal van de veel verkochte rode lampjes die door amateur-astronomen gebruikt worden, is dit helaas wel het geval, zo blijkt uit een onderzoek van het Duitse tijdschrift *'Interstellarum'* (Sonderheft 1, 2008). Bovendien waren sommige te fel en/of niet goed regelbaar. In lit. 10 wordt een lichtsterkte aanbevolen van 0.35-3.5 cd/m<sup>2</sup>, ofwel tussen de ongeveer 12 en 14.5 mag/bs<sup>2</sup>. Uit mijn eigen experimenten blijkt, dat het best met nog minder licht kan<sup>16</sup>. Er zijn ook waarnemers die het gebruik van zwak wit of geelgroen licht adviseren. Doug Kniffen (lit. 7) is een van de pleitbezorgers van deze opvatting. De redenering achter dit standpunt is, dat de kegeltjes juist heel gevoelig voor groen licht zijn in vergelijking tot voor rood licht, waardoor je met veel zwakker licht toe kunt. Helaas echter, zijn ook de staafjes gevoeliger voor wit en groen licht dan voor rood licht, waardoor deze lichtkleuren ook de aanpassing van deze orgaantjes meer beïnvloeden. Ook experimenten van waarnemers wijzen uit, dat het weliswaar gemakkelijker is om zoekkaarten te lezen met geelgroen of wit licht dan met rood licht, maar dat de donkeraanpassing minder achteruit gaat door rood licht. Gordon Bond (lit. 8), houdt daarom juist een pleidooi voor rood licht. Hij haalt een experiment van de Zweedse waarnemer Nils Olof Carlin aan, dat deze opvatting ondersteunt. Beroeps- en amateurastronoom Brian Skiff komt op grond van literatuurstudie (lit. 9)<sup>17</sup> ook tot de conclusie dat rood licht de donkeraanpassing het minst aantast. Heel vaak wordt voor het bekijken van zoekkaarten verlichting gebruikt, van welke kleur ook, die veel te fel is om de ogen redelijk aangepast te houden. Brian Skiff zegt hierover (vertaling JvG): “De ‘bottom line’ van wat de literatuur ons leert is: rood licht is het beste, maar als je kunt zien dat het rood is op het papier waar je naar kijkt, is het te fel.”

Uit mijn eigen experimenten met rood licht bleek, dat ik na 15 seconden letters van een gangbaar formaat<sup>18</sup> te hebben gelezen, bij een zodanige lichtsterkte dat ik de tekst met enige moeite kon lezen, gemiddeld 24 seconden nodig had om een object op de grens van het waarneembare weer voor het eerst te zien opdoemen. Na ongeveer 30 seconden was de aanpassing weer vergelijkbaar met die voordat ik het lampje aan deed. In een ander door mij

---

<sup>14</sup> Persoonlijke communicatie (e-mail) van prof. T.D. Lamb aan Nils Olof Carlin.

<sup>15</sup> Zie lit. 28. De auteur voert een pleidooi voor dieprood licht, maar noemt uiteindelijk in zijn conclusie ook wit licht, wat mij gegeven andere bronnen onjuist voorkomt.

<sup>16</sup> Een eenvoudig experiment leerde mij, dat ik bij deze verlichting nog goed kon lezen. Bij 15.8 mag/bs<sup>2</sup> was het moeilijker. Bij 16.1 mag/bs<sup>2</sup> lukte het met zeer veel moeite en daarboven was het lezen van teksten met gebruikelijke lettergrootte voor mij niet meer mogelijk (alle metingen met de SQM en bij wit licht).

<sup>17</sup> In dit artikel wordt ook de door Skiff geraadpleegde literatuur vermeld.

<sup>18</sup> 12 punts ‘Times New Roman’.

uitgevoerd experiment (tabel 1 hieronder), waaraan twee personen deelnamen, bleek herstel van de donkeraanpassing na gebruik van zwak wit licht gemiddeld ongeveer twee maal zolang te duren als na gebruik van zwak rood licht<sup>19</sup>. Met ‘tijd’ wordt in tabel 1 bedoeld, de tijd tussen het uit doen van het lampje en het voor het eerst weer perifeer opdoemen<sup>20</sup> van het object. In de tabel is te zien dat er vrij grote verschillen zijn tussen trials. Dit heeft te maken met het feit dat je niet alleen afhankelijk bent van de her-aanpassing van je oog aan het donker, maar het object moet om zichtbaar te zijn, ook op de juiste plek vallen op je netvlies. Herhaling van het experiment leverde iets andere cijfers op, maar leidde niet tot een andere conclusie.

*Conclusie: gebruik zo zwak mogelijk rood licht en gebruik dat zo kort mogelijk. Bereid je waarnemingen goed voor, zodat je weinig tijd met verlichting hoeft door te brengen en je ogen zoveel mogelijk aangepast kunt houden.*

Trial	Wit licht tijd (sec)	Rood licht tijd (sec)	TRIAL	WIT licht Tijd (sec)	ROOD licht Tijd (sec)
1	23	9	1	20	11
2	21	10	2	15	12
3	15	5	3	12	6
4	16	6	4	14	7
5	18	4	5	16	7
6	15	7	6	16	8
7	14	6	7	21	8
8	11	6	8	20	11
9	10	10	9	17	7
10	8	6	10	17	7
11	10	7	<b>Gemidd.</b>	<b>16.8</b>	<b>8.4</b>
12	12	4			
13	5	2			
14	6	2			
15	8	7			
<b>Gemidd.</b>	<b>12.8</b>	<b>6.1</b>			

Tabel 1: Resultaten experiment met rood en wit licht; 15 trials voor waarnemer 1 en 10 trials voor waarnemer 2. (zie tekst hierboven voor uitleg)

En refererend aan eerdere opmerkingen over de lage resolutie<sup>21</sup> van ons oog bij zwak licht: kleine lettertjes vragen om veel licht. Het is daarom handig om, als je iets moet lezen in het donker, *grote* letters en andere symbolen te gebruiken. Dan kun je toe met zwakker licht.

<sup>19</sup> Beide lichtkleuren van een zodanige intensiteit, dat lezen van tekst met gangbare lettergrootte met enige moeite mogelijk was.

<sup>20</sup> Deze tijden geven dus niet weer hoelang de volledige her-aanpassing duurt.

<sup>21</sup> De lage resolutie bij waarnemen onder donkere omstandigheden is, zoals we in het artikel over “De zichtbaarheid van uitgebreide deepskyobjecten” (Zenit 11, december 2007) hebben gezien, ook de reden dat we om kleine objecten zichtbaar te maken, sterk moeten vergroten.

## Literatuur

1. Bradley E. Schaefer (1989), Telescopic limiting magnitudes, NASA-Godart space flight center, Code 661, Greenbelt, Maryland, 20771.
2. Sakitt B. (1972), Counting every quantum. *Journal of Physiology*, 223, p. 131–150.
3. A.M Cameron, O.A.R. Mahroo, and T.D. Lamb (2006), Dark adaptation of human rod bipolar cells measured from the *b*-wave of the scotopic electroretinogram. *Journal of Physiology*, September 1, 575(Pt 2), p. 507–526.
4. W. Rowland Taylor, Robert G. Smith, (2004), Transmission of scotopic signals from the rod to rod-bipolar cell in the mammalian retina. *Vision Research*, 44, July, p. 3269-3276.
5. Trevor D. Lamb and Edward N. Pugh jr, (2006), Phototransduction, Dark adaptation and Rhodopsin regeneration. *The Proctor Lecture, Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 47, p. 5138.
6. T.D. Lamb, E.N. Pugh Jr., (2004). Dark adaptation and the retinoid cycle of vision, *Progress in Retinal and Eye Research*, 23, p. 307-380.
7. Doug Kniffen: “Seeing red or go for the green”, op <http://www.astromax.org/activities/members/kniffen.htm>
8. Gordon Bond (1999), Red revisited, TPO (The Practical Observer) Volume 10, Issue 2. Te vinden op <http://www.jersey-mall.com/tpo/pages/redrevis.htm>
9. Brian Skiff: How dark can the night sky get? Te vinden op [http://www.astropix.com/HTML/L\\_STORY/SKYBRITE.HTM](http://www.astropix.com/HTML/L_STORY/SKYBRITE.HTM) .
10. Night Vision: The Red Myth, te vinden op: [http://stlplaces.com/night\\_vision\\_red\\_myth/](http://stlplaces.com/night_vision_red_myth/)