

Het visueel waarnemen van diepskyobjecten: achtergrondhelderheid, grensmagnitude en vergroting¹
door Jan van Gastel

1. Inleiding

Als je met het blote oog naar een heldere sterrenhemel kijkt hangt het aantal sterren dat je kunt zien, behalve van de kwaliteit van je ogen, af van hoe donker het is. Een donkere hemel zorgt er namelijk voor dat zwakkere sterren zichtbaar zijn dan onder een minder donkere hemel. Als je door een telescoop kijkt zie je zwakkere sterren naargelang het objectief van de telescoop groter is en met een hoge vergroting zijn zwakkere sterren zichtbaar dan met een lage. Onder lichtvervuilde omstandigheden heeft het aanschaffen van een telescoop met een groot objectief weinig zin zeggen sommigen. Is dat waar, of is dit een van de fabeltjes die in de visuele amateurastronomie maar moeilijk zijn uit te roeien? In dit artikel zullen we nagaan hoe de relaties tussen de donkerte van de sterrenhemel, de zwakst zichtbare ster, de grootte van het objectief en de vergroting precies in elkaar zitten.

De relatie tussen achtergrondhelderheid, objectiefdiameter en vergroting enerzijds en de zichtbaarheid van *uitgebreide* diepskyobjecten zoals sterrenstelsels en nevels anderzijds, zit anders in elkaar. Daar wordt in een volgend artikel aandacht aan besteedt. De meeste begrippen die we daar nodig hebben worden in dit artikel aan de orde gesteld.

2. De achtergrondhelderheid.

De achtergrondhelderheid, de vertaling uit het Engels van ‘background brightness’, is de ‘mate van donkerte’ waartegen we sterren en andere diepskyobjecten zien. We zouden in plaats van over ‘achtergrondhelderheid’ ook kunnen spreken over ‘achtergronddonkerte’, maar passen ons wat dit betreft aan wat gebruikelijk is aan. ‘Achtergrondhelderheid’ is eigenlijk een wat vreemd begrip, omdat het strikt genomen niet de achtergrond is waartegen we sterren en andere objecten zien, die donker of minder donker is. Laten we sterren en andere objecten aan het firmament (nevels, sterrenstelsels, enz.) namelijk buiten beschouwing dan is het vanaf de aarde gezien absoluut donker in het heelal. Donkerder kan niet. Als we naar een bepaald object kijken, zorgen alle andere objecten samen ervoor, dat het niet absoluut donker is. Daarnaast spelen zich in de aardatmosfeer, dus ten opzichte van astronomische objecten juist op de voorgrond, verschijnselen af die de ‘achtergrond’ helderder maken dan die zou kunnen zijn.

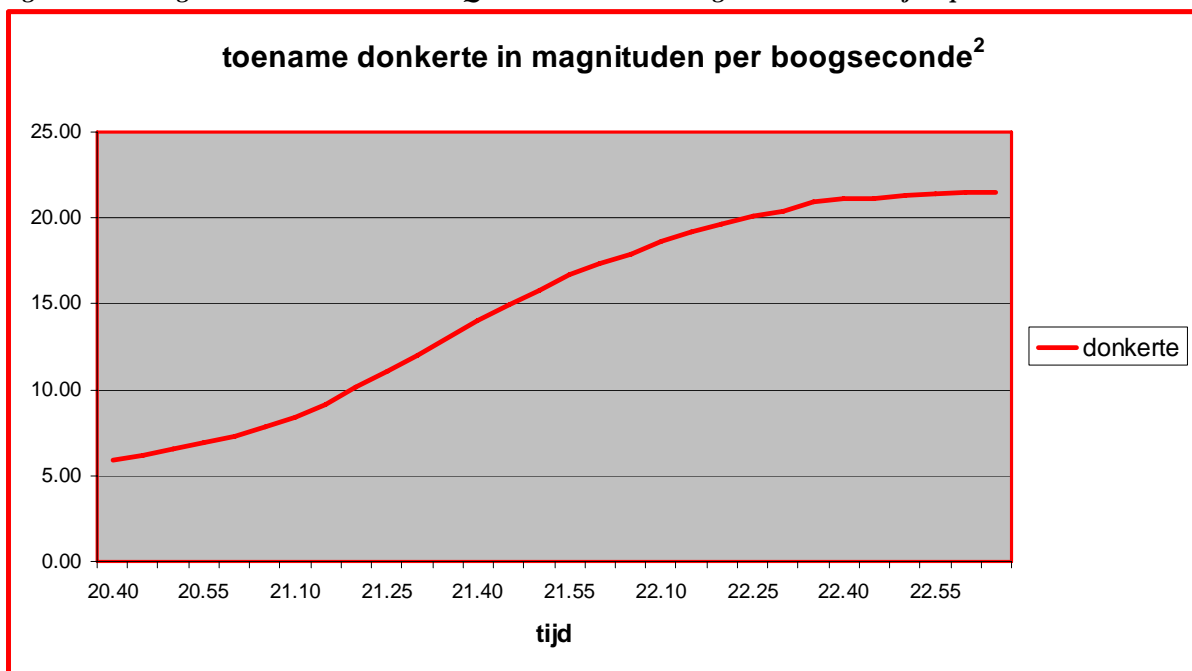
De achtergrondhelderheid varieert in de meeste gebieden op aarde al lang niet meer alleen met het al of niet aanwezig zijn van de melkweg, het zodiakaal licht, de maan en de planeten, maar vooral met de mate van aanwezigheid van kunstverlichting. De bekende, door de onderzoeksgroep van Cinzano (literatuur 5) opgestelde lichtvervuilingkaarten, spreken wat dat betreft voor zichzelf. Minder bekend, maar zeker niet minder interessant, zijn de onderzoeken van Garstang in de 80-er en 90-er jaren van de vorige eeuw, die rekenmodellen ontwierp om de lichtvervuiling van een stad te bepalen en die daarmee vrij nauwkeurig de achtergrondhelderheid bij een aantal professionele sterrenwachten berekende (literatuur 6 en 7).

¹ Met dank aan Arie Otte voor het kritisch doorlezen van een eerdere versie.

De achtergrondhelderheid kan in een getal worden uitgedrukt. Voor de maat waarin deze wordt uitgedrukt volgen we Cinzano en drukken de achtergrondhelderheid uit in magnitudes per vierkante boogseconde. Een achtergrondhelderheid van bijvoorbeeld 20.5 magnitudes/boogseconde² (voor Nederlandse begrippen al donker) is de helderheid die we krijgen, als over de hele hemelkoepel, over elke vierkante boogseconde, het licht van één sterretje van magnitude 20.5 is uitgesmeerd. Dat zijn in totaal dus $((90*60*60)^2*\pi) = 3.29792*10^{11}$ sterretjes van magnitude 20.5. Zouden we het licht van al die sterretjes concentreren in één ster, dan krijgen we een ster van magnitude $20.5 - 2.5 \log(3.29792*10^{11}) = \text{magnitude } -8.3$.

Hoe donker kan het zijn onder een heldere sterrenhemel? Hoewel de inzichten niet ver uiteenlopen is hierover geen overeenstemming, wat waarschijnlijk samenhangt met verschillende manieren van meten en verschillende aannames in de formules die worden gebruikt in berekeningen. Blackwell (1946) gaat uit van 21.58 magnitudes/boogseconde². Brian Skiff (literatuur 4) noemt 22 mag/boogseconde² als de meest donkere hemelachtergrond en Clark (1990) 24 mag/boogseconde². Gezien metingen met de SQM wereldwijd (literatuur 8) en ervaringen van waarnemers onder donkere omstandigheden, lijkt het hanteren van een waarde van 22 mag/boogseconde² realistisch. In het vervolg van dit artikel zullen we dat ook doen. Voor dit artikel is het overigens niet van cruciaal belang om te weten wat nu de juiste waarde is, omdat het ons gaat om relaties tussen de achtergrondhelderheid en andere variabelen.

Figuur 1: Meting toename donkerte met SQM en meetresultaten gerelateerd aan tijdstip van meten.



	tijd	meting
zon onder	21.02	7.49
begin nautische schemering	21.35	12.98
begin astronomische schemering	22.18	19.47
astronomisch donker	23.05	21.49

Om de achtergrondhelderheid rechtstreeks te meten is sinds een paar jaar een betrouwbaar en voor amateurs betaalbaar apparaatje in de handel gebracht: de Sky Quality Meter (SQM). Dit

meet de donkerte eveneens in magnitudes per vierkante boogseconde. Dit apparaat, waarover een positief testrapport is verschenen van bovengenoemde Cinzano (literatuur 14), reproduceert aardig de bevindingen van Cinzano. Een voordeel van het gebruik van de SQM boven gebruik te maken van Cinzano's kaarten is, dat je er op de waarneemplaats zelf mee kunt meten, waardoor het mogelijk is er relatief donkere plaatsen mee op te sporen in volgens de kaarten lichtvervuilde gebieden. In mijn eigen tuin in Huizen, waar ik zeer regelmatig metingen verricht, is de achtergrondhelderheid op maanloze, onbewolkte nachten, gemiddeld zo'n 19.66 magnitudes per boogseconde², met een maximum gemeten waarde van 20.01 tijdens een zeer doorzichtige nacht. Dat is in absolute zin slecht, maar voor die omgeving best goed. In de Hautes Alpes in Zuid-Frankrijk wordt het een stuk donkerder. Figuur 1 op de vorige pagina, laat het verloop zien van de toenemende duisternis op een zomeravond op camping 'Du Planet', op 1860 meter hoogte in de Franse Alpen, nabij het plaatsje Arvieux. De maximale donkerte daar die avond, was 21.49 magnitudes/boogseconde². Op ongeveer een kwartier rijden van de camping, op de Col D'Izoard op 2360 meter hoogte, waar ik sinds 2002 elke zomer waarneem, mat ik zo goed als altijd een donkerte van 21.6-21.7 magnitudes per boogseconde². Een waarde van 21.83, de hoogste die ik ooit heb gemeten, mat ik op een veldje op 10 minuten lopen van bovengenoemde camping.

Het is absoluut donker bij 27 mag/boogsec², aldus Clark². Dat kan uitsluitend worden bereikt als elke vorm van licht ontbreekt, ook sterlicht. In de waarneempraktijk worden dergelijke waarden bereikt door het gebruik van hoge vergrotingen, of anders gezegd: kleine uittreepupils. Hierop komen we nog terug.

3. De grensmagnitude met het blote oog

De grensmagnitude is de helderheid, uitgedrukt in magnitudes, van de zwakste ster die op een bepaald moment door een bepaald persoon te zien is. De grensmagnitude met het blote oog wordt gewoonlijk vastgesteld door te kijken wat de zwakste ster is in de buurt van het zenit die nog net is waar te nemen. Behalve in het zenit, kan men natuurlijk ook de grensmagnitude bepalen in een gebied waarin men wil waarnemen (literatuur 11). Om de aldus bepaalde grensmagnitude om te rekenen naar de grensmagnitude in het zenit kan van de aan Clark (1990) ontleende formule 6 gebruik worden gemaakt. Vooral op hoogten dichtbij zeeniveau bij relatief veel verontreiniging, zal de extinctie (afzwakking) groter zijn naargelang men lager gaat waarnemen dan een graad of 30 boven de horizon.

Het is voor het bepalen van de grensmagnitude noodzakelijk dat de ogen goed aan het donker zijn aangepast en dat men perifeer waarneemt. Het gaat namelijk om het zoeken van de zwakst zichtbare ster en door eerst voor een goede aanpassing aan het donker te zorgen en perifeer waar te nemen kan men zwakkere sterren zien dan zonder aanpassing en/of door rechtstreeks naar de ster te kijken. Niet iedereen komt onder dezelfde omstandigheden tot dezelfde grensmagnitude. Er zijn grote individuele verschillen, afhankelijk van de grootte van de maximale oogpupil, de leeftijd, optische afwijkingen van het oog, ervaring en de moeite die men zich getroost om de ogen eerst goed aan het donker te laten aanpassen. Verschillende bronnen geven dan ook enigszins verschillende in de waarneempraktijk maximaal haalbare

² Strikt genomen is het dan nog niet 100% donker. Een achtergrondhelderheid van 27 magnitudes/ boogsec² vindt men als het licht van een ster van magnitude -1.8 over de hele hemelkoepel wordt uitgesmeerd. Met formule 2 wordt bij deze donkerte een grensmagnitude van 8.29 berekend. De absolute grensmagnitude van 8.5 wordt pas bereikt bij een donkerte van 36 magnitudes/ boogsec². Deze waarde vinden we als het licht van een ster van magnitude 7.2 over de gehele hemelkoepel wordt uitgesmeerd. Doch dit verschil met het volledig ontbreken van licht kan door het menselijk oog niet meer worden waargenomen.

grensmagnitudes op. Clark bijvoorbeeld, noemt een grensmagnitude van 7-7.5 onder een echt donkere nachthemel. Brian Skiff noemt een grensmagnitude van 8 onder ideale omstandigheden. Bowen (1947) noemt grensmagnitudes van beter dan magnitude 8, als de proefpersoon werd afgeschermd van zoveel mogelijk achtergrondlicht.

Behalve van de donkerte van de achtergrond, is de grensmagnitude ook afhankelijk van de hoeveelheid deeltjes in de atmosfeer (aerosols). In de bergen zijn gewoonlijk minder aerosols aanwezig dan op of beneden zeeniveau. Aerosols beperken de doorzichtigheid van de atmosfeer. Daarnaast weerkaatsen ze het licht (Garstang 1989 en 1991) en dragen op die manier ook nog bij aan het verhogen van de achtergrondhelderheid. Het effect dat aerosols hebben op de achtergrondhelderheid en de grensmagnitude hangt mede af van de aanwezigheid van kunstlicht. Bij afwezigheid van kunstlicht maken aerosols de achtergrond, zoals gemeten met de SQM, donkerder, omdat sterlicht er voor een deel door wordt tegengehouden. Bij aanwezigheid van kunstlicht maken ze de achtergrond juist lichter doordat ze het kunstlicht reflecteren. In beide situaties verlagen ze de grensmagnitude.

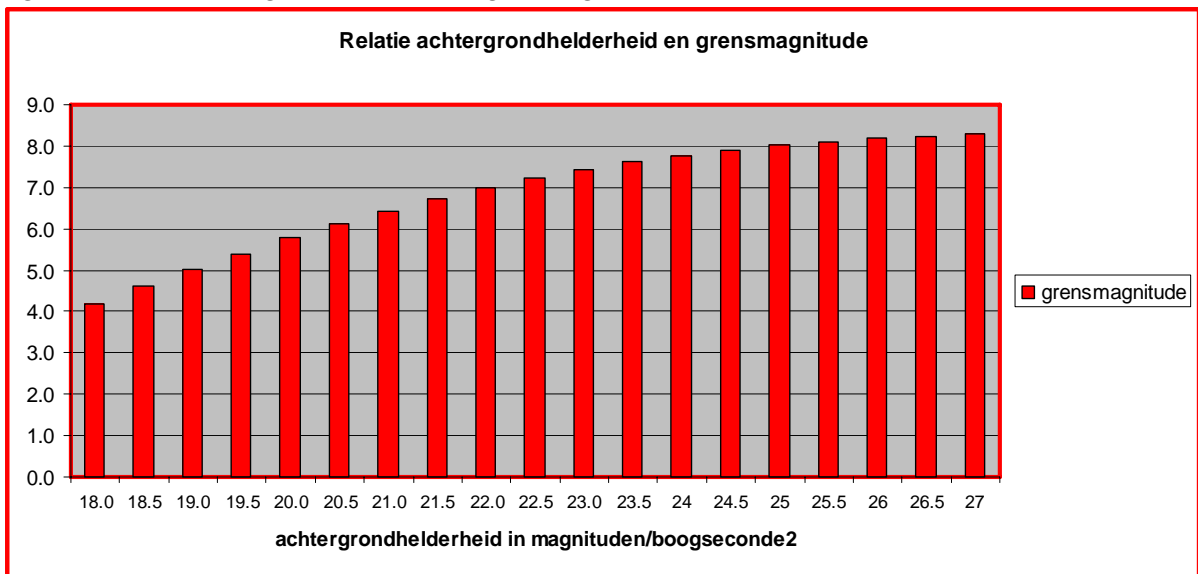
Wat is de maximale grensmagnitude bij afwezigheid van alle licht? Blackwell (1946) gaat uit van een waarde van 7.93 als maximaal haalbare magnitude bij afwezigheid van alle licht. Bowen (1947) noemt een experiment van Russell (1917) waarin men proefpersonen kunststerren liet zien tegen een absoluut donkere achtergrond. Hierbij haalde men een grensmagnitude van 8.5. Ook Clark (1990) noemt (in navolging van Curtis, 1901) als maximaal haalbare grensmagnitude bij absolute duisternis en volledige aanpassing van het oog is een waarde van 8.5. Ervaringen met het bepalen van de grensmagnitude van telescopen bij hoge vergroting, waarbij de achtergrond uiteindelijk ook een absolute duisternis nadert, wijzen eveneens in de richting van 8.5 of zelfs nog iets hoger. We gaan daarom in navolging van Clark en Bowen uit van een absolute grensmagnitude van 8.5.

De grensmagnitude kan behalve visueel bepaald, ook met formule 1 (literatuur 3) worden berekend uit de achtergrondhelderheid. Ook in die formule is ervan uitgegaan, dat de donkerste hemel die voorkomt een achtergrondhelderheid heeft van 22 magnitudes/boogseconde². Wordt met formule 1 uit de achtergrondhelderheid de grensmagnitude berekend, formule 2 (literatuur 3) doet het omgekeerde. Enkele voorbeelden: in een sterk lichtvervuilde plaats, met een grensmagnitude van 4, is de achtergrondhelderheid iets minder dan 18 mag/boogsec². Op voor Nederlandse begrippen donkere plaatsen in de Ardennen, de Flevopolder, Drente, Friesland en de waddeneilanden vindt men grensmagnitudes van omstreeks 6-6.3, bij een achtergrondhelderheid 20.5-20.8 mag/boogsec². De waarde van 22 magnitudes/boogseconde² wordt bereikt bij ongeveer magnitude 7.

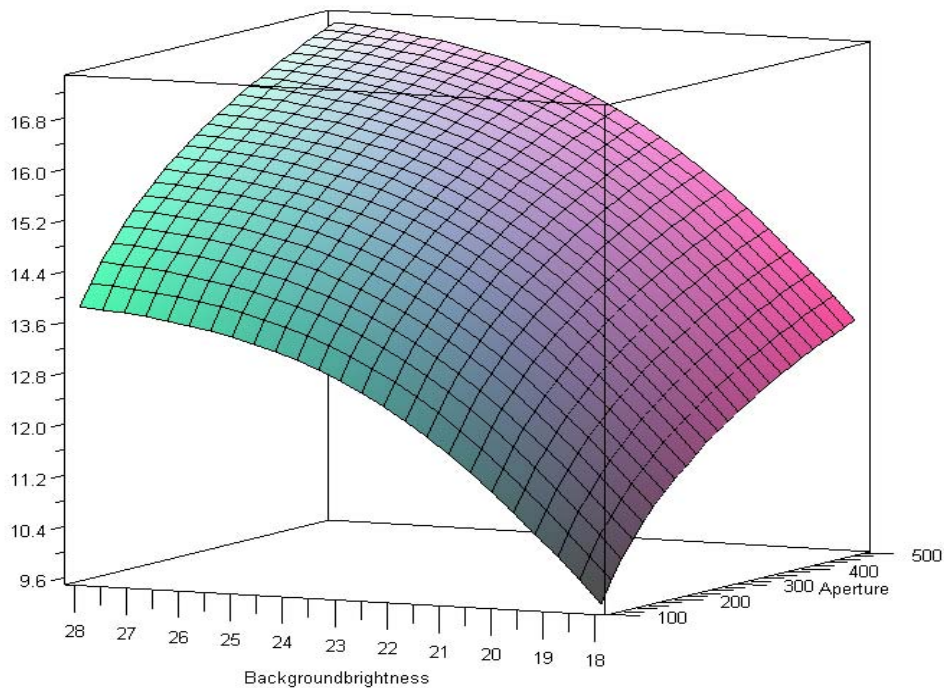
Waarom zou je de grensmagnitude berekenen uit de achtergrondhelderheid als je hem ook visueel kunt bepalen? En kun je, gegeven de grote individuele verschillen, door berekening je grensmagnitude wel optimaal bepalen uit de achtergrondhelderheid. Om met de laatste vraag te beginnen: dat kan inderdaad, maar als je eigen bepaling van de grensmagnitude afwijkt van de berekeningen zal er enig voorwerk verricht moeten worden, door een aantal malen visueel je grensmagnitude te bepalen en naast de metingen met de SQM te leggen. Op deze manier kun je voor jezelf een tabel maken met bij helderheidsmetingen horende subjectieve grensmagnitudes. Daarna is het dan alleen nog maar nodig om na meting van de achtergrondhelderheid in de tabel de bijbehorende grensmagnitude op te zoeken. Voor het bepalen van de kwaliteit van waarneemplaatsen gaat meting met de SQM veel sneller dan het visueel bepalen van de grensmagnitude, omdat je eerst niet hoeft aan te passen aan de duisternis, maar direct na aankomst metingen kunt verrichten.

De relatie tussen grensmagnitude en achtergrondhelderheid is weergegeven in figuur 2.

Figuur 2: Relatie achtergrondhelderheid en grensmagnitude



Te zien is, dat de grensmagnitude bij een achtergrondhelderheid van 18 mag/boogsec² iets boven de magnitude 4 ligt en bij 22 mag/boogseconde², de maximaal haalbare donkerte onder een heldere hemel, zonder hulpmiddelen, bij (afgerond) magnitude 7.



In bovenstaande figuur staat links op de verticale as de met telescopen van 100-500 mm objectiefdiameter te halen grensmagnitude bij verschillende achtergrondhelderheid. Achtergrondhelderheden tussen 22 (de meest donkere nachthemel) en 28, zijn alleen te halen bij hoge vergroting (uitsmering van het achtergrondlicht), zoals we elders in dit artikel uitleggen. Zie hiervoor onder andere ook de laatste figuur van dit artikel. De linker onderrand van de figuur geeft de grensmagnitude van een 100 mm telescoop voor alle vermelde achtergrondhelderheden, de rechter bovenrand doet dit voor een 500 mm telescoop. Duidelijk is, dat een telescoop met een groter objectief onder alle omstandigheden een hogere grensmagnitude heeft.

4. Vergroting en uitreepupil

Door te vergroten wordt ‘ingezoomd’ op een deel van de hemelkoepel. Dat betekent dat een klein deel van die hemelkoepel wordt uitvergroot. Als gevolg daarvan wordt het in het uitvergrootte deel aanwezige licht over een groter oppervlak ‘uitgesmeerd’, waardoor de achtergrond zoals die door het oculair zichtbaar is, donkerder wordt. De afname van de achtergrondhelderheid door vergroting kan worden berekend met formule 3. In tegenstelling tot het ‘achtergrondlicht’ wordt het licht van een ster niet uitgesmeerd door vergroting. Sterren staan namelijk zover weg, dat ze ondanks de hoogste vergroting die we met een amateurtelescoop kunnen halen, puntbronnen blijven. Het licht van een ster blijft daarom geconcentreerd in een punt³. Omdat de achtergrond donkerder wordt en de ster niet, wordt het *contrast* tussen de in het beeldveld aanwezige sterren en de achtergrond groter, waardoor we zwakkere sterren kunnen zien. Vergroting kan daarom handig, vaak zelfs noodzakelijk zijn, bij het zoeken van een centrale ster in een planetaire nevel, of naar op te lossen sterren in zwakke bolhopen of open sterrenhopen. Een goed voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld mijn waarneming van de bolhoop Palomar 14. Hiervan zag ik geen onopgeloste ‘gloed’ zoals die bij andere zwakke bolhopen vaak te zien is, maar zag ik na langdurig perifeer kijken van tijd tot tijd de helderste sterretjes van de bolhoop, sterretjes van rond magnitude 17, aan en uit ‘flitsen’.

Om wat preciezer te onderzoeken hoe de relatie tussen vergroting en achtergrondhelderheid in elkaar zit berekenen we twee telescopen, een met een spiegel van 200 en een met een spiegel van 400 mm diameter. Beide telescopen zetten we naast elkaar en met beide vergroten we 100x. Dat betekent dat we met beide telescopen de achtergrond in gelijke mate uitsmeren. Heeft dat bij beide telescopen dan ook dezelfde achtergrondhelderheid als resultaat? Nee. Berekend met formule 3 zien we voor de 200 mm telescoop een verdonkering van de achtergrond met $-2.5 \cdot \log \left(\frac{(200^2 \cdot 0.7)}{(100^2 \cdot 7^2)} \right) = 3.1$ en voor de 400 mm telescoop met $-2.5 \cdot \log \left(\frac{(400^2 \cdot 0.7)}{(100^2 \cdot 7^2)} \right) = 1.6$ magnitudes/ boogseconde². De resulterende achtergrondhelderheid van de 400 mm telescoop is dus $3.1 - 1.6 = 1.5$ magnitudes/ boogseconde² groter, dus $2.51^{1.5} = 4$ maal zo groot dan die van de 200 mm telescoop. Hoe komt dat? Omdat de 400 mm telescoop met zijn twee maal zo grote objectiefdiameter vier maal zoveel achtergrondlicht ‘vangt’ als de 200 mm telescoop. Om de achtergrondhelderheid van beide telescopen gelijk te krijgen moeten we hiervoor corrigeren en zullen we het licht van de 400 mm telescoop over een vier maal zo groot oppervlak moeten uitsmeren, door twee maal (voor de oppervlakte kwadrateren we immers) zoveel te vergroten. Vullen we in formule 3 bij de 400 mm telescoop een 2 x zo hoge vergroting in, dus 200x, dan wordt de berekende verdonkering eveneens 3.1 magnitudes/ boogseconde². Kijken we nu naar de verhouding tussen *diameter objectief* en *vergroting* dan zien we dat de uitreepupil (de objectiefdiameter

³ Uiteindelijk, zeker bij slechte seeing, zal de ‘seeingdisk’ toch worden uitgesmeerd, waardoor we niet meer van een puntbron kunnen spreken (zie ook Schaefer, 1989)

gedeeld door de vergroting) bij gelijke verdonkering voor beide telescopen gelijk is, respectievelijk $200/100$ en $400/200$, ofwel 2 millimeter.

Uit deze berekeningen kunnen we twee belangrijke conclusies trekken:

1. Bij gelijke vergroting en onder gelijke omstandigheden is de achtergrond helderder naarmate het telescoopobjectief een grotere diameter heeft.
2. Bij gelijke uittreepupil en onder gelijke omstandigheden is de achtergrondhelderheid voor alle telescopen, ongeacht de diameter van het objectief, gelijk.

Deze conclusies zullen ook (en vooral) in het artikel over het visueel waarnemen van uitgebreide diepskyobjecten een belangrijke rol spelen.

5. De grensmagnitude met een telescoop

Hoe groter de diameter van het telescoopobjectief, hoe zwakker de sterren die je er onder gelijke omstandigheden mee kunt zien. Waarom? Omdat je met een groter objectief niet alleen meer achtergrondlicht maar ook meer sterlicht verzamelt. Onder ‘gelijke omstandigheden’ rekenen we ook ‘een gelijke diameter van de uittreepupil’, omdat we ook de achtergrondhelderheid gelijk willen houden. Stel u het volgende experiment voor. We zetten vier spiegeltelescopen, met spiegels van respectievelijk 100, 200, 300 en 400 mm doorsnee naast elkaar zetten op een waarneemplek met ‘blote oog’ grensmagnitude 7. Door de vergroting te manipuleren, zorgen we ervoor, dat de uittreepupil van alle telescopen steeds kleiner wordt, doch steeds alle vier van dezelfde diameter. Het resultaat zien we in tabel 1, op de volgende pagina.

In de linkerkolom van tabel 1 staan de uittreepupils, in de kolommen 2 tot en met 5 de spiegel diameter (eerste rij) en (in de rijen daaronder) de toename in grensmagnitude per telescoop. In de meest rechterkolom staat de toename van elk stapje en die toename is voor alle vier telescopen steeds gelijk. Bij kleiner wordende uittreepupil neemt bij gelijke stapjes de grensmagnitude van alle telescopen, ongeacht de diameter van het objectief dus *met dezelfde waarde* toe. Het verschil in grensmagnitude tussen de verschillende telescopen wordt *onder gelijke omstandigheden* dus uitsluitend bepaald door de objectief diameter. Door de uittreepupil gelijk te houden, houden we zoals gezegd ook de achtergrondhelderheid van alle vier telescopen gelijk, hetgeen impliceert, dat het bovenstaande ook geldt onder lichtvervulde

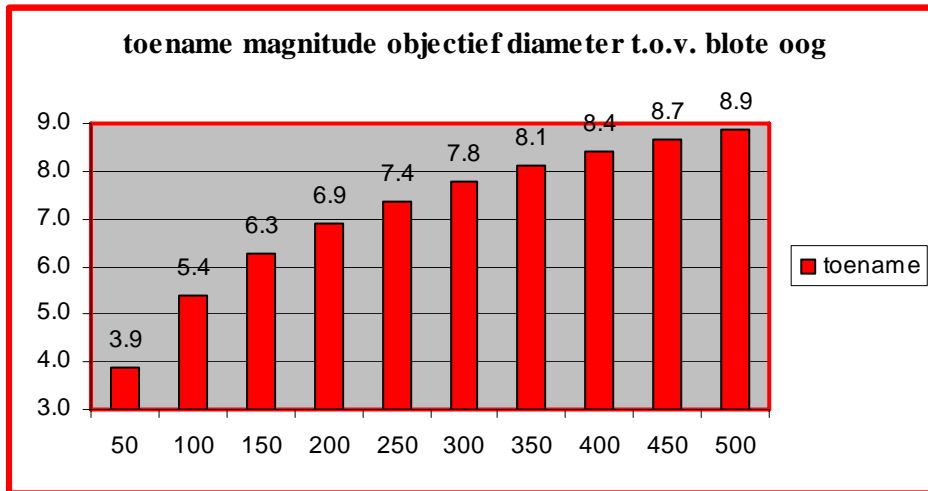
Tabel 1: Toename grensmagnitude bij afname uittreepupil

Pupil ↓	Objectief diameter en grensmagnitude				toename grensmagnitude
	100	200	300	400	
7	5.39	6.89	7.77	8.40	
6	5.56	7.06	7.94	8.57	0.17
5	5.73	7.23	8.11	8.74	0.17
4	5.92	7.42	8.30	8.93	0.19
3	6.13	7.63	8.51	9.14	0.21
2	6.35	7.85	8.73	9.36	0.22
1	6.61	8.11	8.99	9.62	0.26
0.5	6.88	8.38	9.26	9.89	0.27

omstandigheden. Dat een grotere objectief diameter onder lichtvervulde omstandigheden niet meer te zien geeft dan een kleine is dus een fabeltje.

Met formule 5 kunnen we de toename in grensmagnitude berekenen voor een telescoop ten opzichte van de grensmagnitude voor het blote oog. In figuur 3 is voor een aantal objectiefdiameters de winst in grensmagnitude aangegeven ten opzichte van het blote oog, uitgaande van een oogpupil van 7 mm doorsnee⁴.

Figuur 3: toename grensmagnitude ten opzichte van het blote oog, voor verschillende objectiefdiameters.



We zien dat de winst in grensmagnitude bij groter wordend objectief in de gangbare range van amateur telescopen kleiner wordt naarmate het objectief groter wordt. De grensmagnitude neemt niet alleen toe met een groter objectief maar ook met hogere vergroting. We zullen dat aan de hand van een voorbeeld duidelijk maken.

Een voorbeeld

Een waarnemer heeft een oogpupil van 7 mm en de zwakste ster die hij in het zenit ziet is van magnitude 5.5. Hierbij hoort (berekend met formule 1) een achtergrondhelderheid van 19.63 magnitudes/boogseconde². De waarnemer bezit een 400 mm spiegeltelescoop. De vergroting is zo gekozen dat de uittreepupil even groot is als de oogpupil. Wat is de grensmagnitude met die telescoop onder die omstandigheden?

1. Winst voor een 400 mm objectief ten opzichte van het blote oog (met formule 5):
 $2.5 * \log((400^2 * 0.7) / 7^2) = 8.4 \text{ magnitudes}$.
2. De achtergrondhelderheid door de telescoop is, mede in aanmerking genomen de verdonkering door lichtverlies, met formule 4:
 $19.63 - 2.5 * \log((400^2 * 0.7) / ((400/7)^2 * 7^2)) = 20.02$
3. De hierbij behorende grensmagnitude 'blote oog' (met formule 2): = 5.78
4. Grensmagnitude van de telescoop onder die omstandigheden: 5.78 + 8.4 = *magnitude 14.18*.

We gaan nu zodanig vergroten dat de uittreepupil van 7 naar 5 mm gaat. Wat wordt dan de grensmagnitude door de telescoop voor die persoon? Om dit te kunnen berekenen, moeten we eerst de achtergrondhelderheid voor een uittreepupil van 5 mm berekenen met formule 4:
 $19.63 - 2.5 * \log((400^2 * 0.7) / ((400/5)^2 * 7^2)) = 20.75 \text{ magnitudes/boogseconde}^2$. Met formule 2 berekenen we de hierbij behorende grensmagnitude (blote oog) van 6.28. De grensmagnitude die de waarnemer nu, bij een uittreepupil van 5 mm, met de telescoop haalt: 6.28 + 8.4 = *magnitude 14.68*.

⁴ In dit artikel en ook in de volgende, gaan we uit van een maximaal zinvolle uittreepupil van 7 mm.

Dit geldt dus voor iemand met een oogpupil van 7 millimeter. Laten we nu eens kijken wat er gebeurt als de oogpupil van deze waarnemer niet groter zou kunnen worden dan 5 millimeter. Bij een uitreepupil van 7 mm gaat in dat geval een deel van het licht verloren, omdat het niet in de oogpupil terechtkomt. De grensmagnitude zal in dat geval door dat lichtverlies dus lager zijn dan magnitude 14.18. Hoeveel lager? Om dat te bepalen moeten we eerst uitrekenen:

1. *De absolute grensmagnitude van iemand met een maximale oogpupil van 5 mm.*
Gegeven ons uitgangspunt van een absolute grensmagnitude van 8.5 voor iemand met een 7 mm oogpupil heeft een waarnemer met een pupil van 5 mm een absolute grensmagnitude van $8.5 - 5 \log(7/5) = 7.77$.
2. *De achtergrondhelderheid 'blote oog' voor iemand met een oogpupil van 5 mm.*
Met een pupil van 5 mm komt niet alleen minder sterlicht in het oog, maar ook minder achtergrondlicht. Doordat iemand met een kleinere oogpupil de sterren tegen een donkerder achtergrond ziet, wordt het verlies aan sterlicht in zekere mate gecompenseerd⁵. De achtergrondhelderheid 'blote oog' voor deze waarnemer is geen 19.63 maar: $19.63 + 2.5 * \log(7/5) = 20.36$ magnitudes/boogseconde². En met de betreffende telescoop (formule 4 zoals hierboven): 20.75 magnitudes/boogseconde².

Kijkend door deze telescoop haalt deze persoon (berekend met formule 2, maar met een absolute grensmagnitude van 7.77) een grensmagnitude (omgerekend naar 'blote oog'), van 5.55, dus 0.23 magnitudes zwakker dan van de waarnemer met een pupil van 7 mm als die door dezelfde telescoop kijkt. Door de 400 mm telescoop, dus de bovenvermelde winst van 8.4 magnituden van deze telescoop in aanmerking genomen, ziet deze persoon dus sterren tot magnitude $5.55 + 8.4 = 13.95$, waar de andere waarnemer 14.18 haalde.. Gaan we nu een andere vergroting toepassen, waardoor we op een uitreepupil van 5 mm uitkomen (even groot dus als zijn oogpupil), dan wordt de achtergrond voor deze persoon niet nog donkerder, maar wordt het sterlicht dat met een uitreepupil van 7 mm buiten zijn oogpupil viel, in zijn oogpupil gebracht. Dit levert hem $5 * \log(7/5) = 0.73$ magnituden extra op, waarmee hij uitkomt op magnitude $13.95 + 0.73 = 14.68$; op dezelfde telescopische grensmagnitude dus, als de andere waarnemer. Een kleinere oogpupil heeft bij gebruik van een telescoop dus geen effect op grensmagnitude, mits de oogpupil niet kleiner is dan de uitreepupil.

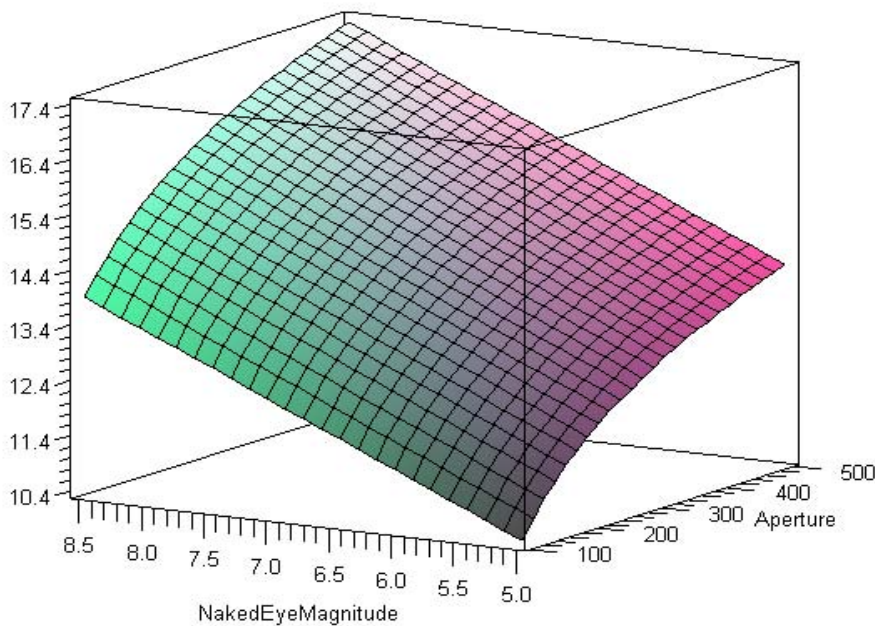
Gaan we nog meer vergroten dan zal het achtergrondlicht steeds meer worden uitgesmeerd, totdat de grensmagnitude bij het naderen van een absoluut donkere achtergrond⁶, omgerekend voor het blote oog, de absolute grens van magnitude 8.5 nadert. Op dat moment is ook de grensmagnitude voor de betreffende telescoop bereikt. Deze is eenvoudig te berekenen door bij de waarde 8.5 de in figuur 3 vermelde waarde voor de telescoop op te tellen. Voor de 400 mm telescoop uit het voorbeeld is de absolute berekende grensmagnitude dus $8.5 + 8.4 =$ magnitude 16.9.

In de waarneempraktijk zal deze waarde niet altijd behaald worden, omdat ook seeing (waardoor uitsmering van het sterlicht optreedt), ervaring, leeftijd, vuil op het objectief, de kleur van de ster waar men naar kijkt en dergelijke (zie literatuur 2 en 3) een rol spelen. Maar ook is het zo, dat onder ideale omstandigheden zeer ervaren waarnemers hogere grensmagnitudes halen.

⁵ Bij de berekening van de absolute grensmagnitude in 1, hoefden we daar geen rekening mee te houden, omdat het al absoluut donker is bij magnitude 8.5. In dit geval is de achtergrond met een kleinere oogpupil dus niet nog donkerder, waardoor ook geen compensatie optreedt.

⁶ In de praktijk zal dit overigens onder zeer lichtvervulde omstandigheden alleen bij onrealistische vergrotingen het geval zijn.

In onderstaande 3D-grafiek staat links (vertikaal) de grensmagnitude met telescopen van 100-500 mm objectiefdiameter, voor blote oog grensmagnituden van 5 tot het absolute maximum van 8.5. Te zien is, om enkele voorbeelden te noemen, dat de grensmagnitude van een 500 mm telescoop loopt van ongeveer 14.3 bij een grensmagnitude van 5 tot magnitude 17.3 voor absolute donkerte. In de praktijk bereik je die met de maximale vergroting van ongeveer 1000x (uittreepupil 0.5 mm). Voor een 100 mm telescoop loopt de grensmagnitude van 10.5 tot 13.8 ongeveer.



6. Grensmagnitude, achtergrondhelderheid en lichtvervuiling

In tabel 2 kunnen we opzoeken wat de winst in grensmagnitude is (omgerekend naar grensmagnitude ‘blote oog’⁷) voor een willekeurige telescoop onder zeer slechte (stad) tot zeer goede (geen lichtbronnen in de verre omgeving) omstandigheden, bij een kleinere uittreepupil dan 7 millimeter⁸. In de tabel staan waarden voor uittreepupils van 7 mm tot 0.5 millimeter, de in de praktijk nog bruikbare maximum en minimum uittreepupil.

⁷ Voor de grensmagnitude van een telescoop bij een bepaalde uittreepupil, moeten we er de bij de telescoop behorende waarde uit figuur 3 bij optellen.

⁸ De twee decimalen in de tabel geven een overdreven indruk van de nauwkeurigheid. Er zijn toch twee decimalen genoteerd om te voorkomen dat er bij qua grootte vlak bij elkaar liggende oogpupillen dezelfde grensmagnitudes zouden staan.

Tabel 2: relatie achtergrondhelderheid, uittreepupil en grensmagnitude

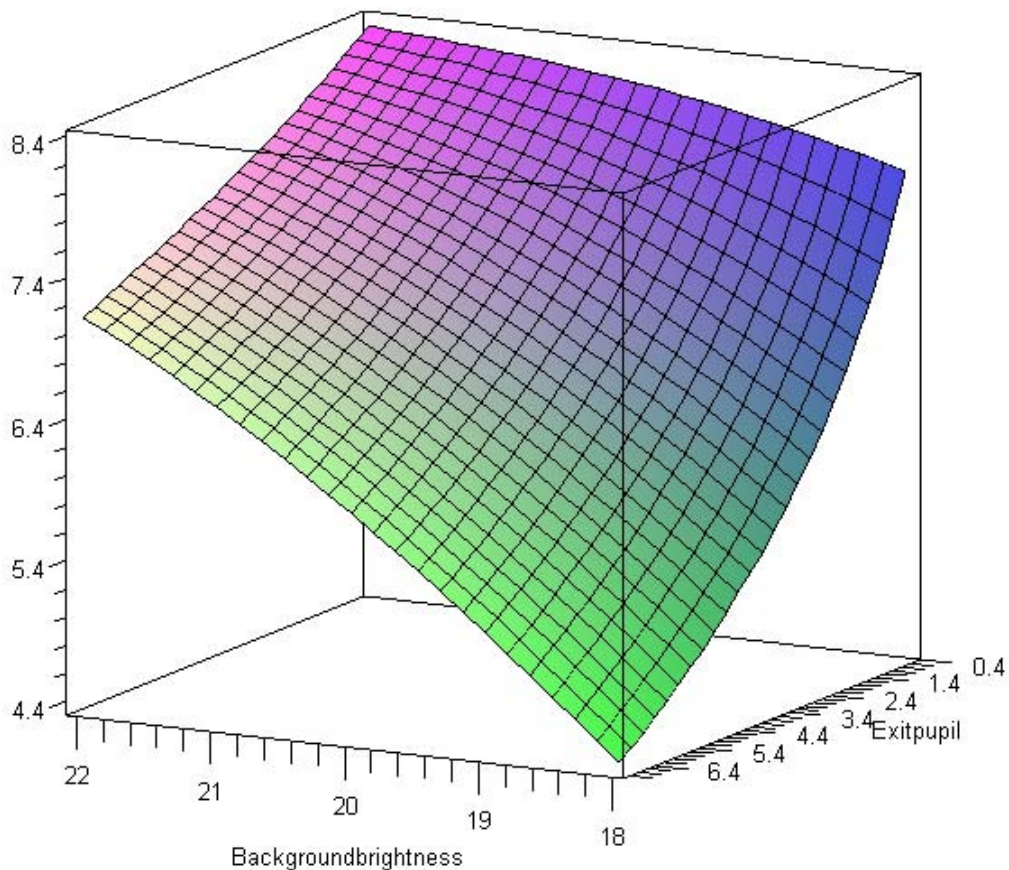
Uittreepupil ↓	Achtergrondhelderheid en grensmagnitude, omgerekend voor blote oog*								
	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22
7	4.18	4.60	5.01	5.40	5.77	6.12	6.44	6.73	6.99
6.5	4.32	4.74	5.14	5.52	5.89	6.22	6.54	6.82	7.07
6	4.47	4.88	5.28	5.65	6.01	6.33	6.64	6.91	7.16
5.5	4.62	5.03	5.42	5.79	6.13	6.45	6.74	7.01	7.24
5	4.80	5.20	5.58	5.93	6.27	6.58	6.86	7.11	7.33
4.5	4.98	5.37	5.74	6.09	6.41	6.71	6.97	7.21	7.42
4	5.18	5.56	5.92	6.26	6.57	6.85	7.10	7.32	7.52
3.5	5.41	5.78	6.12	6.44	6.73	7.00	7.23	7.44	7.62
3	5.66	6.01	6.34	6.64	6.91	7.16	7.37	7.56	7.73
2.5	5.94	6.27	6.58	6.86	7.11	7.33	7.53	7.69	7.84
2	6.26	6.57	6.85	7.10	7.33	7.52	7.69	7.83	7.95
1.5	6.64	6.92	7.16	7.38	7.56	7.73	7.87	7.98	8.08
1	7.10	7.33	7.52	7.69	7.83	7.96	8.06	8.14	8.21
0.5	7.69	7.84	7.96	8.06	8.14	8.21	8.27	8.31	8.35

* Het bovenste getal (in rood) in bovenstaande kolommen is steeds de achtergrondhelderheid bij verschillende graden van lichtvervuiling (18 = sterk lichtvervuild, 22 = geen lichtvervuiling). De andere getallen in deze kolommen zijn de bij de achtergrondhelderheid en bij de uittreepupil in de linkerkolom behorende grensmagnitudes

We zien het volgende.

1. Duidelijk blijkt het belang van een donkere hemel. Een voorbeeld: een ster van magnitude 7 (plus de extra magnitudes voor een bepaalde telescoop) is bij de meest lichtvervuilde hemel (geheel links in tabel 2) pas te zien bij een uittreepupil van 1 mm, terwijl het bij een echt donkere hemel (geheel rechts) al bij een uittreepupil van 7 mm te zien is. In dit laatste geval ligt er nog een heel scala van vergrotingen open om details in het object te bekijken en bijvoorbeeld in een open sterrenhoop nog zwakkere sterren zichtbaar te maken, terwijl het in het eerste geval bij 'net zichtbaar' blijft. Dit gegeven is bij uitgebreide objecten nog belangrijker, zoals we in het volgende artikel over deze materie zullen zien.
2. De toename in grensmagnitude door vergroting bij een sterk lichtvervuilde hemel (grensmagnitude 4) is veel groter dan die onder een donkere hemel (van grensmagnitude 7). Dat is logisch, omdat je in het laatste geval al dichterbij het maximum van magnitude 8.5 begint. Dit impliceert, dat zelfs onder een sterk lichtvervuilde hemel op sterren toch een hoge grensmagnitude te halen is. De toename in grensmagnitude bij een uittreepupil van 0.5 mm is $7.69 - 4.18 = 3.51$ magnitudes bij een sterk lichtvervuilde hemel (meest linker kolom in tabel 2) en $8.35 - 6.99 = 1.36$ magnitudes bij een donkere hemel (meest rechter kolom). Het aanvankelijke magnitudeverschil tussen deze twee kolommen van 2.81 magnitudes bij een uittreepupil van 7 mm, is dus bij een uittreepupil van 0.5 mm afgenomen tot 0.66 magnitudes. Bij een uittreepupil van 1 mm (in de praktijk vaker haalbaar dan 0.5 mm), is het verschil $8.21 - 7.1 = 1.11$ magnitudes. Al duidelijk meer verschil dus, maar altijd nog beduidend gunstiger dan de 2.81 magnitudes bij een 7 mm uittreepupil. Vergelijken we een wat minder extreem vervuilde hemel, zeg met grensmagnitude (voor blote oog) van magnitude 6.12 zoals op goede plaatsten in Nederland en België soms voorkomt, dan is bij een uittreepupil van 1 mm het verschil met een echt donkere hemel slechts $8.21 - 7.96 = 0.25$ magnitude. Hoge vergrotingen kunnen dus het effect van lichtvervuiling op de met een telescoop haalbare grensmagnitude voor een belangrijk deel compenseren. Dit gegeven is van belang als we kleine objecten, dus objecten met relatief een *hoge oppervlaktehelderheid* willen waarnemen, waarin het licht

vrij geconcentreerd is. Hieronder vallen natuurlijk sterren, maar bijvoorbeeld, zij het in iets mindere mate, ook kleine planetaire nevels en de vaak heldere kernen van kleine galaxies en bolhopen. Ook het waarnemen van kleine, niet al te lichtzwakke details in wat meer uitgebreide en niet al te zwakke deepskyobjecten is op deze manier zelfs onder een niet optimale hemel mogelijk. Hiermee nemen we alvast een voorschot op de bespreking van het waarnemen van uitgebreide deepskyobjecten in het volgende artikel over visueel waarnemen.



In bovenstaande 3D-figuur, zijn dezelfde gegevens samengevat als in tabel 2 hierboven. De verticale as geeft de grensmagnituden. Voor de grensmagnitude met een telescoop moeten daar de voor de betreffende telescoop geldende waarden uit figuur 3 hierboven worden opgeteld. Ook in deze figuur is duidelijk te zien (zie de linkerrand van de grafiek), dat met hoge vergroting, dus een kleine uittreepupil, onder een vervuilde hemel nog een vrij hoge grensmagnitude is te halen. Van dit gegeven kunnen we gebruik maken bij het kijken naar sterren en naar kleine planetaire nevels onder suboptimale omstandigheden.

Formules

1. Berekening van de achtergrondhelderheid uit de grensmagnitude:
 $A=22-5*\log(10^{(1.7-G/5)}-1)$; A = achtergrondhelderheid, G is grensmagnitude.
2. Berekening van de grensmagnitude uit de achtergrondhelderheid:
 $G=8.5-5*\log(1+10^{(4.4-A/5)})$.
3. Berekening van de verdonkering van de achtergrond door vergroting:
 $V=-2.5*\log((\text{aperture}^2*0.7)/(\text{vergrot}^2*7^2))$; V =verdonkering, 0.7 is de transmissiefactor (lichtverlies in de telescoop), 7 = maximum bruikbare uittreepupil.
4. Berekening van de verdonkering door verkleining uittreepupil:
 $V=-2.5*\log((\text{aperture}^2*0.7)/((\text{aperture/uittreepupil})^2*7^2))$
5. Formule 5 : berekening toename grensmagnitude telescoop ten opzichte van blote oog:
 $GT=2.5*\log((\text{aperture}^2*0.7)/7^2)$; GT = grensmagnitude telescoop.
6. Formule 6: omrekening naar grensmagnitude zenit voor grensmagnitudes die op een lagere hoogte zijn bepaald.
 $L=k*I/\cos(za)$; k = extinctiefactor, variërend van 0.15-0.25 in redelijk heldere lucht, za = zenith angle: hoek tussen zenit en waargenomen ster.

Literatuur

1. Roger N. Clark: Visual astronomy of the deep sky, Sky Publishing Corp., USA, 1990.
2. Bradley E. Schaefer: Telescopic limiting magnitudes, NASA-Godard space flight center, Code 661, Greenbelt, Maryland, 20771, 1989.
3. <http://zebu.uoregon.edu/~mbartels/visual/nils/Schaefer.html> :Nils Olof Carlin: About Bradley E. Schaefer: Telescopic limiting Magnitudes (1990).
4. http://www.astropix.com/HTML/L_STORY/SKYBRITE.HTM :Brian Skiff: How dark can the night sky get?
5. <http://www.inquinamentoluminoso.it/dmsp/artbri.html> : The night sky in the World: Satellite monitoring of the artificial night sky brightness and the stellar visibility.
6. R.H. Garstang: Night-sky Brightness at Observatories and sites, publications of the Astronomical Society of the Pacific, 101, 306-329, March 1989.
7. R.H. Garstang: Dust and Light Pollution, publications of the Astronomical Society of the Pacific, 103, 1109-1116, October 1991.
8. <http://www.unihedron.com/projects/darksky/database/> SQM readings, database.
9. <http://www.bbastrodesigns.com/visual.html> Mel Bartels: Visual Astronomy: an investigation into the visual optimum detection magnification.
10. I.S. Bowen: Limiting Visual Magnitude, publications of the Astronomical Society of the Pacific, 59, 253, 1947.
11. <http://obs.nineplanets.org/lm/rjm.html> Estimating limiting magnitude.
12. H.D. Curtis: On the limits of averted vision, Lick observation bulletins, 2, 67-79.
13. H. A. Knoll, R. Tousey, and E. O. Hulburt, Visual thresholds of steady point sources of light in fields of brightness from dark to daylight, J. Opt. Soc. 36, 1946.
14. http://unihedron.com/projects/darksky/sqmreport_v1p4.pdf Pierantonio Cinzano: Night Sky Photometry with Sky Quality meter, ISTIL internal report n. 9, v 1.4 2005.
15. Clark, R. N. (1994) How faint can you see? Sky & Telescope, 87(4, April), 106.