

Achtergrondhelderheid, grensmagnitude en vergroting.

door Jan van Gastel

1. Inleiding

Het is bekend dat een hoge vergroting de hemelachtergrond donkerder maakt, waardoor je een hogere grensmagnitude haalt, waardoor zwakkere objecten zichtbaar worden. Ook daar zijn echter weer grenzen aan. Zoals Clark in zijn boek "Visual astronomy of the deepsky" uiteenzet, wordt bij een boven een bepaalde vergroting een object weer slechter zichtbaar en is er eigenlijk voor elk object een "optimum detection magnification". Voor puntbronnen (sterren) gelden weer andere "regels" dan voor uitgebreide objecten. Gebruik makend van formules uit het boek van Clark en anderen (zie literatuur), heb ik wat zitten rekenen, om te zien hoe de relatie tussen vergroting, achtergrondhelderheid en grensmagnitude nu eigenlijk in elkaar zit.

2. De achtergrondhelderheid.

De achtergrondhelderheid kan men berekenen uit de grensmagnitude, uit de vergroting die men met een bepaalde telescoop toepast en, wat eigenlijk hetzelfde is, met behulp van de grootte van de uittreepupil. Om vanuit de grensmagnitude (in het zenit) de achtergrond helderheid te berekenen kan de volgende formule worden gebruikt:

$Ba = 21.58 - 5 * \log(10^{(1.586 - lmag/5)} - 1)$ (1), waarin:

Ba = achtergrondhelderheid en $lmag$ is grensmagnitude. Uitgangspunt is, dat de donkerste hemel die voorkomt (zonder vergroting en met een 7 mm pupil) een achtergrondhelderheid heeft van 21.58 magnituden/boogseconde² (Blackwell). Brian Skiff noemt 22 mag/boogseconde² als de meest donkere hemelachtergrond in de praktijk en Clark zelfs van 24 mag/boogseconde². Je kunt de achtergrondhelderheid opvatten als het licht van een sterretje van magnitude 21.58, dat is uitgesmeerd over een oppervlak van een vierkante boogseconde. Enkele voorbeelden: in een sterk lichtvervuilde plaats, met een grensmagnitude van 4, is de achtergrondhelderheid slechts 18 mag/boogsec², in een plaats zoals die op donkere plaatsen in de Ardennen en in de Flevopolder in Nederland wel voorkomt, met grensmagnitude omstreeks 6, is de achtergrondhelderheid 20.8 mag/boogsec². De waarde van 21.58 wordt bereikt bij ongeveer magnitude 6.6. Het is absoluut donker bij 27 mag/boogsec². Dat kan uitsluitend worden bereikt als elke vorm van licht ontbreekt, ook sterlicht. Donkerder kan niet en bij deze waarde houdt dan ook de toename van de grensmagnitude op.

3. De grensmagnitude met het blote oog

Met 'grensmagnitude' wordt de zwakst zichtbare ster in het zenit bedoeld. Bekijk je een ster buiten het zenit, dan moet een correctie worden uitgevoerd. De met het blote oog haalbare grensmagnitude in het zenit is (onder meer) afhankelijk van de donkerte van de achtergrond. We gaan in het hierna volgende uit van een oogpupil van 7 millimeter doorsnee. Wil je de grensmagnitude bepalen als je een kleinere oogpupil hebt, dan kan dat niet met een simpele formule. Eerst zal dan de achtergrondhelderheid moeten worden uitgerekend voor iemand met een kleinere oogpupil. Hieronder kom ik daar nog op terug. De maximaal haalbare grensmagnitude bij een maximaal donkere hemel van 27 mag/boogsec² is magnitude 7.97 (met een pupil van 7 mm). De bij een bepaalde achtergrond haalbare grensmagnitude wordt bepaald met de inverse van de formule ter berekening van de achtergrondhelderheid:

$grensmagnitude = 7.97 - 5 * \log(1 + 10^{(4.316 - ba/5)})$ (2), waarin 'ba' staat voor achtergrondhelderheid.

De relatie tussen beide grootheden is weergegeven in figuur 1. Te zien is, dat de

grensmagnitude bij een achtergrondhelderheid van 18 mag/boogsec² op ongeveer magnitude 4 ligt en bij 21.6 mag/boogseconde², de maximaal haalbare donkerte in de praktijk zonder hulpmiddelen, bij ongeveer 6.6.

Overigens geven verschillende bronnen enigszins verschillende grensmagnitudes op. Clark bijvoorbeeld, noemt een grensmagnitude van 7-7.5 onder een echt donkere nachthemel. De uiterste haalbare grensmagnitude bij absolute duisternis en volledige aanpassing van het oog is, aldus Clark, 8.5. Brian Skiff noemt een grensmagnitude van 8 onder ideale omstandigheden. Behalve van de donkerte van de achtergrond, is de grensmagnitude ook afhankelijk van de hoeveelheid deeltjes (aerosols genaamd) in de atmosfeer die het licht kunnen weerkaatsen. In de bergen zijn dit er gewoonlijk minder dan op of beneden zeeniveau, waardoor de grensmagnitude in de bergen bij eenzelfde donkerte van de achtergrond, vaak (flink wat) hoger zal liggen. De grensmagnitude die in de literatuur wordt gehanteerd hangt ook een beetje af van de berekeningswijze en natuurlijk zijn er (flinke) individuele verschillen. Omdat het in dit artikel niet zozeer gaat om de "werkelijke" grensmagnitude, maar om de relatie tussen grensmagnitude, achtergrondhelderheid en vergroting, is het niet zo belangrijk wat die grensmagnitude nu precies is. We gaan daarom uit van een absolute grensmagnitude van 7.97, bij een (theoretisch) absoluut donkere hemel met een achtergrondhelderheid van 27 mag/boogsec². Daarbij hoort een maximaal haalbare grensmagnitude van ongeveer 6.6, bij een nachthemel van 21.58 mag/boogseconde².

4. Vergroting en uittreepupil

Door te vergroten wordt het aanwezige licht over een groter oppervlak uitgesmeerd zodat de achtergrond donkerder wordt. Uitgestrekte objecten (nevels, galxies, etc.) worden ook in gelijke mate donkerder (het contrast verandert dus niet), maar sterren, puntbronnen, niet. Daarom zijn bij vergroting zwakkere sterren zichtbaar. Dat kan handig zijn bij het zoeken van een centrale ster in een nevel, of naar sterren in zeer zwakke bolhopen of open sterrenhopen. De afname van de achtergrondhelderheid (ofwel de toename van de donkerte van de achtergrond) door vergroting kan worden berekend met de volgende formule:
$$achtergrondhelderheid = Ba_{oog} - 2.5 * \log \left(\frac{aperture^2 * 0.7}{vergroting^2 * 7^2} \right) \quad (3)$$
$$Ba_{oog}$$
 staat voor de achtergrondhelderheid met het blote oog, 0.7 is de transmissiefactor (lichtverlies in de telescoop) en het getal $7'$ aan het eind van de formule is de doorsnee van de oogpupil.

Een zelfde vergroting heeft bij telescopen met verschillende objectiefdiameter een verschillende donkerte van de hemelachtergrond ten gevolge, vanwege een andere grootte van de uittreepupil. Het is dus handiger om uit te gaan van de relatie tussen de uittreepupil (in plaats van vergroting) en de achtergrondhelderheid en de grensmagnitude. Aan de hand van objectiefdiameter en vergroting is deze gemakkelijk te berekenen. Ter berekening vervangen we in de formule uit de vorige paragraaf 'vergroting' door 'aperture/uittreepupil'. De formule luidt dan:

$$achtergrondhelderheid = Ba_{oog} - 2.5 * \log \left(\frac{aperture^2 * 0.7}{(aperture/uittreepupil)^2 * 7^2} \right) \quad (4)$$

5. De grensmagnitude met een telescoop

Hoe reken je dit nu om naar de grensmagnitude die met een telescoop haalbaar is?

We gaan eerst in op het berekenen van de grensmagnitude met de grootste zinvolle uittreepupil. Grootst zinvol betekent: even groot als de maximale pupil van je oog. In figuur 2

is voor een aantal objectiefdiameters de winst in grensmagnitude aangegeven ten opzichte van het blote oog, uitgaande van een oogpupil van 7 mm doorsnee.

Voorbeeld: stel je hebt een oogpupil van 7 mm en de zwakste ster die je in het zenit ziet is van magnitude 5.5. Je hebt een 400 mm spiegeltelescoop. Wat is dan de grensmagnitude met die telescoop onder die omstandigheden?

1. Winst voor een 400 mm objectief ten opzichte van het blote oog:
 $2.5 \cdot \log((400^2 \cdot 0.7)/7^2) = 8.4$ magnituden.
2. Grensmagnitude van de telescoop (in deze situatie): $5.5 + 8.4 =$ magnitude 13.9.

Dit geldt voor iemand met een oogpupil van 7 millimeter en voor een uitreepupil van eveneens 7 mm. Wordt de pupil van je oog niet groter dan 5 millimeter, dan gaat een deel van het licht verloren, omdat het niet in je pupil terecht komt. Je grensmagnitude zal door dat lichtverlies dus lager zijn dan magnitude 13.9. Hoeveel lager?

Om dat te berekenen moeten we eerst uitrekenen hoe donker de achtergrond is van iemand met een oogpupil van 5 mm. Met een pupil van 5 mm komt namelijk niet alleen minder sterlicht in je oog, maar ook minder achtergrondlicht. Doordat iemand met een kleinere oogpupil de sterren tegen een donkerder achtergrond ziet, wordt het verlies aan sterlicht enigszins gecompenseerd. Voor iemand met een oogpupil van 7 mm is de achtergrondhelderheid bij een 5.5 grensmagnitude, 20 magnituden/boogseconde², voor iemand met een pupil van 5 mm (wiens absolute grensmagnitude geen 7.97 maar 7.24 is) is dat: $20 \cdot 5 \cdot \log(5/7) = 20.7$ magnituden/boogseconde². Bij een achtergrondhelderheid van 20.7 hoort een (blote oog) grensmagnitude van ongeveer 5.3. Door de 400 mm telescoop ziet deze persoon dus sterren tot magnitude $5.3 + 8.4 = 13.7$. Gaan we nu een andere vergroting toepassen, met een uitreepupil van 5 mm, dan gebeurt het volgende. Voor de persoon met een oogpupil van 7 mm wordt, zo kunnen we met formule (4) berekenen¹, de achtergrond donkerder als gevolg van de vergroting en gaat van 20 naar 20.7 mag/boogseconde². Dit levert een halve magnitude winst op, waardoor de grensmagnitude met de 400 mm telescoop op $13.9 + 0.5 =$ magnitude 14.4 komt. Voor de persoon met de 5 mm oogpupil werkt het anders. In zijn geval wordt de achtergrond niet donkerder, maar wordt ook het sterlicht dat met een uitreepupil van 7 mm *buiten* zijn oogpupil viel, *in* zijn oogpupil gebracht. Dit levert hem $5 \log(7/5) = 0.7$ magnituden extra op, waarmee hij uitkomt op $13.7 + 0.7 = 14.4$; op dezelfde grensmagnitude dus. Een kleinere oogpupil heeft bij gebruik van een telescoop dus geen effect op grensmagnitude, mits de oogpupil niet kleiner is dan de uitreepupil.

In tabel 1 kunnen we opzoeken wat de winst in grensmagnitude (omgerekend naar grensmagnitude 'blote oog') is bij een kleinere uitreepupil dan 7 millimeter². In de tabel staan waarden voor uitreepupils van 7 mm tot 0.5 millimeter: de in de praktijk nog bruikbare maximum en minimum uitreepupil. We zien het volgende:

1. De toename in grensmagnitude bij een sterk lichtvervulde hemel (grensmagnitude 4) is groter dan die onder een donkere hemel (van bijvoorbeeld grensmagnitude 6.6). Dat is logisch, omdat je al dichterbij het maximum van 7.97 begint in het geval van een donkere

¹ We vullen dan voor aperture en uitreepupil '5' in en laten de factor '0.7' weg.

² 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 vaak dezelfde grensmagnitudes zouden staan.

hemel. Dit impliceert, dat zelfs onder een sterk lichtvervuilde hemel op puntbronnen³ een hoge grensmagnitude te halen is. De maximale grensmagnitude (omgerekend naar 'blote oog' grensmagnitude) bij een uitreepupil van 0.5 mm is $4+3.28 = 7.28$ bij een sterk lichtvervuilde hemel (meest linker kolom in tabel 1) en $6.6+1.35 = 7.95$ bij een donkere hemel (meest rechter kolom). Het aanvankelijke verschil van 2.6 magnitudes bij een uitreepupil van 7 mm is dus bij een uitreepupil van 0.5 mm afgenomen tot 0.67 magnitudes. Bij een uitreepupil van 1 mm (in de praktijk vaker haalbaar dan 0.5 mm), is het verschil $7.81-6.76 = 1.05$ magnitudes. Al duidelijk meer verschil dus, maar altijd nog beduidend gunstiger dan de 2.6 magnitudes bij een 7 mm uitreepupil. Vergelijken we een wat minder extreem vervuilde hemel, zeg met grensmagnitude (voor blote oog) van magnitude 5.5, dan is bij een uitreepupil van 1 mm het verschil met een echt donkere hemel slechts $7.81-7.37 = 0.44$ magnitudes. Bij een uitreepupil van 0.5 mm is het verschil zelfs minder dan eenderde magnitude. Hoge vergrotingen, met een uitreepupil van 1-0.5 mm, kunnen dus het effect van lichtvervuiling op grensmagnitude voor een belangrijk deel compenseren. Dit gegeven is van belang als we kleine objecten, dus objecten met een *hoge oppervlakte helderheid* willen waarnemen, waarin het licht tamelijk geconcentreerd is. Hieronder vallen natuurlijk sterren, maar bijvoorbeeld ook kleine planetaire nevels en de vaak heldere kernen van kleine galaxies. Ook het waarnemen van kleine, niet al te lichtzwakke details in wat meer uitgebreide en niet al te zwakke deepsky objecten is op deze manier zelfs onder een niet optimale hemel nog goed mogelijk.

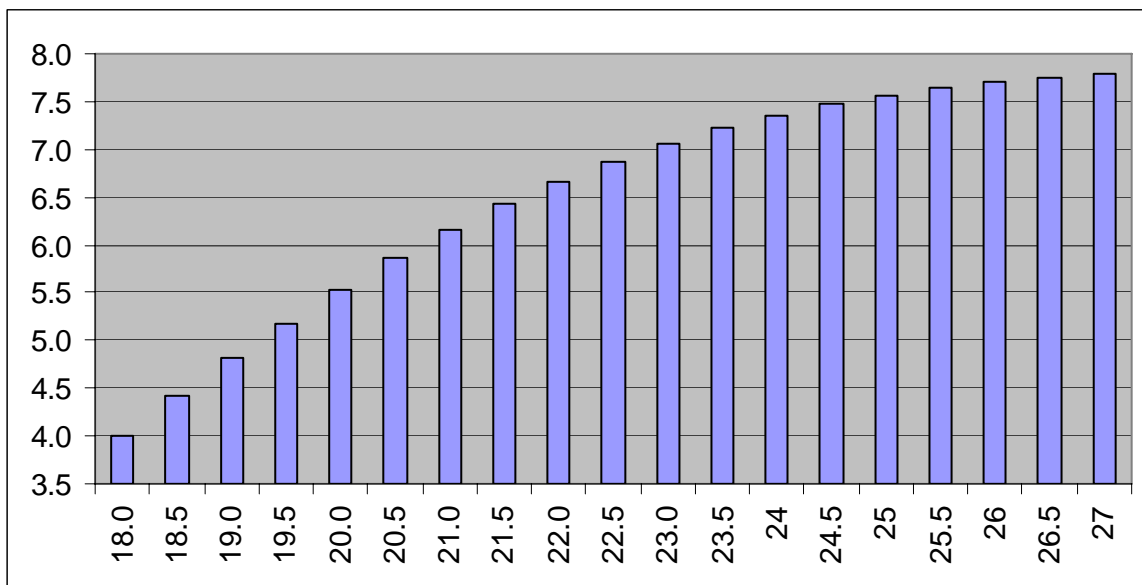
2. Naargelang de uitreepupil groter is, neemt het verschil in grensmagnitude tussen sterk en minder (of niet) lichtvervuilde omstandigheden toe. Met name voor objecten waarvoor een grotere uitreepupil noodzakelijk is (uitgebreide deepsky objecten met lage oppervlaktehelderheid) is een donkere hemel dus noodzakelijk. Goede voorbeelden zijn bijvoorbeeld M33 en M101. Daardoor zijn dit soort objecten, die bij een donkere hemel heel goed te zien zijn, vaak zelfs al met het blote oog, onder een sterk lichtvervuilde hemel zelfs met een telescoop heel slecht of zelfs helemaal niet te zien. Dit effect is des te groter, omdat het ook contrast tussen object en achtergrond door de lichtvervuiling sterk afneemt.
3. Voorts blijkt zeer duidelijk het belang van een donkere hemel uit tabel 1: Een object van magnitude 6.6 bijvoorbeeld is bij de meest lichtvervuilde hemel (geheel links in tabel 1) pas te zien bij een uitreepupil van 1 mm, terwijl het bij een echt donkere hemel (geheel rechts) al bij een uitreepupil 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, terwijl het in het eerste geval bij "net zichtbaar" blijft.

³ Seeing is hier een belangrijke factor, omdat bij slechte seeing het sterbeeld wordt uitgesmeerd en het dus minder een puntbron is als bij goede seeing. Daarom is bijvoorbeeld de zichtbaarheid van de centrale ster in M57 sterk afhankelijk van de seeing.

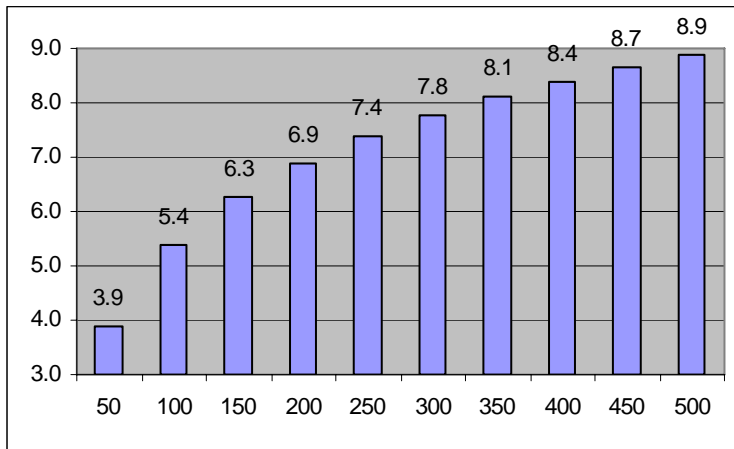
Tabel 1: Grensmagnitudo, achtergrondhelderheid en uittreepupil

Pupil ▼	4.0	4.4	4.8	5.2	5.5	5.9	6.2	6.6
	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.6
7.0	4.0	4.4	4.8	5.2	5.5	5.9	6.2	6.6
6.5	4.14	4.43	4.92	5.22	5.61	6.00	6.29	6.68
6.0	4.29	4.66	5.05	5.44	5.72	6.10	6.38	6.76
5.5	5.44	4.81	5.19	5.57	5.84	6.21	6.48	6.85
5.0	4.60	4.97	5.34	5.71	5.96	6.32	6.58	6.94
4.5	4.78	5.14	5.50	5.85	6.10	6.44	6.69	7.03
4.0	4.98	5.32	5.67	6.01	6.24	6.57	6.80	7.13
3.5	5.19	5.52	5.85	6.18	6.39	6.71	6.92	7.23
3.0	5.42	5.74	6.05	6.36	6.56	6.85	7.04	7.33
2.5	5.69	5.98	6.28	6.56	6.73	7.01	7.18	7.44
2.0	5.99	6.26	6.52	6.78	6.93	7.17	7.32	7.58
1.5	6.34	6.57	6.80	7.03	7.14	7.35	7.47	7.68
1.0	6.76	6.94	7.13	7.30	7.37	7.55	7.64	7.81
0.5	7.28	7.39	7.50	7.62	7.64	7.77	7.82	7.95

Figuur 1: Relatie achtergrondhelderheid en grensmagnitudo



***Figuur 2: toename grensmagnitude ten opzichte
Van het blote oog, voor verschillende objectiefdiameters.***



Literatuur

1. Roger N. Clark: Visual astronomy of the deep sky, Sky Publishing Corp., USA, 1990.
2. Bradley E. Schaefer: Telescopic limiting magnitudes, NASA-Godart space flight center, Code 661, Greenbelt, Maryland, 20771, 1989.
3. <http://clarkvision.com/visastro/index.html> : Roger N. Clark: Visual astronomy of the night sky
4. <http://cdcc.sc.usp.br/cda/telescopios/hp-mbartels/visual/visual.html> : Mel Bartels: Visual astronomy, an investigation into the visual Optimum Detection Magnification.
5. <http://web.telia.com/~u41105032/visual/Schaefer.htm> : Nils Olof Carlin: About Bradley E. Schaefer: Telescopic limiting Magnitudes (1990).
6. <http://web.telia.com/~u41105032/visual/blackwel.htm> : Nils Olof Carlin: Another interpretation of the data from Blackwell, H R (1946): Contrast Thresholds of the Human Eye.
7. http://www.astropix.com/HTML/L_STORY/SKYBRITE.HTM : Brian Skiff: How dark can the night sky get?