

Een hotspot voor UHECR's: zichtbaar met HiSPARC?

Vanuit de ruimte komen kosmische stralen op ons af. Dit zijn deeltjes die, wanneer ze in de atmosfeer komen, een cascade aan nieuwe deeltjes veroorzaken. Deze zogenaamde showers kunnen met HiSPARC-detectoren worden gedetecteerd. Waar de hemel voor kosmische straling meestal als isotrope emitter kan worden beschouwd, is er door het Telescope Array-experiment een hotspot gerapporteerd voor kosmische deeltjes met meer dan $57 \cdot 10^{18}$ eV (= 57 EeV) energie. In dit onderzoek is gekeken of deze hotspot ook in HiSPARC-data gevonden kan worden. Sabine I. Beijen

438

Vanuit de ruimte wordt de aarde voortdurend gebombardeerd door kosmische stralen. Deze stralen zijn feitelijk deeltjes die kunnen variëren in soort deeltje en energie en die in de atmosfeer een cascade aan nieuwe deeltjes kunnen veroorzaken. In figuur 1 is weergegeven hoe vaak een deeltje van een bepaalde energie voorkomt. In dit onderzoek wordt gekeken naar deeltjes in het ultra-hoogenergetische deel van het spectrum, de zogenaamde UHECR's (ultra-high energy cosmic rays). In 2013 waren er nog geen harde bewijzen voor anisotropieën in dit deel van het spectrum gevonden

[1]. Abbasi en collega's rapporteerden in augustus 2014 een hotspot aan de hemel op rechte klimming $146,7^\circ$ en declinatie $43,2^\circ$ voor kosmische straling met een energie groter dan 57 EeV [2]. Dit resultaat is gemeten met de Telescope Array (TA): een collaboratie tussen verschillende universiteiten en onderzoeksinstituten, die een meetopstelling voor airshowers in Utah beheren. In dit onderzoek is gekeken of deze hotspot ook in HiSPARC-data gevonden kan worden.

Dataselectie en analyse

Uit data van zes van de tien stations van HiSPARC cluster Science Park Amsterdam-Oost zijn hoogenergetische gebeurtenissen geselecteerd. Hiertoe is geëist dat deze zes stations in coincidentie zijn: zo worden alleen die showers geselecteerd die over een groot oppervlak meetbaar zijn. Vervolgens zijn er eisen gesteld aan de grootte van het signaal in de detectoren en is er geëist dat de richting van de shower gereconstrueerd kon worden. De verkregen dataset bevat 268 gebeurtenissen en is gecontroleerd op bekende verdelingen van zenit-hoek, azimuthhoek en tijdsintervalen tussen opeenvolgende gebeur-

tenissen. In figuur 2 is de verdeling van zenithoeken van de data weergegeven, met in groen de aan de data gefitte theoretische curve.

Voor de analyse is het equatoriale-coördinatensysteem op de hemel gebruikt. Hierin wordt de declinatie δ gemeten ten opzichte van de hemelevenaar en de rechte klimming α ten opzichte van de nulmeridiaan op de hemelbol. De verdeling van groot-heden wordt weergegeven met behulp van het Python package *Healpy*. Hierin worden histogrammen gemaakt in bins van gelijke oppervlakte op de bol. De verdeling van de 268 gebeurtenissen over de hemel is vergeleken met een isotrope verdeling, gecorrigeerd voor absorptie en zicht van de detectoren. Abbasi gebruikt een techniek (oversampling) om eventuele anisotropie in de verdeling te versterken. Hiervoor wordt voor elke bin de inhoud vervangen door de som van de inhoud van alle bins die een hoek kleiner dan twintig graden maken met betreffende bin. Deze techniek is toegepast op zowel de gemeten data als de berekende isotrope verdeling.

Voor het vergelijken van de gemeten en de isotrope verdeling wordt de procedure van Li-Ma [3] gevolgd, analoog aan de procedure van Abbasi. Deze

Na het afronden van de master Biomedical Engineering aan de Universiteit Twente, is Sabine Beijen in 2010 gestart als docent natuurkunde binnen het traineesprogramma Eerst de Klas. Sindsdien werkt zij met veel plezier op het Candeia College in Duiven. Sinds september 2014 geeft zij ook Onderzoek en Ontwerpen (Technasium) en doet zij één dag per week onderzoek bij het Nikhef in Amsterdam.



sbeijen@nikhef.nl

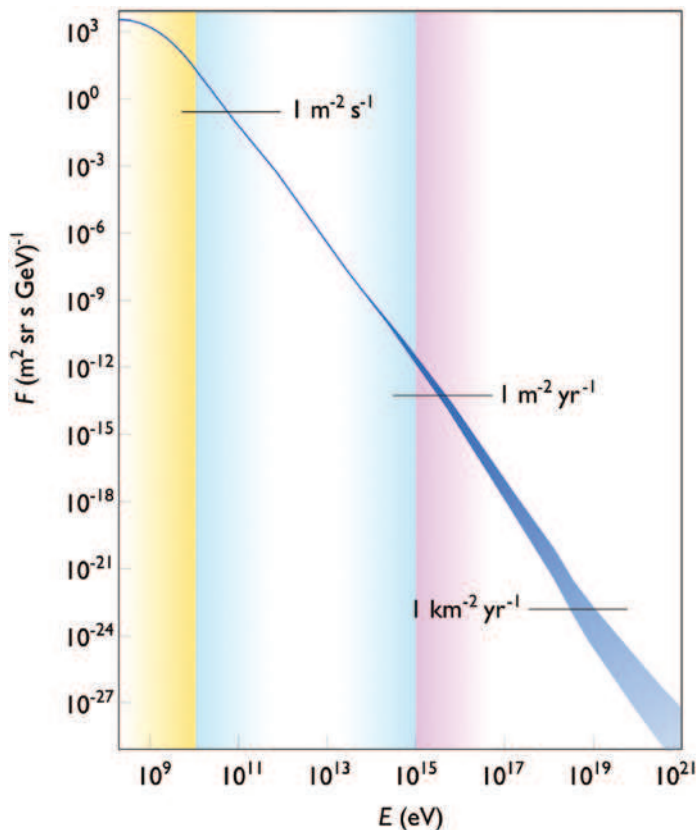
geeft een significantie voor het verschil van twee verdelingen, ook als de inhoud van de bins klein zijn. Om onderscheid te houden tussen te veel en te weinig metingen, wordt er een minteken voor de significantie gezet wanneer het aantal gemeten gebeurtenissen kleiner is dan verwacht.

Reproductie resultaten Telescope Array

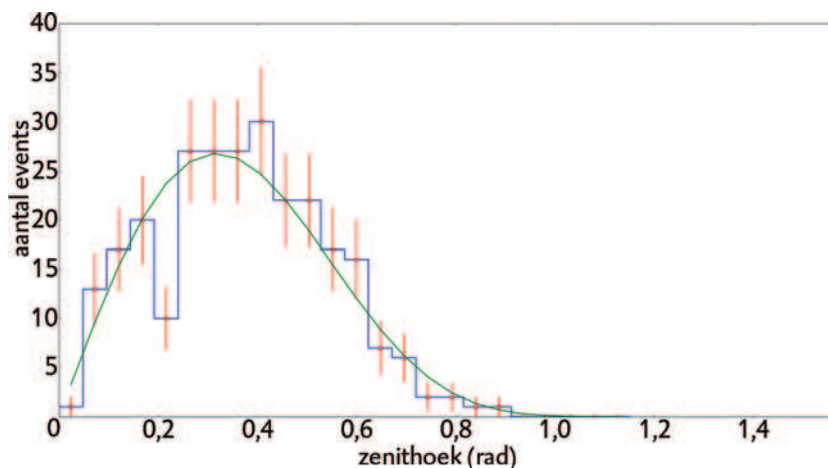
De procedure is getest door deze toe te passen op de dataset van Abbasi. (gedownload van [2]) en de resultaten te vergelijken met de gepubliceerde resultaten. In de HiSPARC-procedure is een andere wijze van binning gekozen. De oversamplingprocedure maakt de resultaten afhankelijk van het aantal bins in de histogrammen. Een groter aantal bins benadert beter de cirkels waarover Abbasi integreert. De berekening van de verwachte aantallen in de isotrope verdeling wordt alleen in het centrum van de bin gedaan. Voor grotere binoppervlaktes is deze waarde een slechtere benadering voor het gemiddelde over de bin. In onze procedure gebruiken wij 24.576 bins van gelijke oppervlakte op een halve bol, tegenover 3,24 miljoen bins van verschillende grootte op een halve bol bij Abbasi. Deze binning leidt tot een verschil van ongeveer 5% in de oversampled data en oversampled achtergrond en tot 7% verschil in significantie ten opzichte van de resultaten van Abbasi. ($5,1\sigma$ [2], tegen $4,8\sigma$ in deze studie).

Significantiekaart van HiSPARC-data

In figuur 3 zijn achtereenvolgens te zien: a) de HiSPARC-gebeurtenissen op de hemelbol geprojecteerd, b) de verwachte verdeling van 268 gebeurtenissen (isotroop verdeeld) over de hemelbol, c) de oversampled data en d) de oversampled verwachting. Voor figuren 3 en 4 geldt dat de rechte klimming van rechts $\alpha=0^\circ$ naar links $\alpha=360^\circ$ gaat en de declinatie van $\delta=0^\circ$ op de evenaar naar $\delta=90^\circ$ op de pool. Zoals beschreven kan nu op basis van de oversampled dataset en de oversampled achtergrond een significantiekaart worden gemaakt (figuur 4). In figuur 4 is het resultaat op basis van de HiSPARC-data te zien. Er is duidelijk te zien dat er plaatsen met meer en minder activiteit zijn, maar op de positie die gerapporteerd is door Abbasi, is geen hotspot te zien. De verdeling als



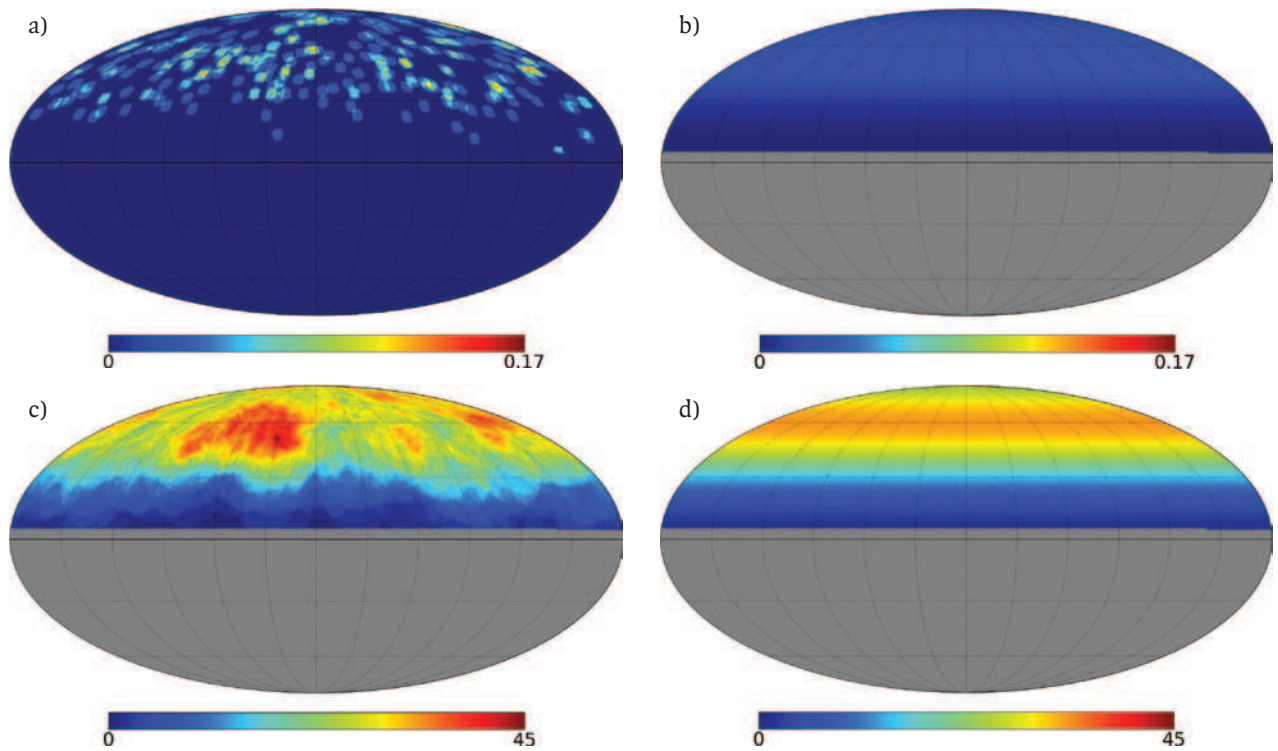
Figuur 1 De flux van de kosmische straling neemt bij benadering volgens een machtswet af met de energie [8].



Figuur 2 Verdeling van de zenithoeken in de dataset. Weinig events bij kleine hoeken is het gevolg van een kleine ruimtehoek. Steeds minder events bij grotere hoeken wordt veroorzaakt door grotere absorptie ten gevolge van de langere weglengte die de shower in de atmosfeer aflegt, gecombineerd met beperkt zicht van horizontaal geplaatste detectoren.

HiSPARC

Op het dak van ongeveer honderd deelnemende middelbare scholen in Nederland is een HiSPARC-station geplaatst. Zo'n station bestaat uit twee of vier detectoren. Scintillatorplaten in deze detectoren registreren passerende deeltjes. Wanneer meerdere stations gelijktijdig een gebeurtenis (passerend(e) deeltje(s)) waarnemen, kan dit als een shower worden aangemerkt. Door extra informatie zoals aankomsttijd, volgorde van afgaan van detectoren en de grootte van het signaal in de detectoren te registreren, kan er een uitspraak worden gedaan over karakteristieken van de shower, zoals de richting waaruit deze afkomstig was. Voor meer informatie, zie www.hisparc.nl.



Figuur 3 a) Weergave van de gemeten gebeurtenissen. Voor weergavedoeleinden is een gebeurtenis over meerdere bins verspreid. b) Verwachte hoeveelheden gemeten gebeurtenissen bij 268 gebeurtenissen. c) Data na oversampling met 20° . d) Gemodelleerde achtergrond na oversampling met 20° .

geheel is als isotroop te beschouwen.

Discussie

Om het ontbreken van een significante afwijking in HiSPARC-data van een isotrope verdeling te verklaren is het zinvol om eerst het HiSPARC-experiment te vergelijken met het TA-experiment (tabel 1).

In een presentatie tijdens de ICRC34 (Den Haag, 2015) is aangetoond dat bij lagere energieën de hotspot verdwijnt [6]. Uit tabel 1 wordt duidelijk dat de gebeurtenissen in de dataset van dit onderzoek van te lage primaire energie zijn. Dit verklaart de gevonden hemelkaart in dit onderzoek. De gebeurtenissen die door het TA-experiment zijn gemeten, werden veroorzaakt door kosmische deeltjes met een energie groter dan 57 EeV.

Behalve de inhoud van de datasets is tevens de wijze van modellering van de isotrope verdeling van belang. Het blijkt dat de door HiSPARC gemeten data de door de theorie beschreven zenitverdeling volgen (figuur 2). Daar-

naast blijkt ook in de data van Abbasi nog wel degelijk een zenithoekverdeling aanwezig te zijn, die te verklaren is met behulp van de theoretische beschrijving (figuur 5). Dit terwijl in het onderzoek van Abbasi is aangenomen dat absorptie geen rol zou spelen en derhalve is verwaarloosd. De data van figuur 5 ondersteunen verwaarlozing van de absorptie minder dan het meenemen ervan.

De data van het TA-experiment is daarom opnieuw geanalyseerd. Wanneer er wel rekening gehouden wordt met absorptie in de atmosfeer, blijkt met ons algoritme de significantie te dalen van $4,8\sigma$ tot $4,4\sigma$. De positie van de hotspot, op basis van TA-data, komt wel, ook met meeneming van absorptie, overeen met de door Abbasi gerapporteerde positie.

Het verschil in het waargenomen aantal gebeurtenissen door HiSPARC en door het TA-experiment (tabel 1) is, behalve door het verschil in primaire energie, goed te verklaren aan de hand van de meetoppervlakte en de absorp-

tie van showers in de atmosfeer. Het TA-experiment heeft een oppervlakte die 7.620 keer groter is dan het gebruikte oppervlak in HiSPARC. Dat heeft tot direct gevolg dat het TA-experiment dus ook 7.620 keer zo snel telt (met inachtneming van gelijke minimale energie). Doordat HiSPARC daarnaast op zeeniveau ligt, moeten de showers door een extra laag in de atmosfeer, ter grootte van 150 g/cm^2 . Dit veroorzaakt een extra verzwakking van $e^{-150/110} = 0,26$ [7].

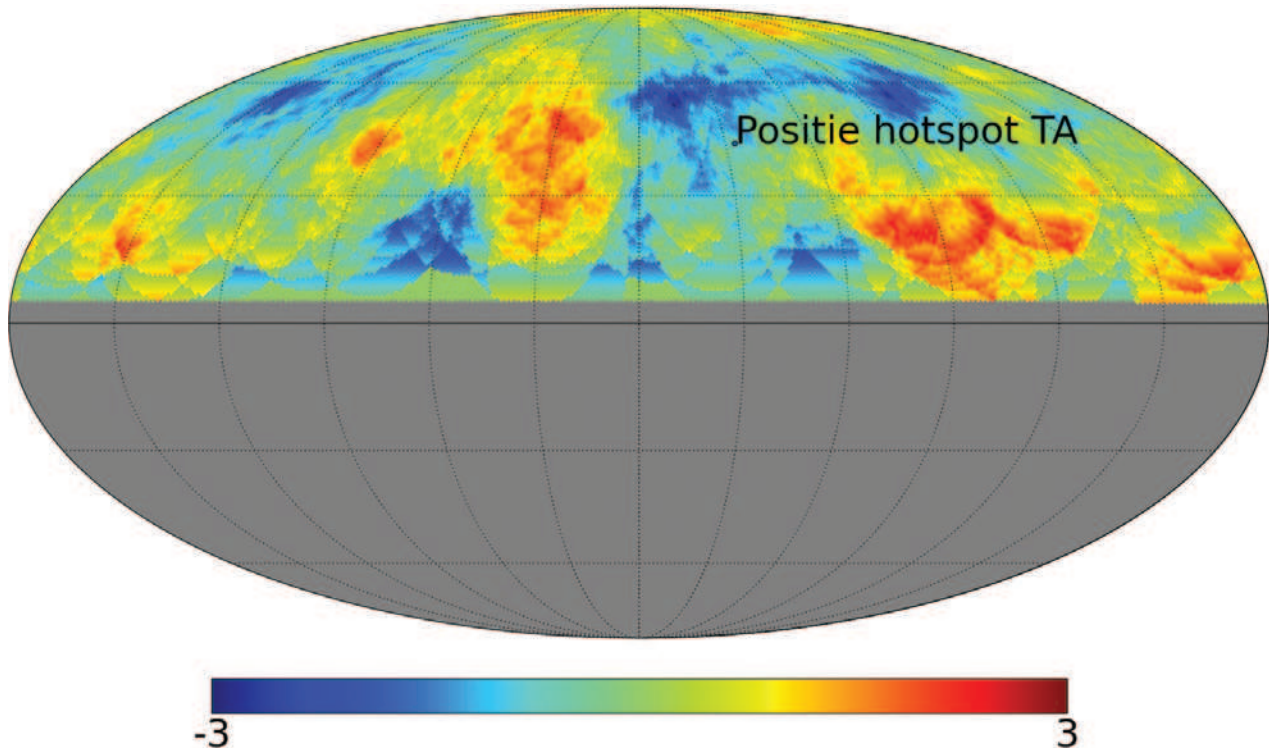
Nu de invloeden van meetoppervlak, hoogte en primaire energie op het aantal gebeurtenissen bekend zijn, resulteert dit in een verhouding

$$\frac{1,85 \cdot 10^5 \cdot 0,26}{7620} \approx 6.$$

HiSPARC zou onder de huidige omstandigheden dus tot zes keer zo veel gebeurtenissen moeten registreren als het TA-experiment. De gevonden factor uit de data blijkt 3,7. Deze lagere waarneming kan bijvoorbeeld verklaard worden door de uptime van de detec-

	Hoogte boven zeeniveau (km)	Minimale energie (EeV)	Hoeveelheid gebeurtenissen per vijf jaar	Meetoppervlak (km ²)
TA	1,40 [4]	57 [2]	72 [2]	762 [5]
HiSPARC	0,00	1	268	0,1 [9]

Tabel 1 Het verschil in het waargenomen aantal gebeurtenissen door HiSPARC en door het TA-experiment.



Figuur 4 Significantiekaart op basis van het algoritme van Li en Ma [3]. De punt geeft de gerapporteerde hotspot-positie van Abbasi aan.

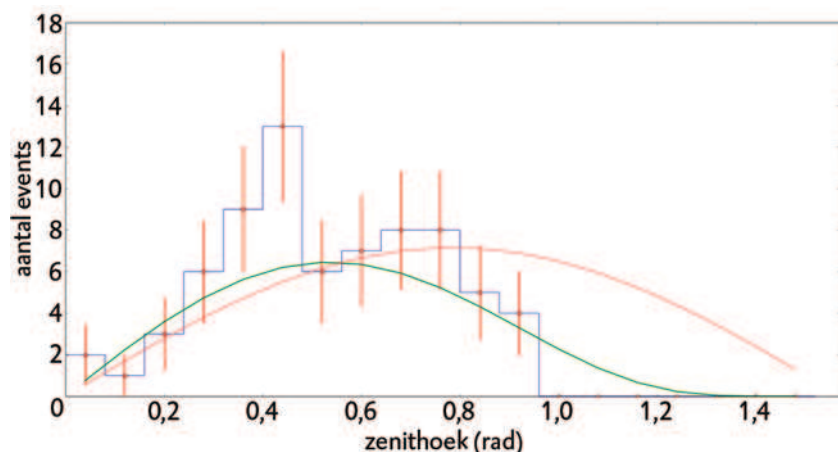
toren: waar het TA-experiment professioneel gerund is, draait HiSPARC op beperkte mankracht en vooral op vrijwillige inspanningen van docenten en leerlingen uit het voortgezet onderwijs. Dit heeft tot gevolg dat detectoren soms langer uit de lucht zijn.

Conclusies en vooruitblik

Er kan worden geconcludeerd dat de hotspot, zoals gerapporteerd door Abbasi, niet in de HiSPARC-data waar te nemen is. Het feit dat er uiteindelijk is gekeken in een energiegebied met showers vanaf 1 EeV in plaats van 57 EeV heeft hier een grote rol in gespeeld. Dat er rond 1 EeV geen anisotropieën zijn gevonden is in overeenstemming met bekende literatuur. Door in de toekomst het gehele HiSPARC-netwerk te gebruiken in plaats van alleen een selectie van stations op het Science Park, kan de hoeveelheid gemeten gebeurtenissen nog een paar ordes van grootte omhoog. Daarmee wordt geprobeerd de drempelwaarde voor de energie van de kosmische deeltjes omhoog te brengen. Docenten worden uitgenodigd deze analyses met hun eigen station uit te voeren.

Dankwoord

Dit werk had niet verricht kunnen



Figuur 5 De zenithverdeling van de gemeten gebeurtenissen door Abbasi. In groen de fit waarbij rekening gehouden wordt met absorptie, in rood de fit wanneer absorptie wordt verwaarloosd.

worden zonder de hulp van velen. Ik dank de NWO en het NIKHEF dat ze mij in de gelegenheid stelden dit werk te doen. Daarnaast dank ik B. van Eijk en A. de Laat voor alle geboden ondersteuning. Op deze plek tot slot een speciaal woord van dank aan J. Steijger, voor de kritische blik op het werk en het actief meedenken!

Referenties en noten

- 1 J.M. Santander, *Observation of cosmic ray anisotropy at TeV and PeV energies in the southern sky*, PhD thesis University of Wisconsin-Madison, 2013.
- 2 R.U. Abbasi et al., *Astroph. J. Lett.* **790** (2014): L21, 2014 link naar data

<http://iopscience.iop.org/2041-8205/790/2/L21/article> onder Table 1.

- 3 T. Li en Y. Ma, *Astrophys. J.* **272** (1983) 317.
- 4 T. Abu-Zayyad et al., *Nucl. Instru. Meth. Phys. Res. A* **689** (2012) 87.
- 5 H. Kawai et al., *Nucl. Phys. B* **175-176** (2008) 221.
- 6 C. Jui, Presentatie ICRC '15 Den Haag 04-08-2015.
- 7 T. Antoni et al., *Astropart. Phys.* **19** (2003) 703.
- 8 Bron figuur 1: Sven Lafebre, Wikipedia, Cosmic ray flux versus particle energy, https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray#/media/File:Cosmic_ray_flux_versus_particle_energy.svg, datum bezocht: 12-07-2015.
- 9 Schatting op basis van de positie van stations die gebruikt zijn voor dataselectie.