

Leraar in Onderzoek 2016-2017

Hoogenergetische Kosmische Straling

eindredactie J.J.M. Steijger

*Nationaal Instituut voor subatomaire fysica (Nikhef),
Postbus 41882, NL-1009 DB Amsterdam, Nederland.*

28 november 2017



vlnr achterste rij: Reno Beekman, Jeroen Bezemer, Nathalie van der Weiden, Kasper van Dam, Tom Kooij, Niek Schultheiss en Mark van de Ven.

voorstte rij: Khalid Akrikez, Jos Steijger, helaas afwezig: Bob van Eijk en Jan-Willem van Holten.

Inhoudsopgave

1	Introductie Leraar in Onderzoek	5
2	Trigger efficiëntie van een station	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Kosmische straling: airshowers	7
2.2.1	Energie van airshowers	8
2.2.2	Detectie van kosmische straling	10
2.2.3	Doelstelling en onderzoeksvragen	11
2.3	Meetmethode 1	11
2.4	Resultaten 1	12
2.5	Meetmethode 2	13
2.6	Resultaten 2	14
2.7	Conclusies	16
2.8	Dankwoord	16
3	Extensive airshowers en bliksem 2: een verband?	17
3.1	Inleiding	17
3.2	Gebruikte meetgegevens: HiSPARC en KNMI	19
3.3	Combineren van meetgegevens tot coïncidenties	19
3.4	Resultaten: gevonden coïncidenties nader bekeken	20
3.5	Conclusie en discussie	23
4	Schatting van de plaats van de shower core aan de hand van aankomsttijden	25
4.1	Kosmische straling	25
4.1.1	Deeltjeslawine = Air Shower	25
4.1.2	Hadronische shower	26
4.1.3	Elektromagnetische showers	27
4.1.4	Absorptie	27
4.1.5	Vorm van het showerfront	27
4.2	Detectie Extensive Airshowers met HiSPARC	28
4.2.1	HiSPARC project	28
4.2.2	Stations en Detectoren	28
4.2.3	Dataregistratie	29
4.2.4	Tijd registratie	30
4.2.5	Data-analyse	30
4.3	Verschillen in aankomsttijden	30
4.3.1	Onderzoeksvraag	31
4.4	Methode	32
4.4.1	Data	32
4.4.2	Tijden	32
4.4.3	Projecteren in projectievlak	33
4.4.4	Gereconstrueerde MIP-waarden	35
4.4.5	Interpolatie aankomsttijden	36
4.5	Resultaten	36
4.5.1	Aankomsttijden en MIP-waarden tot de afstand van de core	36
4.5.2	3D- curve fit	37
4.5.3	Andere events	38
4.5.4	Positie van de core	38
4.5.5	Aankomsttijden en MIP-waarden	39
5	Is een Forbush Decrease waar te nemen in de detectie van HiSPARC?	41
5.1	Samenvatting	41
5.2	Inleiding	41
5.3	Methode	44
5.4	Correctie op druk en temperatuur	44
5.5	Correctie op Zenithoek	46
5.6	Resultaten	47
5.7	Conclusie	49
6	Richtingreconstructie bij opstellingen van drie stations.	54
6.1	Introductie	54
6.1.1	Kosmische straling en HiSPARC	54
6.1.2	Onderzoeksvragen en verwachting	55
6.2	Methode	55
6.2.1	Opbouw van de stations in de driehoek	55
6.2.2	Dataselectie	56
6.2.3	Richtingreconstructie	57
6.2.4	CORSIKA simulaties	58
6.3	Resultaten	58
6.3.1	Resultaten Zaanlands Lyceum	58
6.3.2	Resultaten Science Park	59
6.3.3	Resultaten CORSIKA simulatie Science Park	62
6.3.4	Conclusie en discussie	65
7	Konklusie	67

1 Introductie Leraar in Onderzoek

Een belangrijke komponent van de werkgelegenheid voor de studenten in de natuurkunde is het onderzoek. Leraren Natuurkunde in het voorbereidend wetenschappelijk onderwijs kunnen in hun drukke bestaan als leraar juist het contact met dat onderzoek verliezen. Daarom is er ongeveer 15 jaar geleden een programma ontwikkeld dat erop gericht is om dit risico te verkleinen. In het LiO project *Leraar in Onderzoek*, dat wordt uitgevoerd met financiële steun van de NWO (Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek), worden leraren natuurkunde in de gelegenheid gesteld om een jaar lang, één dag in de week, onderzoek uit te voeren bij een aan NWO gelieerde wetenschappelijke instelling.

HiSPARC stond in 2003 aan de wieg van dit programma. Sindsdien is het uitgebreid via de stichting FOM (in 2008) naar andere FOM instituten. Het programma is sinds 2014 NWO ondergebracht bij de STEM¹ Teacher Academy. Via dit programma komen docenten uit het voorgezet middelbaar onderwijs een jaar lang in nauw contact met de akademies, nemen nader kennis van de huidige wetenschappelijke wijze van werken, en ontwikkelen hun eigen onderzoeks vaardigheden. Zij zullen hierdoor enthousiasme voor een universitaire studie natuurkunde aan scholieren weten over te brengen. Studenten aan wie ook het bedrijfsleven zo'n behoefte heeft.

Nikhef, één van de vaders van het HiSPARC project, stelt in het kader van het LiO programma jaarlijks ruimte en begeleiding voor 5 à 6 leraren beschikbaar. Dit programma voorziet in een behoefte zoals blijkt

uit het feit dat het aantal sollicitaties voor een LiO positie elk jaar weer het aantal beschikbare posities overtreft. Er is ook ieder jaar weer een positieve evaluatie van de deelnemende docenten.

In het Nikhef is al sinds 2004 een *outreach* project actief onder de naam HiSPARC (High School Project on Astrophysics Research with Cosmics). Dit project heeft als doel dat middelbare scholen samen met wetenschappelijke instellingen een netwerk vormen om kosmische straling met extreem hoge energie te meten. HiSPARC biedt daarom scholieren de gelegenheid om deel te nemen aan echt wetenschappelijk onderzoek, waarvan de resultaten daadwerkelijk worden gebruikt om meer over deze mysterieuze en zeldzame kosmische deeltjes te weten te komen. Bovendien kunnen scholieren hun deelname aan het experiment gebruiken ter invulling van hun profielwerkstuk voor het eindexamen. Om deze reden combineert Nikhef deze twee projecten, en biedt de leraren de gelegenheid om hun onderzoek te doen met de HiSPARC data.

Reeds enige jaren is er, binnen en buiten het onderwijs, een roep om in het onderwijs de kunst van het programmeren op te nemen. HiSPARC heeft die wens opgepakt en is sinds een jaar of twee bezig hierin te voorzien met behulp van zogenaamde notebooks. Dit zijn stukjes werkende code met duidelijke uitleg. Die notebooks voeren kleinere taken uit en kunnen gekombineerd worden tot grotere programma's voor grotere taken. Gebruikers kunnen die notebooks naar believen aanpassen of uitbreiden voor andere, meer omvattende taken. Vele tientallen van die notebooks zijn gemaakt, en worden ook aan de deelnemers van

¹Science, Technology, Engineering and Mathematics.

het LiO beschikbaar gesteld. Deze jaargang van deelnemers aan het LiO programma onder wie een aantal zonder recente programmeer ervaring, blijken in oktober al werkende programma's te kunnen produceren. Tijdens het academische jaar 2016/2017 hebben vijf docenten onderzoek uitgevoerd op dit gebied van de subatomaire natuurkunde. Khalid Akrikez, Reno Beekman, Jeroen Bezemer, Mark van de Ven en Nathalie van der Weiden zijn werkzaam geweest bij Nikhef in Amsterdam. HiSPARC heeft door op meer dan 120 scholen een voor die scholen passende detector te installeren, een groot netwerk gekreëerd dat voor wetenschappelijke instituten en het LiO projekt interessant is. Leerlingen maken met behulp van *hun* detector kennis met wetenschappelijk onderzoek Dit resulteerde al in tientallen profielwerkstukken. Bij het hoger onderwijs werden in dit kader door studenten diverse bachelor en master theses geschreven. Ook hebben er twee promoties met dit experiment plaats gevonden. In het LiO programma maken de HAVO/VWO docenten kennis met deze academische kant van het HiSPARC experiment.

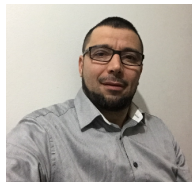
In de volgende hoofdstukken doen de vijf leraren verslag van hun eigen wetenschappelijk onderzoek. Naast dit onderzoek hebben de docenten ook bijdragen geleverd aan de ontwikkeling van lesmateriaal voor het voortgezet onderwijs in het kader van dit projekt.

Begeleiding: Bob van Eijk, Jan-Willem van Holten, Niek Schultheiss, Tom Kooij en Jos Steijger².

²Dit dokument (en de rapporten uit 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2014/2015 en 2015/2016) zijn ook elektronisch beschikbaar via de HiSPARC website www.hisparc.nl/docent-student/leraar-in-onderzoek/jaarverslagen/)

2 Trigger efficiëntie van een station

Khalid Akrikez



Na het afronden van mijn universitaire opleiding in Marokko en het behalen van mijn tweedegraadsbevoegdheid hier in Nederland heb ik 14 jaar als docent Natuurkunde en NLT op diverse middelbare scholen gewerkt. Sinds 2012 heb ik ook een eerstegraadsbevoegdheid behaald aan de Universiteit Utrecht.

In het kader van mijn Master studie heb ik een onderzoeksstage gelopen bij het KM3Net project. Dat was onder de leiding van Mw Els de Wolf. Momenteel ben ik werkzaam aan het Comenius College in Hilversum. Met ingang van het schooljaar 2016-2017 ben

ik ook als sectie leider voor het vak NLT.

Verder werk ik als LIO Leraar In Onderzoek voor het onderzoeksproject HiSPARC op het Nationaal Instituut voor subatomaire fysica (Nikhef) te Amsterdam.

2.1 Inleiding

Er zijn twee verschillende types stations in HiSPARC, onderscheiden door het aantal scintillators waaruit het station is opgebouwd. Sommige stations hebben twee detectoren de andere hebben er vier. Alle scintillatoren hebben dezelfde constructie en afmetingen, $0.5 \times 1 \text{ m}^2$ De verwachte telsnelheid is ongeveer 100 Hz in ieder van die detectoren [1] Deze frequentie is te hoog om te worden uitgelezen door de HiSPARC elektronica. Bovendien worden deze signalen voornamelijk veroorzaakt door losse deeltjes. De frequentie van showers die de grond bereiken is slechts een kleine fractie hiervan. De functie van de trigger is om de fractie showers van de getriggerde gebeurtenissen zo groot mogelijk te maken.

Hieronder volgt eerst een overzicht van een aantal eigenschappen van airshowers: hoe ontstaan ze, wat is

hun samenstelling en hoe breiden ze zich uit. Daarbij gaat het vooral om de airshowers veroorzaakt door de meest energetische deeltjes. Deze zijn vanuit astrofysisch oogpunt het meest interessant en geven bovendien op Aarde de grootste meetbare effecten. Samenhangend met het soort deeltje dat de aardatmosfeer binnendringt zijn er twee soorten airshowers te onderscheiden: elektromagnetische showers en hadronische showers.

2.2 Kosmische straling: airshowers

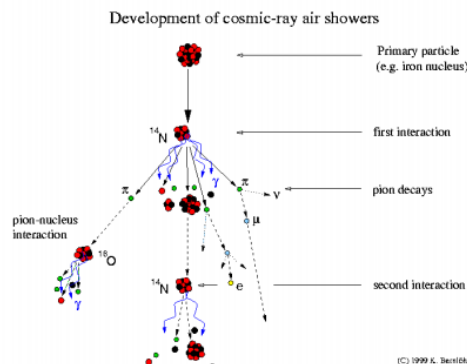
De aarde staat bloot aan een voortdurend bombardement van deeltjes uit het heelal: kosmische straling. Deze deeltjes zijn kleiner dan atomen, maar ze kunnen extreem veel energie bezitten. Dat energie is minimaal ca. 10^{13} eV. Tot nu toe weten we weinig

over de oorsprong van zulke kosmische deeltjes. Een ding zeker, ze kunnen echter niet van de zon komen. De natuurlijke processen in de zon zijn daar gewoon niet sterk genoeg voor.

Het enige wat we kunnen zeggen is dat de hoogst-energetische deeltjes uiterst zeldzaam zijn. Deze kunnen in de atmosfeer botsen met de atomen van stikstof en zuurstof. Dat laatste vindt plaats als de wisselwerking tussen deze atomen en het binnenkomende deeltje sterk genoeg is. Op de aarde nemen we nooit rechtstreeks de kosmische straling waar. Wel kunnen we de effecten van de wisselwerking tussen de oorspronkelijke deeltjes en de atmosfeer zien. Als een kosmisch deeltje de dampkring binnendringt, zal het botsen met stikstof of zuurstofatomen in de lucht. Dit veroorzaakt een kettingreactie: de brokstukken van deze botsing raken andere atomen, en zo gaat het verder. Het resultaat is een regen van deeltjes in de atmosfeer. Dit noemen we een airshower.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten showers: elektromagnetische showers en hadronische showers. Wanneer een kosmisch gamma-deeltje (γ) (een hoogenergetisch foton) de dampkring binnenkomen, kan het door elektromagnetische wisselwerking met de kern van een luchtatoom vervallen in een elektron e^- en een positron e^+ . Verderop in de dampkring kan het elektron vervolgens door elektromagnetische wisselwerking met de kern van een luchtatoom een γ -deeltje afstaan. Hetzelfde geldt voor het positron. Dit proces heet remstraling. Deze twee processen zullen weer verderop in de dampkring optreden. Er komen dus steeds meer deeltjes, maar die hebben elk wel een steeds kleinere energie. Na een aantal splitsingen is de energie van een deeltje zo klein dat het gemakkelijk zijn energie kwijtraakt aan het ioniseren van een luchtatoom. Omdat zowel paar-creatie ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$) als remstraling ($e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$) elektromagnetische processen zijn spreekt men van een elektromagnetische shower. Figuur 2.1 illustreert het ontstaan van zo'n shower.

Wanneer een kosmisch proton p de dampkring binnenkomen, kan het een sterke (hadronische) wisselwerking aangaan met de kern van een luchtatoom. Het gevolg is dat er een groot aantal pionen ontstaat. 1/3 daarvan is positief geladen (π^+), een 1/3 deel negatief geladen (π^-) en een 1/3 deel ongeladen (neu-



Figuur 2.1: Schematisch overzicht van het ontstaan van een airshower en de daarbij betrokken secundaire deeltjes.

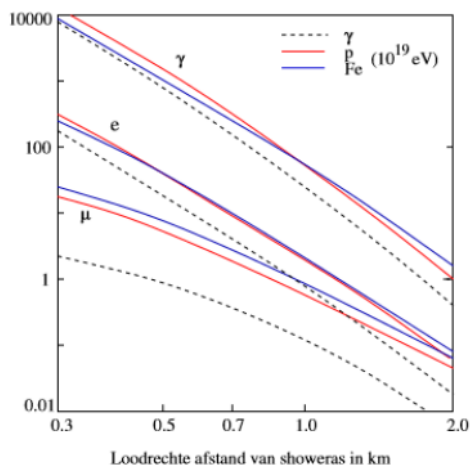
traal) (π^0). De neutrale pionen vervallen heel snel in twee γ -deeltjes. De geladen pionen hebben een langere levensduur. Het gevolg is dat ze een sterke wisselwerking kunnen aangaan met de kern van een luchtatoom. Daarbij ontstaan weer nieuwe pionen, zoals hierboven is beschreven. Na een aantal sterke wisselwerkingen vervalt het geladen pion dan in een muon μ (met dezelfde lading als het pion) en een muonneutrino ν_μ (ongeladen). De muonen die in de hadronische shower ontstaan, hebben een dusdanige hoge energie (en daarmee een dusdanig grote levensduur) dat ze veelal het aardoppervlak bereiken. Omdat ze geladen zijn kunnen ze net als de elektronen een signaal afgeven in de HiSPARC detector.

2.2.1 Energie van airshowers

De aantallen fotonen en elektronen in een airshower zijn veel groter dan het aantal muonen, en voor een elektromagnetische shower geldt dat in nog sterkere mate dan voor een hadronische shower.

Zoals boven beschreven is een shower eigenlijk niets meer als deeltjes die botsingen ondergaan met atomen uit de atmosfeer waardoor er nieuwe deeltjes ontstaan. Dit proces herhaalt zich een aantal keer, waardoor je een wijd verspreide *regen* van deeltjes krijgt. Elk deeltje dat ontstaat, heeft een bepaald deel van de energie die in het primaire deeltje zat,

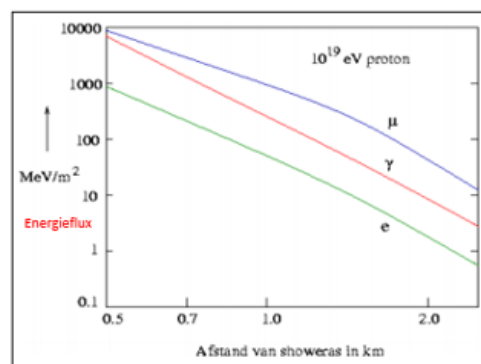
bij zich. Deze energie wordt dus steeds kleiner, naarmate er meer botsingen hebben plaatsgevonden. Als een deeltje nog te weinig energie over heeft, ontstaan er uit dat deeltje geen nieuwe deeltjes meer. Dat betekent dat de dichtheid van de deeltjes afneemt, als de deeltjes niet genoeg energie meer over hebben om nog een ander deeltje te creëren. deze afname begint meestal op 3,5 km hoogte. Deze waarde hangt natuurlijk wel af van de energie van het primaire deeltje, en de plaats waar het deeltje voor het eerst botst. Maar het hangt natuurlijk ook af van de situatie in de atmosfeer. Om een beter beeld te krijgen over de energie van een shower moet je ook letten op de hoeveelheid energie van fotonen, elektronen en muonen. Maar ook de hoeveelheid waarin de net genoemde deeltjes voorkomen in de shower. Dit zie je terug in figuur 2.2. Hier zie je dat het aantal fotonen dat



Figuur 2.2: Aantal fotonen (γ), elektronen (e) en muonen (μ) (verticaal) als functie van de afstand (horizontaal) tot de kern van een airshower van 10^{19} eV op een diepte van 860 g/cm^2 voor verschillende primaire deeltjes. (Fe, p en γ) Bron: [2].

door botsingen van een Fe-kern, proton en γ deeltje, groter is dan het aantal muonen of elektronen. Dit verschil wordt wel kleiner, als er een grotere afstand is afgelegd ten opzichte van de kern. Ook zien we dat er tien keer minder muonen voorkomen in een elektromagnetische shower als je die vergelijkt met een

Hadronische shower. Als we kijken naar de energie van de deeltjes is het precies omgedraaid. Dit zie je terug in figuur 2.3.



Figuur 2.3: Energieflux (verticaal) van fotonen (γ), elektronen (e) en muonen (μ) als functie van de afstand tot de shower-as (horizontaal) van een airshower veroorzaakt door een primair 10^{19} eV proton. Bron: [2].

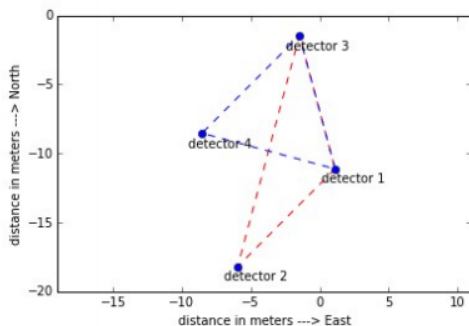
Uit deze figuur blijkt uit de verdeling van de energie over de drie verschillende deeltjes, dat muonen de meeste energie met zich meedragen in de shower. Wat verder opvalt, is dat bij de kern van de shower de fotonen een ongeveer net zo grote hoeveelheid energie met zich meedragen, maar fotonen verliezen sneller energie dan muonen, omdat muonen een zwakkere interactie hebben met de atmosfeer. Elektronen hebben het kleinste deel van de energie bij zich, van de drie soorten deeltjes.

Tenslotte kan de totale energie die door de deeltjes wordt afgegeven, berekend worden door de lengte van het spoor van elke van die deeltjes bij elkaar op te tellen en te vermenigvuldigen met het constante energieverlies per eenheid spoorlengte. Daarbij telt men dan een bedrag op aan niet waargenomen energie, die voornamelijk bestaat uit neutrinos en zeer energetische muonen. Deze verloren energie komt neer op ongeveer 7% voor de airshowers met een energie rond 10^{19} eV.

2.2.2 Detectie van kosmische straling

Voor de detectie van de geladen deeltjes die ontstaan zijn tijdens de botsingen van hoog energetische kosmische stralen met onze atmosfeer, wordt gebruik gemaakt van scintillators. Het materiaal waarvan deze detectoren gemaakt zijn, heeft als eigenschap een lichtflits te genereren als er een geladen deeltje door heen vliegt. De lichtintensiteit is afhankelijk van de hoeveelheid energie die door het inkomende geladen deeltje in het materiaal wordt afgestaan.

Op het Nikhef zijn tien HiSPARC detectiestations gelegen op verschillende afstanden. Ieder station bestaat uit vier scintillatorplaten. De wijze waarop deze ten opzichte elkaar staan wordt de geometrie genoemd. In figuur 2.4 is te zien dat de geometrie van detectiestation 508 beschreven kan worden als twee gelijkzijdige driehoeken met één gemeenschappelijke zijde.



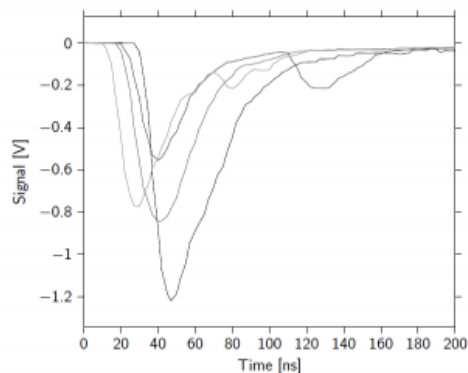
Figuur 2.4: Geometrie station 508 op het dak van een werkplaats van het Nikhef.

Een detector bestaat uit een skibox waarin een scintillatorplaat is geplaatst. Geladen leptonen (elektronen, muonen) veroorzaken lichtpulsen in de scintillator die met behulp van een fotomultiplier buis gedigitaliseerd worden. De detectiekans is vrijwel 100%. De hoeveelheid energie die door een verticaal invalend relativistisch deeltje wordt afgegeven aan de detector is vooral afhankelijk van de dikte van de scintillatorplaat en niet constant maar versmeerd rondom een gemiddelde waarde. Deze waarde noemen we 1 MIP [3].



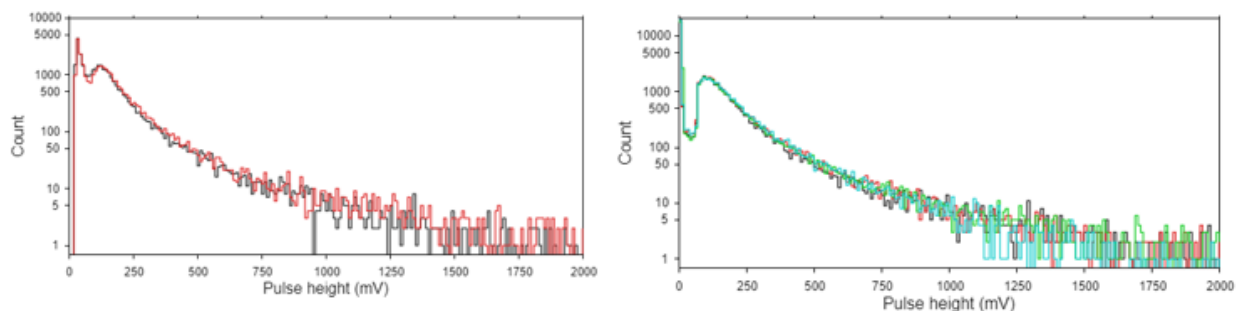
Figuur 2.5: Foto van station 508 op het Science Park te Amsterdam.

De fotomultipliers van de detectoren geven een uitslag zoals in figuur 2.6 is te zien. Daarin is de hoogte van de piek een maat voor het waargenomen aantal deeltjes in de plaat van de detector. De hoogte van deze piek wordt de pulshoogte genoemd, deze wordt bij de registratie van een event opgeslagen in de database van HiSPARC.



Figuur 2.6: Een event van een HiSPARC station. De hoogte van de puls geeft informatie over de pulshoogte en de oppervlakte onder de puls is de pulsintegraal. Figuur overgenomen uit [3] (pag. 44)

In de volgende figuur 2.7 bekijken we een voorbeeld van een spectrum zoals gemeten in een twee-plaats en een vier-plaats station voor gebeurtenissen met een trigger. De piek bij ongeveer 100 mV wordt veroorzaakt door gebeurtenissen waarbij 1 Minimum Ionizing Particle (MIP) door de scintillator vliegt. Naast kleine verschillen veroorzaakt door iets verschillende instellingen, is de steile flank bij ongeveer (70 mV,



Figuur 2.7: (Links) Het pulshoogte spectrum in een twee-plaats station. (Rechts) Pulshoogte spectrum voor een vier-plaats station. In beide gevallen voor gebeurtenissen met een trigger.

120 ADC) het belangrijkste verschil. Deze flank is het gevolg van de verschillende triggervoorwaarden in deze twee situaties. In een twee-plaats station wordt de trigger gevormd door de aanwezigheid binnen 1 μs van een puls in beide detectoren boven een hoge drempel (een signaal groter dan 70 mV, 120 ADC). In een vier-plaats station zijn er twee mogelijkheden: óf deze conditie treedt op, óf er zijn drie platen waarbij in elk van die drie de puls een lagere drempel (een signaal groter dan 30 mV, 50 ADC) overschrijdt.

2.2.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

De doelstelling van het onderzoek kan als volgt worden omschreven aan de hand van de volgende vragen:

- Het bepalen van de efficiëntie van verschillende HiSPARC detectiestations gelegen op verschillende afstanden.
- Is er een verband tussen de efficiëntie van een detectiestation en de grootte van de shower?

Om deze vragen te beantwoorden is gebruik gemaakt van de gegevens verzameld door de detectiestations 508, 501 en 510. Ook het meet- en verzamelscript in Python was onmisbaar. Voor deze HiSPARC stations heb ik gecontroleerd of in een bepaalde periode alle detectoren van deze stations onafgebroken data hebben geproduceerd. Dit was het geval voor de periode van 1 januari 2014 tot en met 1 maart 2014. Dit is

de dataperiode, die ik voor alle deelonderzoeken heb aangehouden.

Efficiëntie

De efficiëntie van een detectiestation kan op diverse manieren worden bepaald. Het kan bijvoorbeeld worden omschreven als de waarschijnlijkheid dat als er een kosmische shower op een detectiestation valt, deze ook gedetecteerd wordt. Om vast te stellen dat er een kosmische shower op een detectiestation valt, gebruiken we de er naast gelegen stations. Als er voldoende stations in de buurt een kosmische shower waarnemen, wordt aangenomen dat die ook op het centrale detectiestation valt. De trigger-efficiëntie van een station ϵ is dus te definiëren als $\epsilon = N_{\text{station}}/N_{\text{totaal}}$. In deze definitie wordt het aantal coïncidenties waarmee het betreffende station is betrokken N_{station} vergeleken met het aantal coïncidenties bij omliggende stations N_{totaal} .

2.3 Meetmethode 1

Om tot een uitspraak te komen over de efficiëntie van meetstations 508, 501 en 510 heb ik gebruik gemaakt van verschillende combinaties van stations binnen het cluster van Nikhef. In figuur 2.8 is de positie van deze stations op het Science Park aangegeven. Zo is voor station 508 naar de volgende driehoeken gekeken (zie



Figuur 2.8: De positie van de stations op het SciencePark.

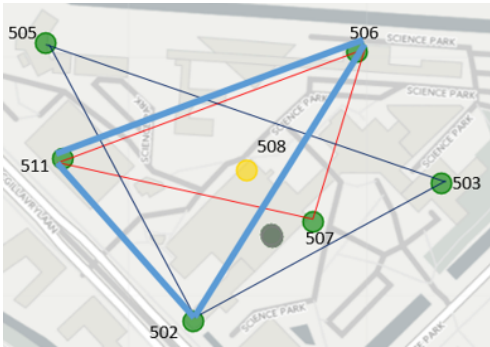


Figuur 2.10: De gebruikte driehoeken bij het meten voor station 501 en 510.

figuur 2.9):

$$\left. \begin{array}{l} \triangle(506-507-511) \\ \triangle(502-503-505) \\ \triangle(502-506-511) \end{array} \right\} \text{ met } 508 \text{ in het midden.}$$

Voor stations 501 en 510, die op elkaar liggen, is



Figuur 2.9: De gebruikte driehoeken bij het meten voor station 508.

gekeken naar de volgende driehoeken (zie figuur 2.10)

$$\left. \begin{array}{l} \triangle(502-507-508) \\ \triangle(502-503-508) \\ \triangle(502-503-506) \\ \triangle(502-504-506) \end{array} \right\} \text{ met } 501 \text{ en } 510 \text{ in het midden.}$$

Verder is met behulp van SAPHIRE voor alle combinaties nagegaan op welke onderlinge afstand stations

liggen en welke oppervlakte door de driehoek ingesloten wordt. Deze waren vrij klein, in vergelijking tot andere clusters van meetstations. Dit heeft als voordeel dat er ook deeltjeslawines met een geringe doorsnede worden gedetecteerd in meerdere stations. Hierdoor neemt het aantal waargenomen lawines aanzienlijk toe.

Belangrijk om op te merken dat bij alle metingen geen rekening is gehouden met mogelijke hoogteverschillen van stations ten opzichte van elkaar. Hierna heb ik naast de data van 501, 510 en 508, gebruik gemaakt van de data van de volgende stations: 502, 503, 504, 505, 506 en 507, tezamen dus zeven stations (zie figuur 2.7). Bij het downloaden van de data is aangegeven dat alle vier platen van ieder station in de driehoek deel moeten hebben aan de coïncidentie.

2.4 Resultaten 1

Voor de bepaling van de triggerefficiëntie, ϵ , van een station heb ik gebruik gemaakt van het SAPHIRE-analyse pakket, dat David Fokkema ontwikkeld heeft. In dit analyse pakket, gebaseerd op de programmeertaal Python, zijn per gekozen driehoek coïncidenties gedownload waarbij het betreffende station is betrokken. De resultaten van deze bepaling voor station 508 staan gegeven in tabel 2.1.

De gekozen driehoeken	N_{501}	$N_{(driehoek)}$	R-Onz	R-Onz $_{(driehoek)}$	R-Onz van ϵ	absolute meet-onzekerheid	triggerefficiëntie van een station c
			$1/(VN)$	$1/(VN_{(driehoek)})$	$\sqrt{(\Delta NN)^2 + (\Delta N_c N_c)^2}$		
$\epsilon_{508} = N_{508} / N(508-507-511)$	2103	2178	0,0218	0,0214	3,06%	0,029	$\epsilon_{508} = 0,96 \pm 0,029$
$\epsilon_{508} = N_{508} / N(502-503-509)$	2639	2923	0,0195	0,0185	2,69%	0,024	$\epsilon_{508} = 0,90 \pm 0,024$
$\epsilon_{508} = N_{508} / N(502-506-511)$	4539	5085	0,0148	0,0140	2,04%	0,018	$\epsilon_{508} = 0,89 \pm 0,018$

Tabel 2.1: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 508.

Uit tabel 2.1 is te zien dat de waarde van ϵ_{508} kleiner wordt naarmate de driehoek waarin het station 508 zich bevindt groter wordt. De relatieve onzekerheid in de uitkomst van de berekende triggerefficiëntie is volgens de rekenregel bepaald:

$$\epsilon = \frac{a}{b} \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = \sqrt{(\Delta a/a)^2 + (\Delta b/b)^2}. \quad (2.2)$$

Voor de efficiëntie van stations 501 en 510 is het zelfde uitgevoerd. In tabel 2.2 zijn de resultaten terug te vinden bij de verschillende driehoeken.

De gekozen driehoek	N_{501}	$N_{(driehoek)}$	R-O voor 501	R-O voor $_{(driehoek)}$	R-Onz van ϵ	absolute meet-onzekerheid	triggerefficiëntie van een station c
			$1/(VN)$	$1/(VN_{(driehoek)})$	$\sqrt{(\Delta NN)^2 + (\Delta N_c N_c)^2}$		
$\epsilon_{501} = N_{501} / N(502-507-508)$	3228	3359	0,0176	0,0173	2,46%	0,024	$\epsilon_{501} = 0,90 \pm 0,024$
$\epsilon_{501} = N_{501} / N(502-503-509)$	10003	10915	0,0100	0,0096	1,38%	0,013	$\epsilon_{501} = 0,92 \pm 0,013$
$\epsilon_{501} = N_{501} / N(502-503-506)$	5924	6853	0,0130	0,0121	1,77%	0,015	$\epsilon_{501} = 0,86 \pm 0,015$
$\epsilon_{501} = N_{501} / N(502-504-506)$	2013	2441	0,0223	0,0202	3,01%	0,025	$\epsilon_{501} = 0,82 \pm 0,025$
De gekozen driehoek	N_{510}	$N_{(driehoek)}$	R-O voor 510	R-O voor $_{(driehoek)}$	R-Onz van ϵ	absolute meet-onzekerheid	triggerefficiëntie van een station c
			$1/(VN)$	$1/(VN_{(driehoek)})$	$\sqrt{(\Delta NN)^2 + (\Delta N_c N_c)^2}$		
$\epsilon_{510} = N_{510} / N(502-507-508)$	5225	5461	0,0138	0,0135	1,94%	0,019	$\epsilon_{510} = 0,96 \pm 0,019$
$\epsilon_{510} = N_{510} / N(502-503-509)$	9831	1094	0,0101	0,0302	3,19%	0,029	$\epsilon_{510} = 0,90 \pm 0,029$
$\epsilon_{510} = N_{510} / N(502-503-506)$	5793	6853	0,0131	0,0121	1,78%	0,015	$\epsilon_{510} = 0,85 \pm 0,015$
$\epsilon_{510} = N_{510} / N(502-504-506)$	1973	2441	0,0225	0,0202	3,03%	0,025	$\epsilon_{510} = 0,81 \pm 0,025$

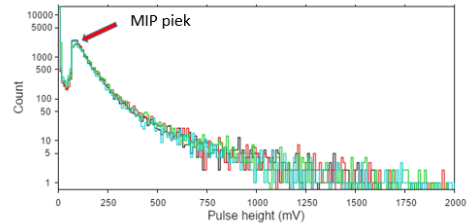
Tabel 2.2: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor stations 501 en 510.

Voor de relatieve onzekerheid in de uitkomst van de berekende triggerefficiëntie van ϵ_{501} en ϵ_{510} zie ook deze tabel. Hier is ook duidelijk te zien dat de efficiëntie steeds kleiner wordt naarmate de gebruikte driehoek groter wordt. Omdat alle metingen behoren bij dezelfde coincidentie, dus bij één Extended Air Shower(EAS), is te verwachten dat de triggerefficiëntie van het gezochte station hetzelfde blijft bij verschillende driehoeken. Dat is blijkbaar niet het geval. Een verklaring van de bovenstaande resultaten is dat de deeltjesdichtheid van het gezochte station afneemt naarmate de oppervlakte van de driehoek

groter wordt (zie bijvoorbeeld figuur 2.9). Dat wijst erop dat de showercore zich aan de rand van de driehoek bevond. Een andere mogelijke verklaring is dat de absorptie van de shower in de atmosfeer groter is. Merk op dat ϵ_{501} en ϵ_{510} (zie tabel 2.2) vrijwel gelijk zijn. Dit moet ook zo zijn omdat ze op dezelfde plaats liggen.

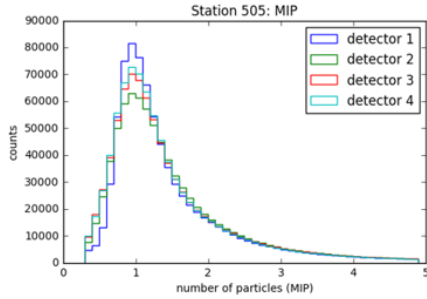
2.5 Meetmethode 2

Deze methode is gebruikt om het effect van de eerste metingen (resultaten) op een ander manier te controleren. Ik heb gekeken naar de MIP (Minimum Ionizing Particle) waarde op elk station bij de gebruikte driehoeken. Als van een bepaalde periode alle geregistreerde events van een station geplot worden in een histogram, kan met behulp van dat histogram de MIP piek per detector bepaald worden. In figuur 2.11 is de MIP-piek aangegeven in het pulshoogte diagram van station 508.



Figuur 2.11: Pulshoogte histogram. In dit figuur zijn de pulshoogten van de geregistreerde events van de vier detectoren weergegeven. De pijl geeft de locatie van de MIP-pieken aan.

Een uitgebreide analyse van Pennink [4] heeft laten zien dat gebeurtenissen in de MIP-piek een grote waarschijnlijkheid hebben dat er in die gebeurtenissen slechts één deeltje werd gedetecteerd. Via het SAPHIRE-analyse pakket heb ik de MIP-waarde per detector per station berekend. In figuur 2.12 is de plot, gemaakt van een aantal MIP's per detector van station 508, te zien: Verder heb ik de Poisson formule [5] toegepast om de kans dat er getriggerd wordt voor



Figuur 2.12: Een plot van een aantal MIP's per detector van station 508.

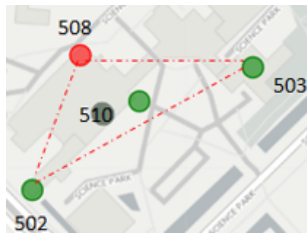
een station te bepalen.

$$P(N=k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (2.3)$$

Als $k = 0$ dan is de kans dat er geen toevallige trigger optreedt gelijk aan $P(k=0) = e^{-\lambda}$. Met de kans dat er geen trigger optreedt, is de kans op een trigger ook te berekenen (immers de kans op een trigger plus de kans op geen trigger is 100%). Dus geldt: $P_{\text{trigger}} = 1 - e^{-\lambda}$ waarin λ het gemiddelde aantal MIP's per station is.

2.6 Resultaten 2

Hieronder tref je de gevonden resultaten voor station 501 en 510 bij de eerder genoemde driehoeken op basis van de gerekende MIP waarden.



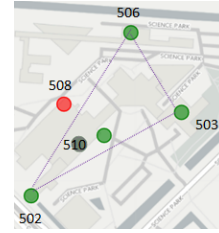
Figuur 2.13: Driehoek [502-503-508]

STATION 502	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/502	1-EXP(-λ)
	4,90	5,45	5,13	5,12	5,15	99,42%
STATION 503	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/503	1-EXP(-λ)
	4,24	5,23	4,36	4,19	4,51	98,89%
STATION 508	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/508	1-EXP(-λ)
	6,67	7,99	7,20	7,42	7,32	99,93%
STATION 501	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/501	1-EXP(-λ)
	7,93	7,77	6,94	6,71	7,34	99,93%

Tabel 2.3: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501.

STATION 502	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/502	1-EXP(-λ)
	5,78	6,45	6,14	6,16	6,13	99,78%
STATION 503	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/503	1-EXP(-λ)
	4,84	6,040	4,910	4,800	5,15	99,42%
STATION 508	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/508	1-EXP(-λ)
	7,88	9,55	8,70	8,97	8,78	99,98%
STATION 510	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/510	1-EXP(-λ)
	10,05	9,47	10,19	9,35	9,77	99,99%

Tabel 2.4: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 510.



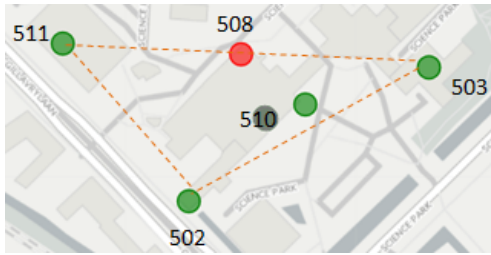
Figuur 2.14: Driehoek [502-503-506]

STATION 502	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/502	1-EXP(-λ)
	5,21	5,81	5,57	5,61	5,55	99,61%
STATION 503	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/503	1-EXP(-λ)
	6,03	7,63	6,08	5,97	6,43	99,84%
STATION 506	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/506	1-EXP(-λ)
	6,38	6,05	5,91	5,85	6,05	99,76%
STATION 510	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/510	1-EXP(-λ)
	10,19	9,78	10,49	9,41	9,97	100,00%

Tabel 2.5: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501.

STATION 502	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/502	1-EXP(-λ)
	4,59	5,10	4,99	4,91	4,90	99,25%
STATION 503	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/503	1-EXP(-λ)
	5,97	7,54	6,05	5,89	6,36	99,83%
STATION 506	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/506	1-EXP(-λ)
	5,95	5,65	5,44	5,46	5,63	99,64%
STATION 501	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/501	1-EXP(-λ)
	7,86	8,02	7,10	6,63	7,40	99,94%

Tabel 2.6: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 510.



Figuur 2.15: Driehoek [502-503-511]

STATION 502	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/502	1-EXP(-λ)
	7,26	7,95	7,71	7,87	7,70	99,95%
STATION 503	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/503	1-EXP(-λ)
	4,64	5,85	4,71	4,65	4,96	99,30%
STATION 511	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/511	1-EXP(-λ)
	5,06	5,32	5,29	4,97	5,16	99,43%
STATION 501	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/501	1-EXP(-λ)
	9,17	8,86	7,34	7,31	8,17	99,97%

Tabel 2.7: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501.

STATION 502	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/502	1-EXP(-λ)
	7,32	8,06	7,82	7,93	7,78	99,96%
STATION 503	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/503	1-EXP(-λ)
	5,00	6,34	5,06	4,98	5,35	99,52%
STATION 511	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/511	1-EXP(-λ)
	5,30	5,53	5,51	5,17	5,38	99,54%
STATION 510	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/510	1-EXP(-λ)
	11,36	10,45	10,67	10,04	10,63	100,00%

Tabel 2.8: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 510.

Doordat de stations 501 en 510 vlak bij elkaar liggen was mijn verwachting dat de gemiddelde MIP's per station per driehoek dezelfde waarde moeten hebben. Uit de bovenstaande tabellen is duidelijk te zien dat er een klein verschil is tussen de twee stations 501 en 510. Een verklaring voor dit verschil kan zijn dat de twee stations niet dezelfde PMT's hebben. Om het vermoeden dat het aan de PMT's van de stations ligt te testen, heb ik een extra controle meting gedaan. Ik heb verder gekeken naar de gemiddelde MIP's van de stations apart en daarna bij coincidenties tussen elkaar in dezelfde periode en voorwaarde zoals bij de eerdere meting. Controle meting voor 501 en 510 apart: avoor resultaten zie tabel 2.9.

STATION 510	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/510	1-EXP(-λ)
	1,87	1,81	1,81	1,82	1,83	83,92%
STATION 501	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/501	1-EXP(-λ)
	1,59	1,57	1,44	1,44	1,51	77,91%

Tabel 2.9: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501 en 510 apart.

Controle meting voor 501 en 510 in coincidentie:

STATION 510	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/510	1-EXP(-λ)
	3,07	2,98	3,04	2,91	3,00	95,02%
STATION 501	Gem MIP bij n1	Gem MIP bij n2	Gem MIP bij n3	Gem MIP bij n4	Gem/501	1-EXP(-λ)
	2,70	2,63	2,39	2,37	2,52	91,97%

Tabel 2.10: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501 en 510 in coincidentie.

De onzekerheid in een meting van een variabele die zich volgens de Poisson verdeling gedraagt ten opzicht van de verwachtingswaarde wordt dan gegeven door

$$\sigma = \sqrt{\lambda}. \quad (2.4)$$

STATION 502	Gem/502	$\sigma = \sqrt{\lambda}$	STATION 502	Gem/502	$\sigma = \sqrt{\lambda}$
	5,15	2,27		6,13	2,48
STATION 503	Gem/503		STATION 503	Gem/503	
	4,51	2,12		5,15	2,27
STATION 508	Gem/508		STATION 508	Gem/508	
	7,32	2,71		8,78	2,96
STATION 501	Gem/501		STATION 510	Gem/510	
	7,34	2,71		9,77	3,13

Tabel 2.11: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501 (links) en 510 (rechts) in driehoek [502-503-508].

STATION 502	Gem/502	$\sigma = \sqrt{\lambda}$	STATION 502	Gem/502	$\sigma = \sqrt{\lambda}$
	4,90	2,21		5,55	2,36
STATION 503	Gem/503		STATION 503	Gem/503	
	6,36	2,52		6,43	2,54
STATION 506	Gem/506		STATION 506	Gem/506	
	5,63	2,37		6,05	2,46
STATION 501	Gem/501		STATION 510	Gem/510	
	7,40	2,72		9,97	3,16

Tabel 2.12: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501 (links) en 510 (rechts) in driehoek [502-503-506].

STATION 502	Gem/502	$\sigma = \sqrt{\lambda}$	STATION 502	Gem/502	$\sigma = \sqrt{\lambda}$
	7,70	2,77		7,78	2,79
STATION 503	Gem/503		STATION 503	Gem/503	
	4,96	2,23		5,35	2,31
STATION 511	Gem/511		STATION 511	Gem/511	
	5,16	2,27		5,38	2,32
STATION 501	Gem/501		STATION 510	Gem/510	
	8,17	2,86		10,63	3,26

Tabel 2.13: Berekende triggerefficiëntie ϵ voor station 501 (links) en 510 (rechts) in driehoek [502-503-511].

2.7 Conclusies

De efficiëntie van een station $\epsilon = N_m/N_\mu$ is binnen verschillende driehoeken op verschillende plaatsen gemeten, met als resultaat een aantal waarden tussen de 0,90 en 0,98. Zonder rekening te houden met de meetonzekerheid lijkt sprake van een (geringe) plaatsafhankelijkheid van de detectorefficiëntie, zonder dat daarin echter een duidelijk patroon is te herkennen. De berekende relatieve meetonzekerheid van de onderzochte stations 501, 508 en 510 blijkt in dezelfde grootte als de variatie in de efficiëntie bij verschillende driehoeken. Dat betekent: een zeer groot aantal gemeten efficiënties zal binnen dit interval liggen. Uit de efficiëntiemetingen blijkt dat deze op een enkele uitzondering na keurig binnen dit interval liggen.

2.8 Dankwoord

Ik wil hier graag een aantal mensen bedanken voor hun hulp en bijdrage. Ik dank prof. dr. ing. B. van Eijk en prof. J. van Holten, die mij de kans gaven om in dit LIO-project aan de slag te gaan. Ik dank dr. J. Steijger, voor alle tijd, discussies, het actief meedenken en de kritische blik op mijn werk. Ik heb heel veel aan je ondersteuning gehad en zou anders niet zo ver gekomen zijn! Tot slot dank ik mijn collega's op de werkkamer van het afgelopen jaar: Tom, Niek, Nathalie en Casper. Dank voor jullie support, discussies, input op mijn werk en jullie collegialiteit: het is fijn werken op de maandagen!

3 Extensive airshowers en bliksem 2: een verband?

Reno Beekman



Reno Beekman is sinds 2007 als docent natuurkunde en NLT verbonden aan het Gemeentelijk Gymnasium Hilversum. Hij heeft in 1975 aan de Rijksuniversiteit Leiden zijn doctoraal experimentele natuurkunde behaald. Na zijn studie natuurkunde heeft hij aan de RUL zijn doctoraal geneeskunde (1986) afgelegd, waarna hij in 1989 is gepromoveerd op de vrije-calcium concentratie in hartspiercellen. Hij heeft in Groningen (1993) de opleiding tot klinisch fysisch radiotherapie afgerond en is in aansluiting daarop als universitair docent Medische Informatiekunde verbonden geweest aan de UvA op het AMC. Hij is vanaf 1996 tot 2013 als klinisch fysisch werkzaam geweest bij het Arnhems Radiotherapeutisch Instituut.

3.1 Inleiding

In het gangbare fysische model voor het ontstaan van bliksem zijn zowel het aantal vrije ladingsdragers als de elektrische veldsterkte in de atmosfeer ontoereikend om een ontlading te kunnen starten [6]. Extensive Air Showers geïnitieerd door cosmic rays (EAS) worden gezien als mogelijke leverancier voor het tekort aan vrije ladingsdragers in de atmosfeer. Om in het tekort aan vrije ladingsdragers te kunnen voorzien moet de EAS als leverancier van vrije ladingsdragers direct aan de bliksem voorafgaan. Het is overigens omgekeerd ook denkbaar dat bliksem een EAS beïnvloedt. Daarvoor moet de EAS juist direct op de bliksem volgen.

De onderzoeksvraagstelling van het voorafgaande onderzoek [7] luidde: Is er een relatie tussen het voorkomen van een shower en een bliksemontlading in het

gebied van de shower? Het antwoord op deze vraag werd gezocht door te onderzoeken of er een plaatsrelatie en een tijdsrelatie is tussen shower en bliksem.

In het voorafgaande onderzoek (op. cit.) zijn in de periode 2004-2015 599 coïncidenties gevonden tussen grond-wolk bliksems en EASsen. Daarbij is de maximale afstand tussen het EAS registrerend HiSPARC-station en de door het KNMI berekende bliksemlocatie 10 km, en is het tijdsverschil tussen EAS en de bliksem maximaal 0,2 ms. Vervolgens zijn op basis van dataquality criteria gegevens tot 10 juli 2010 buiten beschouwing gelaten. Bij nadere analyse van de resterende 234 coïncidenties is vervolgens gekeken naar de correlatie tussen pulshoogte en pulsintegraal in een ruimer tijdsinterval dan 0,2 ms rond de bliksem. Deze correlatie blijkt robuust tot 50 ms vóór de bliksem en vanaf 50 ms ná de bliksem. Maar binnen de 0,2 ms rond de bliksem is deze correlatie afwezig.

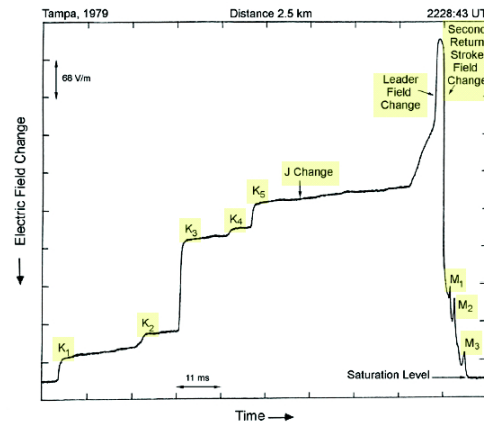
Dit deed de verdenking opkomen, dat tijdens een bliksem in de nabijheid van HiSPARC-detectoren een EAS niet betrouwbaar kan worden geregistreerd. Het vermoeden is dat de electronica van het betreffende station dan is verstoord. De HiSPARC elektronica slaat de gemeten signalen uit de PMT op. Hieruit blijkt dat de meeste metingen vlakbij de bliksem geen pulspatroon geven, zie figuur 3.6. Het voorzichtige antwoord op de onderzoeksvraagstelling van het voorafgaande (op. cit) onderzoek luidde daarom: met HiSPARC kunnen we binnen 0,2 ms geen plaats- of tijdrelatie vaststellen tussen grond-wolk bliksems en EAssen in de periode 2010-2015. En we kunnen die relaties netzomin uitsluiten.

Bliksem

Bliksem ontwikkelt zich in fases: door het opbouwen van elektrische lading in een wolk, vervolgens groeit een geleidende bliksemboom (streamers) en dan vindt er langs deze zogenaamde stepped leader kortsluiting plaats met sterke stromen en fel licht in het hete plasma, de bliksem die wij zien: de returnstroke. Donder is het gevolg van variaties in druk door de thermische uitzetting van datzelfde kanaal. De onderzijde van een onweerswolk is meestal positief geladen ten opzichte van het aardoppervlak en wat hoger in de wolk is deze negatief geladen.

Met name de tweede fase van de kortsluiting is nog niet goed begrepen. De doorslagspanning van lucht is ongeveer 30 kV/cm bij de hoogtes waarop bliksem ontstaat. Bij die spanning ontstaan er door ionisaties meer elektronen dan er worden ingevangen door luchtmoleculen.

- De met ballonnen gemeten wolkenpotentialen van 100 MV op 10 km zijn daarvoor veel te laag. Dat is 100 V/cm vergeleken met de minimaal vereiste 30 kV/cm. Voor het verklaren van het bestaan van bliksem wordt gedacht aan ijskristallen die afhankelijk van hun vorm, veldversterking kunnen leveren [6]. Bestudering van dit voor bliksem benodigde elektrische veld, ligt buiten het bestek van de onderzoeksvraag.
- Maar ook het aantal vrije ladingdragers is te laag voor het starten van een ontlading. Vrije,



Figuur 3.1: Het elektrische veld bij een ontlading in Florida in 1979 om 22:28:43 UTC op 2,5 km afstand [8].

negatieve ionen fungeren als condensatiekernen voor waterdamp en vormen waterclusters die niet makkelijk elektronen afgeven. Ook de achtergrondstraling van de zon die op wolkenhoogte vrije elektronen kan genereren, genereert onvoldoende vrije elektronen.

Voor het verklaren van het bestaan van bliksem is gedacht aan EAssen. Het aantal vrije ladingdragers dat wordt gegenereerd in een EAS van deeltjes die het gevolg is van een inkomend kosmisch deeltje is voldoende groot om het starten van een ontlading mogelijk te maken, althans in een voldoende sterk elektrisch veld.

Onderzoeksvraagstellingen

Uit nadere bestudering van de oorspronkelijke signalen blijkt dat ten tijde van de bliksem de elektronica zo gestoord is dat er geen pulsen meer gezien worden, zie sectie 3.4 figuur 3.6. Vanuit de hypothese dat EAssen de leveranciers zijn van de benodigde vrije ladingdragers bij het starten van de ontlading die het begin vormt van de bliksem, zijn aanvullende vraagstellingen voor dit nieuwe onderzoek geformuleerd:

Functioneren de HiSPARC-detectoren van 100 ms tot 5 ms vóór en van 5 ms tot 100 ms ná een geregistreerde bliksem goed genoeg om te onderzoeken of er ge-

durende die 100 ms coïncidenties zijn met de 100 ms durende stepped leader van een grond-wolk bliksem?

Wat is de aard van de ten tijde van de grond-wolk bliksems geregistreeerde EASsen, vergeleken met de EASsen ruim voor en na de bliksem?

Wat is het verband tussen de afstand van het HiSPARC-station dat de coïnciderende EAS registreert en het aantal geregistreeerde EASsen binnen 0,2 ms van de bliksems?

Eerdere LiO-studies met betrekking tot Kosmische straling en bliksem

2010/2011 Remon Kniest (Kennemer College Beverwijk):

Reageren de detectoren op bliksemontladingen? Naar aanleiding van de opvallende toename van het aantal events per uur (count rate) bij een onweersbui bij Eindhoven op 14 juli 2010.

2011/2012 Paul Neuraj (St-Joris College Eindhoven):

Plaatsbepaling en tijdsbepaling met Boltek-LD250 detectoren ter vervanging van de ontoereikend geachte gegevens van het KNMI.

2012/2013 Matthijs van Vulpen (Joke Smit School Amsterdam)

Nadere bestudering KNMI-gegevens naast Boltek-LD250 detectoren bij de HiSPARC-installaties.

2015/2016 Reno Beekman (Gemeentelijk Gymnasium Hilversum)

Extensive airshowers en bliksem: een verband?

3.2 Gebruikte meetgegevens: HiSPARC en KNMI

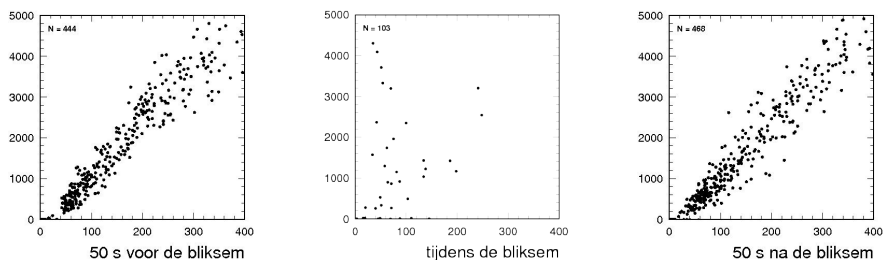
Voor het onderzoeken van de vraag of er een plaats- en tijdsrelatie is tussen een EAS en een bliksem, hebben we gebruik gemaakt van HiSPARC-gegevens over EASsen en van KNMI-gegevens over bliksems, beide vanaf 2004. Vanwege de dataquality eisen voor de HiSPARC-metingen hebben we ons beperkt tot de periode 2010-2015 en tot grond-wolk bliksems [7].

3.3 Combineren van meetgegevens tot coïncidenties

Voor het vinden van coïncidenties tussen bliksems en extensive airshowers is gebruik gemaakt van gegevens uit het bliksembestand van het KNMI [9] en de EAS-registraties van HiSPARC tussen 2004 en 2015. In plaats van werken op het totale bestand van HiSPARC-registraties zijn de EASsen tussen 60 s voor en 60 s na de grond-wolkbliksems uit dat HiSPARC-bestand geselecteerd. De andere types door het KNMI geregistreeerde bliksems zijn voorlopig buiten beschouwing gelaten. Overigens zijn niet alle EASsen uit heel Nederland geselecteerd, maar uitsluitend die EASsen die zijn gemeten door op dat moment operationele HiSPARC stations op maximaal 10 km afstand van de positie van de bliksem, zoals aangegeven door het KNMI. Vanwege de positie onnauwkeurigheid van maximaal 5 km in de positie van de bliksem, is voor 10 km gekozen.

Eerste selectie van EASsen

Van de volledige KNMI bliksem gegevens zijn de grond-wolk bliksems geselecteerd. Vervolgens zijn die 10354 bliksems geselecteerd, die op minder dan 10 km afstand van eenwerkend HiSPARC-station insloegen. Met een ruime tijds marge, van 60 s vóór tot 60 s na de bliksem. Zie [7]



Figuur 3.2: De correlatie van de pulshoogte en de pulsintegraal blijkt aanwezig 50 s voor de bliksem (links) en 50 s na de bliksem (rechts), maar afwezig tijdens de bliksem (midden).

UTC en GPS-tijd

KNMI bliksemtijd en HiSPARC EAS-tijd blijken niet hetzelfde te zijn. KNMI gebruikt UTC en HiSPARC aanvankelijk ook, maar er is geleidelijk overgestapt naar GPS-tijd. Deze twee tijdsystemen verschillen in de secondes die ter correctie periodiek aan UTC worden toegekend. Bij GPS-tijd loopt de tijd zonder onderbreking door. Zo is van 01-01-2009 tot 01-06-2011 is de correctie 15 secondes. Hiertoe zijn de bliksemtijden aangepast naar GPS-tijd. Zie op. cit.

Coïncidenties in tijd en plaats

Voor de plaatsrelatie is de maximale afstand 10 km genomen. Voor de tijdsrelatie is 0,1 ms genomen voorafgaand en volgend op de grond-wolk bliksems. Van 2010 tot 2015 blijken er 234 coïncidenties tussen bliksem en EASSEN te zijn.

3.4 Resultaten: gevonden coïncidenties nader bekeken

Nader geanalyseerd zijn de tussen 10-07-2010 en 31-12-2015 gevonden 234 coïncidenties van EASSEN op minder dan 10 km afstand en binnen 0,2 ms voorafgaand of volgend op een door het KNMI geregistreerde grond-wolkbliksem.

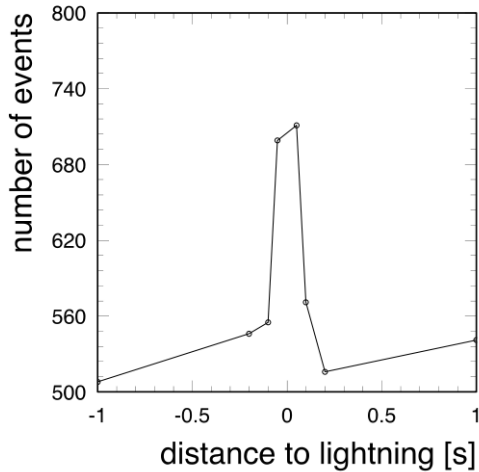
Correlatie pulshoogte en pulsintegraal

Weliswaar bevatten de EASSEN van deze 234 coïncidenties pulshoogtes en pulsintegralen, maar de correlatie tussen de pulshoogte en de pulsintegraal blijkt tijdens de bliksem afwezig te zijn. (zie figuur 3.2.)

Teneinde een beter idee te krijgen van de detectiemogelijkheden van EASSEN tijdens een bliksem is de correlatie tussen pulshoogte en pulsintegraal op verschillende tijden voor en na de bliksem geïnventariseerd. Pulshoogte en pulsintegraal blijken ook van 5 s tot 0,05 s voor de bliksem goed gecorreleerd. Hetzelfde geldt voor de periode van 5 s tot 0,05 s na bliksem.

Frequentie van coïncidenties

In het eerste onderzoek [7] is de frequentie van de geregistreerde EASSEN voorafgaand en volgend op de bliksem geïnventariseerd, zie figuur 3.3. Tot 0,1 s voor de bliksem blijft de frequentie van EASSEN stabiel en loopt licht op tot 0,05 s voor de bliksem. Traces op $t = (0 \pm 0, 2)$ ms blijken ruim 100 keer zo frequent en zijn weggelaten in figuur 3.3. Vanaf 0,05 s na de bliksem neemt de frequentie tot 0,1 s af, en vanaf 0,1 s na de bliksem blijft de frequentie van EASSEN stabiel. Niet alleen direct voor de return stroke, maar ook tijdens de daaraan voorafgaande stapsgewijze opbouw (stepped leader, zie figuur 3.1) van het elektrische veld van een grond-wolk bliksem, zouden EASSEN een rol kunnen spelen. Voorafgaande aan de return stroke is er al gedurende 100 ms duidelijke activiteit. Daar-



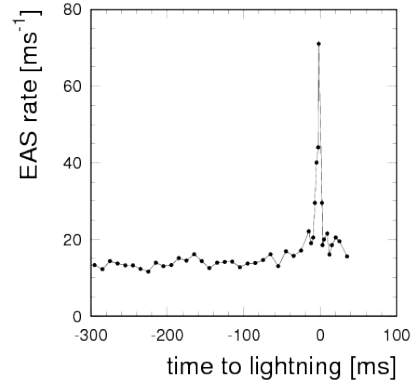
Figuur 3.3: De frequentie van EASsen als functie van het tijdsverschil met de bliksem. De frequentie van coïnciderende EASsen, met tijdsverschil 0, is ruim $100\times$ zo frequent en daarom in de grafiek weggelaten.

om is er in dit onderzoek meer gedetailleerd gekeken naar het aantal coïncidenties vanaf 300 ms vóór de bliksem tot 35 ms na de bliksem, zie figuur 3.4. De frequentie van de coïncidenties blijft constant van 300 ms tot 10 ms vóór de returnstroke. De frequentie gaat vanaf 7 ms vóór de bliksem duidelijk oplopen tot ruwweg 100 keer ten tijde van de returnstroke. De frequentie is van 3 ms na de returnstroke weer op de oude waarde (zie figuur 3.5).

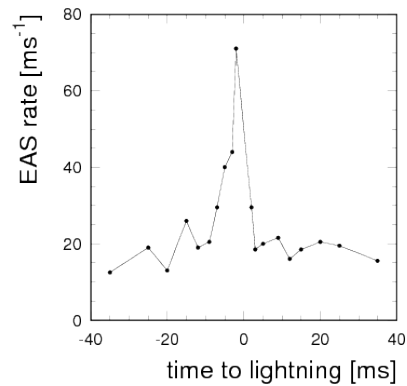
Aard van met bliksem coïnciderende EASsen

Traces op $t = (0 \pm 0, 2)$ ms, ten tijde van een grondwolk bliksem, blijken in te delen in:

- (a) baseline met periodiciteit én mogelijk gesuperponeerde events
- (b) fluctuerende baseline zonder events
- (c) incidentele events
- (d) onbegrepen signalen

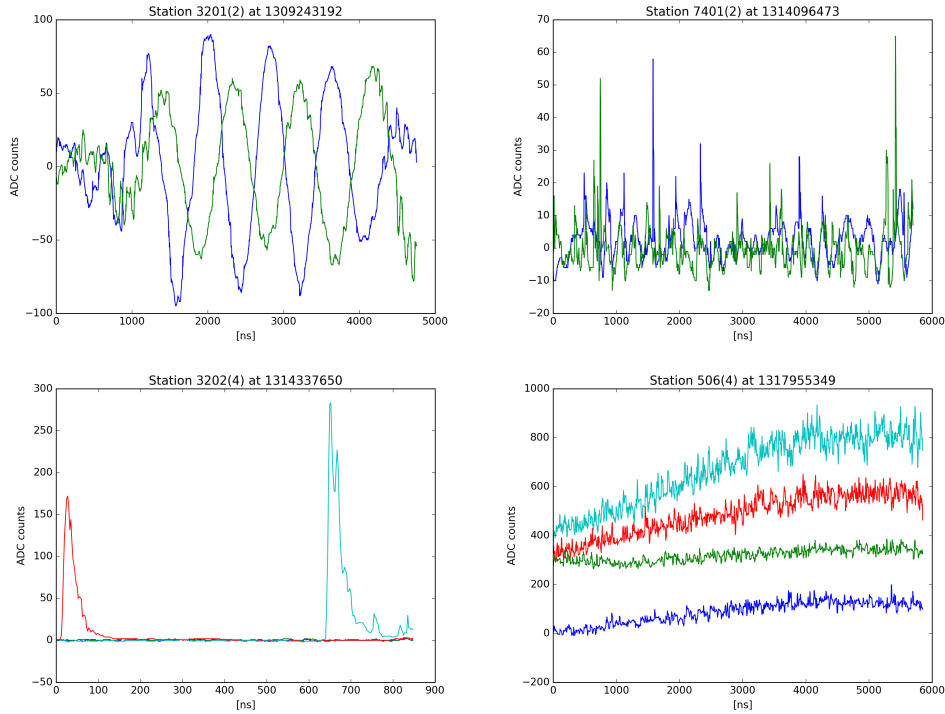


Figuur 3.4: De frequentie van EASsen als functie van het tijdsverschil met de bliksem. De frequentie van coïnciderende EASsen is $100\times$ zo hoog en daarom in de grafiek weggelaten.

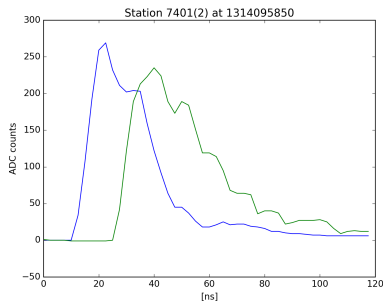


Figuur 3.5: Detail van figuur 3.4 voor kleine tijdverschillen tussen de bliksem en de waarneming van een event door HiSPARC. De frequentie van coïnciderende EASsen is $100\times$ zo hoog en daarom in de grafiek weggelaten.

Van deze 4 categorieën traces, die de software als event beschouwt, staat in de figuur 3.6 van elk een voorbeeld.



Figuur 3.6: Voorbeelden van 4 categorieën traces op $t = (0 \pm 0, 2)$ ms, ten tijde van een grond-wolkbliksem: (links boven) baseline met periodiciteit én mogelijk gesuperponeerde events, (rechts boven) fluctuerende baseline zonder events, (links onder) incidentele event, (rechts onder) onbegrepen signalen.



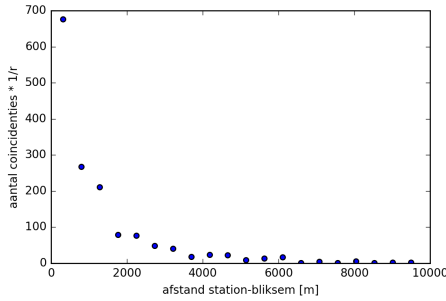
Figuur 3.7: Voorbeeld van een event 0,1 s vóór of na een grond-wolkbliksem.

Traces op $t = -(0, 1 \pm 0, 05)$ s bestaan vrijwel alleen uit normale events, zie figuur 3.7.

Afstand grond-wolk bliksem tot detecterend HiSPARC station

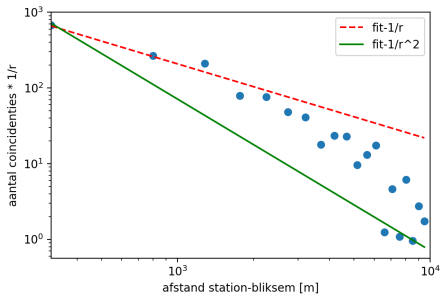
Om de storende invloed van het elektrisch veld van de bliksem op het detecterend station te onderzoeken is van de 234 coïncidenties op $t = (0 \pm 0, 2)$ ms van een EAS met een grond-wolk bliksem, het aantal uitgezet tegen de afstand tot het detecterend HiSPARC station. Aangezien het oppervlak van het gebiedje tussen twee afstanden van een bliksem evenredig met de afstand r toeneemt, is het zinvol om deze afhankelijkheid eruit te halen door het aantal coïncidenties tevoren met $1/r$ te vermenigvuldigen, zie figuur 3.8.

Er is verschil in het te verwachten verband van de sterkte van het elektrische veld van een puntbron en een lijnbron. Daarom zijn in figuur 3.9 dezelfde gegevens nog eens dubbel-logarithmisch uitgezet. Het



Figuur 3.8: Aantal coïncidenties van een EAS met een grond-wolk bliksem vermenigvuldigd met $1/r$ uitgezet tegen de afstand van de bliksem tot het detecterend HiSPARC station.

verband tussen afstand en aantal correlaties ($\times 1/r$) ligt in de log-log plot dichterbij macht -1 dan bij macht -2.



Figuur 3.9: Aantal coïncidenties van een EAS met een grond-wolk bliksem vermenigvuldigd met $1/r$ nu dubbel-logaritmisch uitgezet tegen de afstand van de bliksem tot het detecterend HiSPARC station. De rode stippelijntje geeft het $1/r$ verband, de groene getrokken lijn die van $1/r^2$

3.5 Conclusie en discussie

Zowel EASsen als bliksems genereren in de HiSPARC-detectoren signalen. Bliksems fungeren als staafvormige antennes van radiosignalen, waarvan de intensiteit met $1/r$ afneemt. Dit bijvoorbeeld in tegen-

stelling tot puntvormige bronnen waarvan de intensiteit met $1/r^2$ afneemt. Deze radiosignalen wekken bij de HiSPARC-detectoren, tot op kms afstand in de kabels en/of de elektronica elektrische signalen op. EASsen bestaan ondermeer uit geladen deeltjes, die ieder in een HiSPARC-detectorplaat een foton kunnen vrijmaken dat mogelijk wordt gedetecteerd door de bijbehorende photomultiplier. De signalen in de photomultiplier worden omgezet in een elektrisch signaal en als event geregistreerd, mits de core van de EAS binnen enkele tientallen meters afstand van de HiSPARC-detector de aarde bereikt. Bij het opsporen van coïncidenties tussen bliksems en EASsen moeten we tussen deze beide types signalen onderscheid maken.

Het ontbreken van correlatie tussen pulshoogte en pulsintegraal in de EAS-signalen binnen 0,2 ms voor of na de grond-wolkbliksem wijzen in de richting van het, tijdens een bliksem, niet betrouwbaar kunnen registreren van een EAS door de HiSPARC-detectoren. Nadere beschouwing van de aard van de met de bliksem coïnciderende EASsen levert 4 categorieën events op, die tijdelijke storing in de kabels en/of elektronica in de detector suggereren. Ook komt de afhankelijkheid van de afstand tussen bliksem en het registrerend HiSPARC-station in de buurt van een afhankelijkheid met $1/r$, hetgeen voor het elektrisch veld op een lijnbron wijst. De in de periode 2010-2015 vastgestelde, maar niet betrouwbare, coïncidenties binnen 0,2 ms voor of na de grond-wolkbliksem zijn dus waarschijnlijk te wijten aan het verstoren van de elektronica van de HiSPARC-detectoren door de bliksem. Het lijkt aannemelijk dat gedurende 10 ms rond de returnstroke de HiSPARC detectoren niet betrouwbaar kunnen waarnemen. De 100-voudige toename van de frequentie van coïncidenties in die 10 ms is te wijten zijn aan detectie van de radiostoring. Het zijn coïncidenties die geen EAS zijn, maar door de software wel als zodanig zijn gezien.

Tot 10 ms vóór en vanaf 10 ms na de bliksem vinden we echter zowel in de frequentie van EASsen als in de correlatie tussen pulshoogte en pulsintegraal aanwijzingen dat de HiSPARC-stations wél betrouwbaar kunnen registreren. Ook de frequentie van het aantal EASsen blijft tot ruwweg 7 ms vóór de bliksem constant en blijft vanaf 3 ms na de bliksem ook

weer constant. Tevens de kwaliteit van de gevonden EASsen is tot 10 ms vóór en vanaf 10 ms na de bliksem niet meer afwijkend. Het lijkt daarom aannemelijk dat tot 10 ms vóór en vanaf 10 ms na een grondwolk bliksem, bijvoorbeeld tijdens de stepped leader, de HiSPARC detectoren betrouwbaar kunnen waarnemen. Het waargenomen overschot aan events vóór de bliksem, vergeleken met na de bliksem, betreft mogelijk events die een rol spelen bij het ontstaan van bliksem, de stepped leader.

4 Schatting van de plaats van de shower core aan de hand van aankomsttijden

Jeroen Bezemer



Jeroen Bezemer is in 2005 begonnen in het onderwijs als docent NaSk. Eerst heeft hij lesgegeven binnen het VMBO. In januari 2015 is hij begonnen op het College de Heemlanden in Houten waar hij natuurkunde en NLT geeft in de bovenbouw. Het project Leraar in Onderzoek heeft hem de mogelijkheid gegeven zelf wetenschappelijk onderzoek te verrichten. Het project is tevens zijn onderzoeksstage voor een masterstudie aan de HU die hij komend schooljaar hoopt af te ronden.

4.1 Kosmische straling

De aarde wordt voortdurend getroffen door kosmische straling. Dat kunnen fotonen uit het elektromagnetische spectrum zijn, maar ook neutrino's afkomstig van de zon of andere sterren, of geladen deeltjes, zoals protonen en atoomkernen. Deze deeltjes kunnen een zeer hoge energie hebben, tot wel 10 miljoen keer zo veel energie als er in de deeltjesversneller van CERN kan worden opgewekt. Over de oorsprong van deze deeltjes is nog veel onzeker. Om de herkomst te bepalen is nog veel onderzoek nodig.

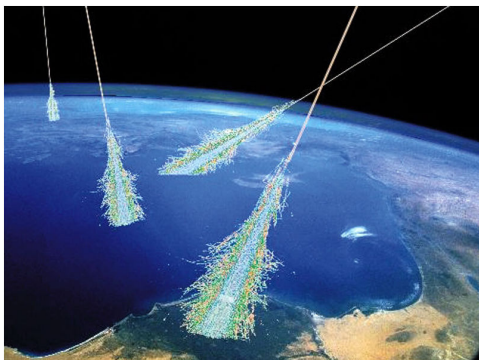
4.1.1 Deeltjeslawine = Air Shower

Wanneer kosmische straling de atmosfeer binnendringt, raakt zij door interactie met de atmosfeer energie kwijt. Door botsingen met atoomkernen in de atmosfeer ontstaan nieuwe deeltjes. Die nieuwe deel-

tjes bewegen in ongeveer dezelfde richting en met ongeveer dezelfde snelheid als het primaire deeltje. Deze deeltjes genereren door nieuwe botsingen weer nieuwe deeltjes, zodat er een lawine van (geladen) deeltjes en fotonen ontstaat, zie figuur 4.1. Dit proces gaat door tot de energie van de deeltjes is afgenomen tot onder het niveau waarop er nog nieuwe deeltjes gecreëerd kunnen worden.

Het geheel van deeltjes in deze kettingreactie wordt een air shower (AS) genoemd. Wanneer het primaire deeltje genoeg energie heeft, kan de shower het aardoppervlak bereiken. Dit wordt een Extensive Air Shower (EAS) genoemd. De voetafdruk van een EAS kan tot enkele km^2 groot zijn. Het midden van de shower wordt de core genoemd en heeft een oppervlakte van enkele vierkante meters.

Het primaire deeltje zelf bereikt het aardoppervlak meestal niet. De metingen aan kosmische straling die



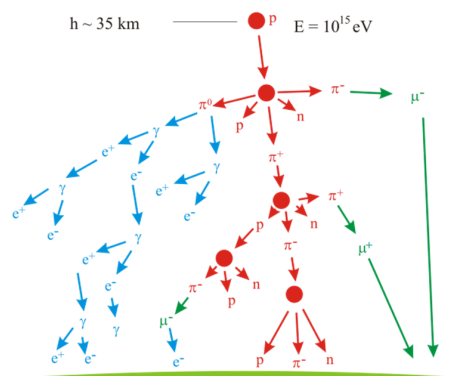
Figuur 4.1: Voorstelling van Extensive Air Showers in de atmosfeer van de aarde. Bron: <https://www.sensorcast.org/wiki/images/b/bb/CosmicRaysClouds.jpg>

op aardoppervlak worden uitgevoerd, zijn metingen aan de deeltjes die ontstaan in de kettingreactie van de shower. Met metingen van de hoeveelheid deeltjes, de hoek en de energie waarmee die het aardoppervlak bereiken kan de shower gereconstrueerd worden en daarmee kunnen uitspraken gedaan worden over de hoek en de energie van het primaire deeltje. De bepaling van de energie van het primaire deeltje is een van de doelen van het HiSPARC project. Daarvoor is de bepaling van het midden van de shower, de core, noodzakelijk. De bepaling van de core is essentieel, omdat aan de hand van metingen ten opzichte van de core de showergrootte (het aantal deeltjes in de shower) bepaald kan worden en daarmee de grootte van de energie van het primaire deeltje.

Er worden twee typen showers onderscheiden: de hadronische shower en de elektromagnetische shower. Een hadronische shower mondt uit in een of meerdere elektromagnetische showers.

4.1.2 Hadronische shower

Wanneer straling vanuit de ruimte de atmosfeer binnendringt, raakt de straling door interactie met de atmosfeer energie kwijt, zie figuur 4.2. Er wordt gesproken over een hadronische shower als het gaat over inkomende deeltjes zoals neutronen,



Figuur 4.2: Schematische weergave van de ontwikkeling van een air shower. In rood is het hadronische gedeelte van de shower weergegeven. In blauw het elektromagnetische gedeelte van de shower. Groen geeft het gedeelte van de shower weer met betrekking tot de muonen. Bron: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_(physics))

protonen of atoomkernen. Door botsingen van deze deeltjes met atoomkernen in de atmosfeer ontstaan hadrons³ waaronder pionen en kaonen. Deze nieuwe deeltjes gaan met bijna de lichtsnelheid in ongeveer dezelfde richting verder. De nieuwe deeltjes botsen vervolgens weer op andere atoomkernen waarbij dan opnieuw pionen en kaonen ontstaan. Dit herhaalt zich net zolang totdat de energie van de deeltjes te klein wordt om nieuwe deeltjes te laten ontstaan. Daarna neemt het aantal deeltjes af door absorptie in de atmosfeer.

De pionen en kaonen die ontstaan vervallen tot neutrino's, muonen en fotonen. Bij het verval van neutrale pionen ontstaan fotonen die een elektromagnetische shower kunnen veroorzaken. Elektromagnetische showers kunnen ook worden veroorzaakt door elektronen en positronen die ontstaan bij het verval van muonen.

³Hadrons zijn subatomaire deeltjes. Er zijn twee typen hadrons:

- Baryonen, zoals protonen en neutronen (drie quarks)
- Mesonen, zoals pionen en kaonen (één quark en één anti-quark)

4.1.3 Elektromagnetische showers

De interactie met de atmosfeer bestaat voor fotonen uit: Compton verstrooiing en paar-productie. Voor geladen deeltjes zoals positronen en elektronen bestaat de interactie uit ionisatie van atomen, Bremsstrahlung, Rutherford verstrooiing, synchrotron straling⁴ en het Cherenkov-effect⁵. De producten van deze interacties (positronen, elektronen en fotonen) gaan weer nieuwe interacties aan. In dit geval spreken we over een elektromagnetische shower.

4.1.4 Absorptie

Door botsingen verdeelt de energie van het primaire deeltje zich over de nieuwe deeltjes en fotonen. Wanneer de energie te laag wordt voor het ontstaan van nieuwe deeltjes, vindt er alleen nog maar absorptie door de atmosfeer plaats. Vanaf dat punt neemt de omvang van de shower af.

Voor de mate van absorptie op een bepaalde hoogte in de atmosfeer is het begrip atmosferische diepte. Dit is de hoeveelheid lucht boven een bepaalde hoogte h in de atmosfeer. De atmosferische diepte wordt gemeten in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Het primaire deeltje komt niet verder dan een paar $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ en zal dus niet verder komen dan de bovenste laag van de atmosfeer op een hoogte van 15 tot 20 km.

De atmosferische diepte wordt beschreven met:

$$X = \int_h^\infty \rho(h') dh' \quad (4.1)$$

In een perfect gas met een constante temperatuur kan het profiel beschreven worden met [10]:

$$X = X_0 \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) \quad (4.2)$$

De temperatuur, dichtheid en druk is over de verschillende lagen van de atmosfeer niet gelijk. Met behulp van de modellen van the US Standard Atmosfeer [11] is de hoogte afhankelijke dichtheid van de atmosfeer binnen de verschillende delen van de atmosfeer

⁴Straling die vrijkomt bij het afbuigen van geladen deeltjes.

⁵Straling die afgegeven wordt door geladen deeltjes die sneller gaan dan de fasesnelheid van licht in dat medium

te berekenen. De temperatuur binnen de verschillende lagen kan als lineair worden beschouwd. Met experimentele waarden van de temperatuur kunnen de dichtheid, druk en dergelijke worden berekend.

Wanneer straling schuin invalt, wordt de atmosferische diepte groter, door het passeren van meer materiaal. De hoek waaronder straling invalt is de zenithhoek, dit is de hoek tussen de normaal van het grondvlak en de richting van de shower. Voor kosmische straling die invalt onder een zenithhoek θ wordt de hoeveelheid atmosfeer die gepasseerd wordt de schuine diepte genoemd. Deze kan tot een θ van 60 graden beschreven worden met

$$X' = \frac{X}{\cos \theta} \quad (4.3)$$

Bij hoeken groter dan 60 graden moet de bolling van de aarde meegenomen worden.

De gemiddelde afstand waarover de energie van een hoogenergetisch elektron wordt gereduceerd met een factor $1/e$ wordt de stralingslengte genoemd. Dit is ongeveer $7/9$ van de gemiddelde vrije-weglengte voor paarproductie van een hoogenergetisch foton. De stralingslengte in lucht is $36,66 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ [12].

De interactielengte is de gemiddelde afstand die een hoogenergetisch hadron aflegt voordat er een hadronische interactie plaatsvindt. De interactie lengte van hadrons in lucht is op zeeniveau $90,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ [12].

Voor de atmosfeer geldt een kolomdichtheid op zeeniveau van $1030 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$. De totale atmosferische diepte is daar dus 28 stralingslengtes en 11 interactielengtes lang.

4.1.5 Vorm van het showerfront

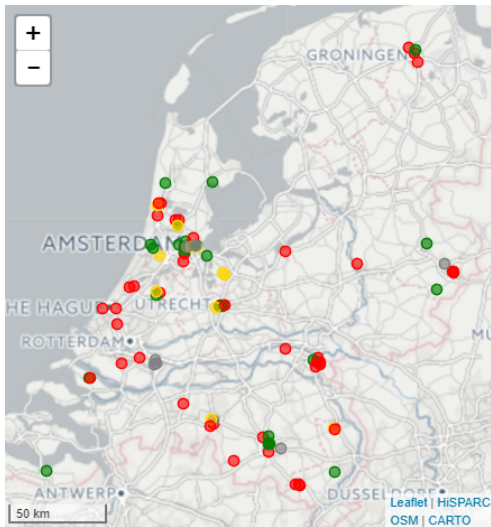
De snelheid van de deeltjes in de shower is in de orde van grootte van de lichtsnelheid. De zijwaartse component van de snelheid is voor de deeltjes in de shower beduidend kleiner dan de component langs de core. Hierdoor waaiert de shower enigszins uit en ontstaat er een soort pannenkoek. Door het verschil in weglengte is het frontvlak van de shower enigszins gebogen en is in het midden dunner dan aan de randen. De dikkere randen komen voort uit de verdeling van aankomsttijden als functie van de afstand tot de core. Bij toenemende afstand, wordt de spreiding van

de aankomsttijden groter. Daardoor wordt ook de dichtheid van de deeltjes in de randen van de shower kleiner. In het midden van het front is de dichtheid het grootst en zitten de deeltjes met de meeste energie. Dit gedeelte, dat in het verlengde van de richting van het primaire deeltje ligt, wordt de core van de shower genoemd.

4.2 Detectie Extensive Airshowers met HiSPARC

4.2.1 HiSPARC project

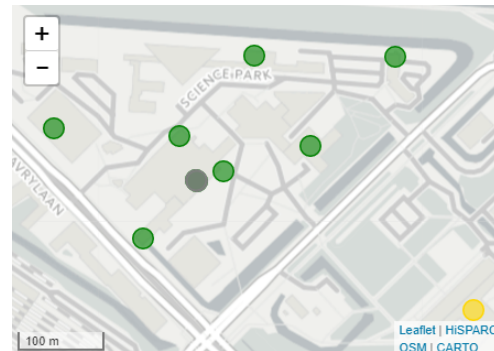
Metingen aan een Extensive Air Shower worden gedaan doormiddel van een array van detectoren. Het HiSPARC project is zo'n array van detectoren. HiSPARC staat voor High School Project for Astrophysics Research with Cosmics en stelt leerlingen van middelbare scholen in staat kennis te maken met en deel te nemen aan wetenschappelijk onderzoek. Daarvoor zijn ruim honderd meetstations verspreid over Nederland op daken van instellingen geplaatst, zie figuur 4.3. Deze meetstations zijn



Figuur 4.3: Posities van de HiSPARC stations in Nederland Bron: <http://www.hisparc.nl/over-hisparc/organisatie/>

onderverdeeld in clusters van stations in een bepaalde

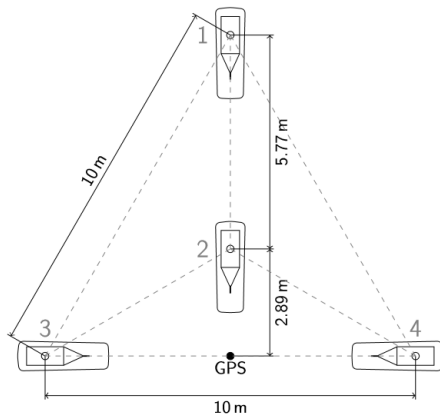
regio. Elk cluster is weer onderverdeeld in stations, zie figuur 4.4.



Figuur 4.4: Posities HiSPARC stations in het cluster Science Park in Amsterdam. Bron: <http://www.hisparc.nl/over-hisparc/organisatie/amsterdam/science-park/>

4.2.2 Stations en Detectoren

De data in het HiSPARC project worden verzameld met behulp van twee of vier detectoren per station. Voor stations die meer afgelegen liggen heeft een vierplaats station de voorkeur omdat daarmee een richtingsreconstructie te doen is en daarmee een zinvolle bijdrage te doen is aan het HiSPARC project. De detectoren zijn in een skibox op het dak geplaatst. Bij de meeste stations zijn ze geplaatst in een vorm van een gelijkzijdige driehoek met zijdes van 10 m, zie figuur 4.5. De keuze voor deze afmetingen heeft te maken met het compromis tussen de nauwkeurigheid in de tijdregistratie, waarbij geldt hoe groter hoe nauwkeuriger, en de maximaal werkbare grootte op het gemiddeld dak van een school of instelling. Een detector bestaat uit een zogenaamde scintillatorplaat, die gemaakt is van een materiaal dat een lichtflits genereert wanneer er een geladen deeltje door heen gaat. De scintillatorplaten bestaan uit perspex waarin een beetje fluor is verwerkt. Het perspex wordt aangeslagen door passerende deeltjes. Het perspex zelf is niet transparant voor het licht dat het perspex uitzendt bij terugvallen naar de grondtoestand. De energie van het perspex wordt overgedragen aan

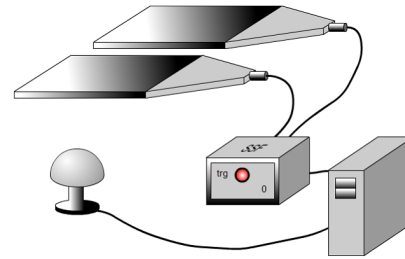


Figuur 4.5: Opstelling van een driehoekstation.
Bron: [12]

het fluor molecuul. Het fluor molecuul zendt op zijn beurt fluorescerend licht uit bij het vervallen van de aangeslagen toestand naar de grondtoestand. Perspex is transparant voor dit licht. De fotonen van dit licht zijn ook niet in staat andere moleculen van de fluor aan te slaan omdat er een beperkte overlap is tussen de emissie- en absorptie banden, en door de lage concentratie van de fluor moleculen. Hierdoor is de scintillator transparant voor deze fotonen [12].

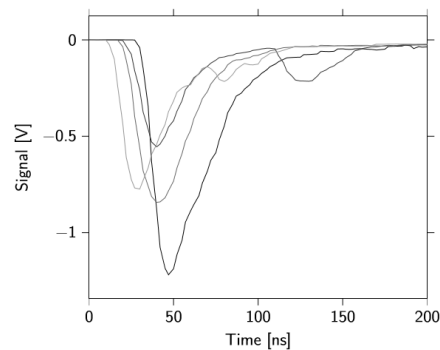
De fotonen uit de lichtflits worden door een trapezi-umvormige lichtgeleider naar een fotoversterkerbuis gestuurd, waar de lichtflits wordt versterkt en omgezet in een elektrische puls, zie figuur 4.6. Een AD-converter (ADC) zet dit analoge signaal om in een digitaal signaal. De ADC wordt aangestuurd met een 200 MHz klok. Door gebruik te maken van twee ADC's waarvan er één aan de opwaartse en één aan het neerwaartse kant van het kloksignaal gekoppeld wordt, kan de sampling verhoogd worden naar 400 MHz. Daardoor komt de samplingtijd uit op 2,5 ns.

De ADC's hebben een sampling range van +113 mV tot -2222 mV. Met de 12 bits omzeters krijgt het signaal een resolutie van 0,57 mV per ADC count. De pulshoogte is de maximale negatieve waarde van het signaal. Meestal wordt de pulshoogte als een positieve waarde gegeven. De oppervlakte onder de grafiek is een maat voor het aantal gepasseerde deeltjes, zie



Figuur 4.6: Schematische weergave van de opstelling van twee detectorplaten met PMT, de GPS antenne, de AD-converter en de FPGA. Bron: <http://www.hisparc.nl/nlt/hoofdstuk2.htm>

figuur 4.7.

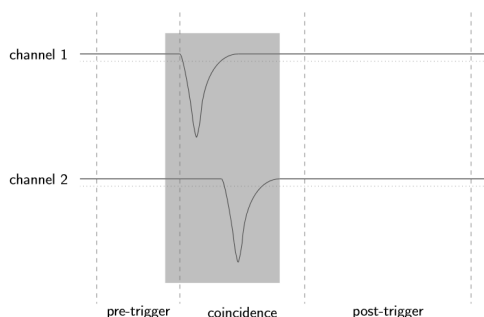


Figuur 4.7: Een meting van een event in een HiSPARC station, gedigitaliseerd met de ADC's. Hierin is te zien dat de vier detectoren een verschillende aankomsttijd hebben gemeten. Bij tenminste twee van de detectoren zijn meerdere deeltjes gedetecteerd. Bron: [12]

4.2.3 Dataregistratie

Het signaal van de ADC's wordt verstuurd naar een Field Programmable Gate Array (FPGA). Hier vindt de trigger logic plaats. Dit is een computer die de gegevens in eerste instantie verwerkt en eventueel opslaat. Om een shower te detecteren moeten minimaal twee detectoren ongeveer tegelijkertijd boven een be-

paalde drempelwaarde komen of drie detectoren boven een lagere drempelwaarde komen. Wanneer een enkele detector boven de drempelwaarde komt, is er sprake van een enkel deeltje. De kans dat twee enkele deeltjes gelijktijdig twee afzonderlijke detectoren raken is verwaarloosbaar klein. Wanneer meerdere detectoren ongeveer gelijktijdig boven de drempelwaarde komen, moet er wel een shower zijn. Er is dan sprake van een event (detectie van een shower). Er wordt continu gemeten maar niet alle data wordt opgeslagen. Alleen de relevante data omtrent een event (het detecteren van een shower) wordt opgeslagen. Daarvoor wordt de data eerst in een buffer opgeslagen. Het voordeel van een buffer is dat ook de gegevens van vlak voor de triggertijd bewaard worden. Wanneer het station getriggerd wordt, is het event namelijk al begonnen. De buffer heeft een capaciteit voor $30 \mu\text{s}$ aan data. Het HISPARC project maakt gebruik van $6 \mu\text{s}$ intervallen die worden opgeslagen in de buffer. Daarin zit een pre-trigger tijd ($1 \mu\text{s}$), een coïncidentie ($1,5 \mu\text{s}$) en een post-trigger time ($3,5 \mu\text{s}$), zie figuur 4.8.



Figuur 4.8: Schematische weergave van een event-registratie. Gestippelde lijnen: pre-trigger ($1 \mu\text{s}$), coïncidentie ($1,5 \mu\text{s}$) en post-trigger ($3,5 \mu\text{s}$). Gestippelde horizontale lijn: treshold (20 ADC). Grijs vlak: data-reduction window. Data buiten dit tijdsinterval wordt niet opgeslagen. Bron: [12]

Wanneer een station getriggerd is, wordt de buffer uitgelezen. Er vindt dan een analyse plaats van de gegevens. Met behulp van een drempelwaarde wordt bepaald wanneer het event werkelijk begonnen en geëindigd is. Daarmee wordt de zogenaamde ruis van

voor en na het event verwijderd, zodat alleen de relevante informatie definitief wordt opgeslagen en doorgestuurd naar de centrale database. Dit proces wordt data-reduction genoemd.

4.2.4 Tijd registratie

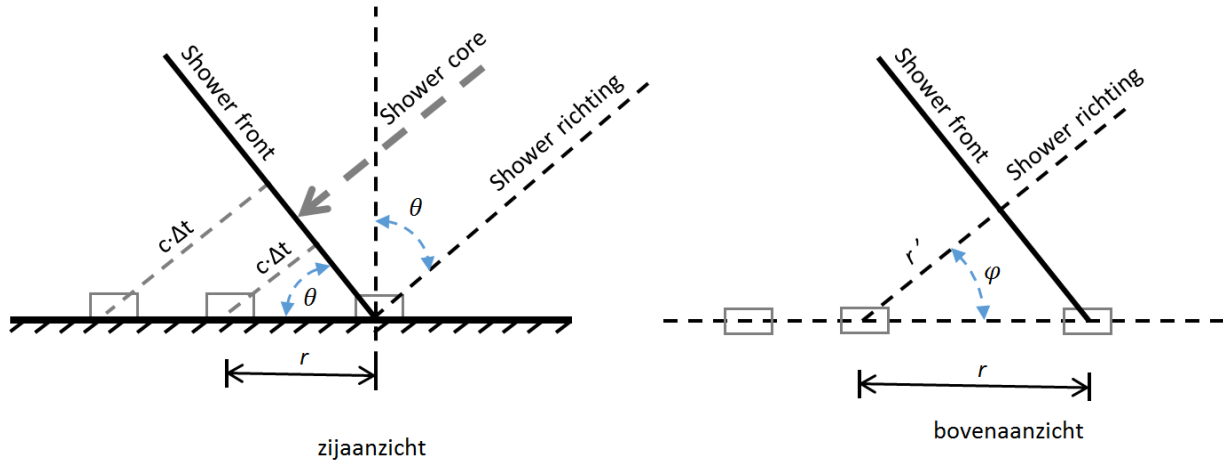
Aan de opgeslagen data wordt met behulp van een GPS-klok een timestamp gehangen. Dit timestamp is het moment van het overschrijden van de triggerwaarde. De triggerwaarden van de afzonderlijke detectoren worden opgeslagen als tijdstip na het timestamp. Het timestamp van het event wordt genoteerd in nanoseconden.

4.2.5 Data-analyse

Binnen het HISPARC project zijn bewerkte gegevens als Event Summary Database (ESD) openbaar toegankelijk gemaakt. Deze zijn op te vragen via de website <http://data.hisparc.nl/data/download/> of met behulp van de Application Programming Interface (API). Daarvoor wordt code gebruikt in de programmeertaal Python. Python is een programmeertaal die binnen HISPARC gebruikt wordt voor het schrijven van data-analyse programma's. Voor Python is de module SAPHIRE (Simulation and Analysis Program Package for HISPARC Research and Education) ontwikkeld waarmee diverse scripts voor het gebruik binnen HISPARC zijn gedefinieerd. In het kader van dit onderzoek is met Python en SAPHIRE gebruik gemaakt van de gegevens in de ESD. Voor het programmeren worden zogenaamde notebooks gebruikt. Dit zijn bestanden met een Python programmeeromgeving, waarin opmerkingen en uitleg tussen de code van het script opgenomen kan worden.

4.3 Verschillen in aankomsttijden

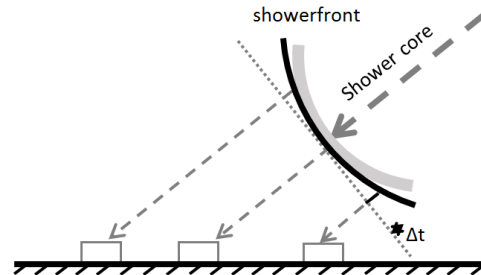
In dit onderzoek wordt gekeken naar de coïncidentie (gelijktijdigheid) tussen meerdere stations. Er is sprake van een coïncidentie tussen twee stations als de stations ongeveer gelijktijdig een event en dus dezelfde shower detecteren. Voor één event verschillen



Figuur 4.9: De shower heeft verschillende aankomsttijden in stations op een afstand r . De verschillen in aankomsttijd hangen af van de richting waaruit de shower komt. In het figuur links staat een zijaanzicht. Het front van een niet verticaal invallende shower zal de twee stations bereiken met een tijdsverschil Δt , afhankelijk van de zenithoek. De figuur aan de rechterzijde laat een bovenaanzicht zien. Als een shower het station bereikt met een azimuth hoek groter of kleiner dan 0 , wordt r vervangen door r' .

de aankomsttijden van de detectoren in de verschillende stations een beetje van elkaar, zie figuur 4.9. Dit komt doordat de shower vaak schuin invalt. De shower zal vanuit één richting het eerst gepasseerde station als eerste raken en vervolgens de stations die verderop liggen.

Ook de vorm van het showerfront heeft invloed op de geregistreerde aankomsttijden. Door de enigszins bolle vorm van het frontvlak zal er zelfs bij verticale inval van een shower een verschil in aankomsttijd zijn tussen de deeltjes ter hoogte van de core van de shower en de deeltjes meer naar de rand van het frontvlak. Bij een schuin invallende shower moet in een vlak loodrecht op de core dan een cirkelvormig patroon binnen de aankomsttijden worden waargenomen. De kleinste waarde in dit vlak valt samen met de core van de shower, zie figuur 4.10.

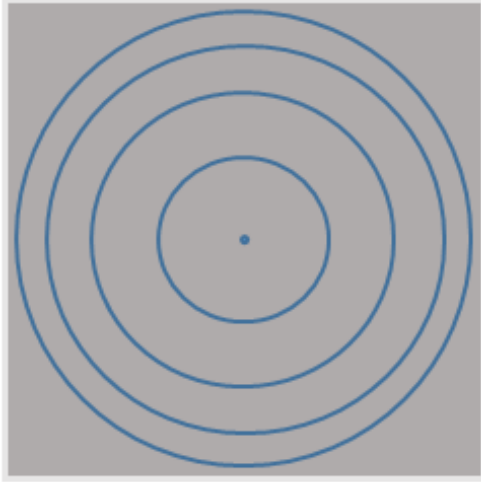


Figuur 4.10: Schematische weergave van het invallen van een shower. Door de bolling van het frontvlak ontstaat er een extra tijdsverschil Δt tussen de stations.

4.3.1 Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag van dit onderzoek is: *Is het cirkelvormige patroon van aankomsttijden binnen het*

HiSPARC project, zie figuur 4.11 uit de meetgegevens te reconstrueren en is daarmee een uitspraak te doen over de positie van de core van de shower?



Figuur 4.11: Patroon van aankomsttijden in een vlak loodrecht op de richting van de shower.

4.4 Methode

Van een event worden de aankomsttijden van de verschillende stations teruggerekend naar een projectievlak dat loodrecht op richting van de shower staat.

4.4.1 Data

De data die gebruikt wordt, komt uit de ESD door een reconstructie van events te maken van de stations op het Science Park. De reconstructie van de events vindt plaats met het bestaande script binnen SAPHIRE. Van 1 januari 2016 tot en met 6 januari 2016 zijn 51 events gereconstrueerd, die alle stations van het cluster hebben getriggert. De stations 507 en 511 zijn buiten beschouwing gebleven vanwege hardware problemen in deze periode.

Bij de reconstructie zijn eventtabellen voor alle stations aangemaakt. Een onderdeel van de reconstructie in SAPHIRE is de richtingsreconstructie van de shower. De richtingsreconstructie vindt plaats met behulp van de verschillen in aankomsttijd tussen de detectoren van één station. Bij de richtingsreconstructie binnen SAPHIRE moet rekening gehouden worden met een onzekerheid van 5,9 graden [12].

Voor de plaats gegevens van de stations is gebruik

gemaakt van het script HISPARC clusters. Daarin is in de loop van het onderzoek een aanpassing gedaan. Bij het bepalen van de offset-tijden bleek dat de GPS hoogte bepaling te onnauwkeurig was. Bij de berekening van de offset wordt gecorrigeerd voor het verschil in hoogte tussen de stations. Voor station 501 en 510 was het hoogte verschil vanuit de GPS bepaling ongeveer 3,0 m. In werkelijkheid liggen ze op dezelfde hoogte tegen elkaar aan. Dit verschil ontstaat door de grote onnauwkeurigheid waarmee een GPS systeem de hoogte bepaalt. Een onnauwkeurigheid van 3 m in de hoogte heeft een verschil van 10 ns in de offset tot gevolg. De hoogtes zijn handmatig ingevoerd in SAPHIRE met behulp van een bouwkundige tekening. De posities in het horizontale vlak worden wel gebruikt uit de GPS-posities.

Station 511 is weggelaten omdat het station afwijkende metingen vertoonde in de aankomsttijden van een event. Het verschil van de aankomsttijd tussen 511 en de rest van het cluster had een grootte van een aantal uren. Dit werd veroorzaakt doordat er in de reconstructie tabel van 511 twee regels met het zelfde timestamp zaten. Daardoor gaat de tabel uit de pas lopen met de tabellen van andere stations. Twee regels met dezelfde timestamp komen voor als er voor dat station twee events in een klein tijdsbestek zijn geweest. Station 507 wordt uit de data weggelaten omdat deze zich in hal van het Nikhef gebouw bevindt. Metingen van dit station worden verstoord door het gebouw dat er boven staat.

Voor de reconstructie van het frontvlak is het event nummer 5 met timestempel zaterdag 2 januari 2016 10:28:53.975 gebruikt. De gegevens van dit event zijn uit de reconstructie-tabellen gehaald. Dit event valt in met een zenithhoek kleiner dan 60 graden en het patroon van MIP-waarden duidt op een core binnen het cluster.

4.4.2 Tijden

Voor de aankomsttijden is gebruik gemaakt van de aankomsttijd per detector. Deze zijn met SAPHIRE uit het ESD gehaald, als tijdstip ten opzichte van de extended-timestamp van het event. Het station in het cluster met de kleinste aankomsttijd op een van de detectoren wordt als referentiestation (R) geno-

men. De aankomsttijden van alle detectoren worden verminderd met de aankomsttijd van het referentiestation, zodat er een tijdsverschil tussen de stations overblijft. Voor elk station wordt de kleinste detectortijd gebruikt als de eerste aankomsttijd van het station.

4.4.2.1 Offset tijden

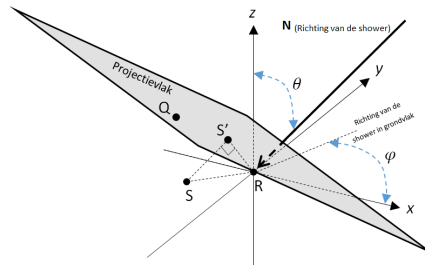
Door verschil in lengte van kabels en verschillen in het functioneren van elektrische apparaten ontstaan tussen de signalen van de verschillende detectoren tijdsverschillen. De fout die daardoor ontstaat in de aankomsttijd wordt de tijd-offset genoemd. De offset wordt binnen SAPPHiRE bepaald door een verdeling te maken van de verschillen in aankomsttijd tussen de detectoren. De tijdsverschillen worden veroorzaakt door weglengte verschillen veroorzaakt door de richting van de shower. Omdat gemiddeld genomen de showers uit alle richtingen komen, is het weglengte verschil en daarmee het tijdsverschil normaal verdeeld. De verschuiving van het maximum is de offset tussen de twee detectoren. Binnen SAPPHiRE zijn deze voor alle platen in het station op te vragen uit de ESD. De detectortijden worden aangepast met behulp van de tijd-offset. Tussen de stations bestaat ook een tijdoffset. Deze wordt op een vergelijkbare wijze bepaald ten opzichte van het referentiestation (t_{offset}). Ook de offsettijden worden verrekend in de detectortijden.

4.4.3 Projecteren in projectievlak

4.4.3.1 Coördinatenstelsel

Aan de stations worden coördinaten toegekend vanuit SAPPHiRE met behulp van het ENU-stelsel (East, North, Up). In de oorsprong van het gekozen coördinaten stelsel ligt het referentiestation (\mathbf{R}), zie figuur 4.12. Daardoor zijn de coördinaten van elk station gelijk aan de vector van het referentiestation naar het betreffende station (\mathbf{RS}).

$$\mathbf{RS} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4.4)$$



Figuur 4.12: Principe van het projectievlak ten opzichte van het referentie station \mathbf{R} en een van de andere stations \mathbf{S} en de projectie van het station op het projectievlak \mathbf{S}' . \mathbf{Q} is een willekeurig punt op het projectievlak. De hoek θ is de hoek tussen de shower en de normaal van het grondvlak. ϕ geeft de hoek tussen de projectie van de shower in het grondvlak en het oosten.

Het ENU stelsel is een Cartesisch coördinaten stelsel. In SAPPHiRE wordt ook gebruik gemaakt van een stelsel van bolcoördinaten. Het verband tussen Cartesische coördinaten (x,y,z) en bolcoördinaten (r,θ,ϕ) is:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi \\ y &= r \sin \theta \sin \phi \\ z &= r \cos \theta \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{aligned}$$

4.4.3.2 Projectievlak

Het vlak loodrecht op de core is gedefinieerd als het projectievlak (P), loodrecht op de core van de shower en door de oorsprong van het coördinatenstelsel. Het voordeel van een vlak door de oorsprong (en dus door het referentiestation) is dat alle stations aan dezelfde kant van het projectievlak liggen, wat de berekeningen vereenvoudigt. Het projectievlak wordt beschreven met de normaal van één punt waar het vlak doorheen gaat. In dit geval is de oorsprong van het coördinatenstelsel, het referentiestation (\mathbf{R}).

De normaalvector (\mathbf{N}) van het projectievlak is gekozen in de richting van het event. De richting van het

event wordt binnen de richtingsreconstructie in SAPHIRE beschreven door de azimuth (ϕ) en de zenithhoek (θ) van het event. Daaruit volgt een normaalvector:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta \sin \phi \\ -\cos \theta \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

met ϕ is de azimuth hoek in radialen met oostelijk als 0 rad en θ de zenithhoek in radialen met loodrecht op het grondvlak 0 rad. Als het punt $\mathbf{Q} = (x, y, z)$ een willekeurig punt op het projectievlak is dan is de vector $\mathbf{RQ}(x, y, z)$ de orthogonaal met vector $\mathbf{N}(u, v, w)$ en geldt:

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{RQ} = 0 \quad (4.6)$$

Het projectievlak (P) wordt dan met een Cartesische vergelijking beschreven:

$$P : ux + vy + wz = 0 \quad (4.7)$$

4.4.3.3 Afstand station-projectievlak

De afstand van een station (\mathbf{S}) tot aan het projectievlak is de meetkundige afstand van een punt tot een vlak: $\mathbf{S}(x, y, z)$ is positie van het station, d de afstand van het punt (\mathbf{S}) tot vlak (P):

$$d_{\mathbf{S} \rightarrow P} = \frac{|ux + vy + wz|}{1} \quad (4.8)$$

4.4.3.4 Coördinaten projectievlak

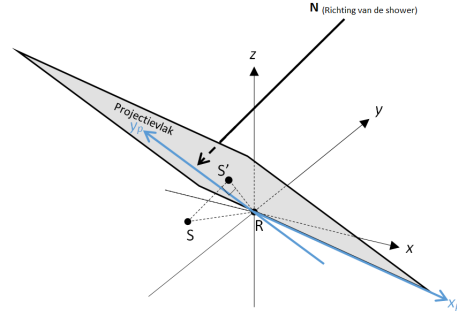
De coördinaten van de projectie (\mathbf{S}') van de stations in het projectievlak worden bepaald door:

$$\mathbf{S}'_{x,y,z} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - d_{\mathbf{S} \rightarrow P} \cdot \mathbf{N} \quad (4.9)$$

Het -teken in de berekening komt, doordat de normaalvector gekozen is in de richting van de shower. De verplaatsing van \mathbf{S} naar het projectievlak is tegen de richting van de shower in. De nieuwe coördinaten kunnen opgevat worden als richtingsvectoren (\mathbf{S}') binnen het projectievlak. Het inproduct van deze vectoren met de normaal moet gelijk zijn aan nul.

4.4.3.5 Vooraanzicht

Om een vooraanzicht te maken wordt de projectie omgezet naar (xp,yp)-coördinaten in het projectievlak. De snijlijn van het projectievlak met het grondvlak vormt de xp-as. De lijn in het projectievlak door de oorsprong en haaks op de xp-as vormt de yp-as, zie figuur 4.13.



Figuur 4.13: De yp-as en de xp-as in het projectievlak.

De eenheidsvector in de xp-as (\mathbf{e}_{xp}) wordt bepaald doordat hij haaks op de azimuth hoek π staat. De hoek die \mathbf{e}_{xp} met het oosten maakt wordt dan $\phi - \frac{1}{2}\pi$. Daaruit volgt:

$$\mathbf{e}_{xp} = \begin{pmatrix} \cos(\phi - \frac{1}{2}\pi) \\ \sin(\phi - \frac{1}{2}\pi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Omdat de yp-as zowel loodrecht op de normaal van het projectievlak als loodrecht op de xp-as staat is de eenheidsvector van de yp-as (\mathbf{e}_{yp}) te bepalen als het uitproduct van de normaal (\mathbf{N}) en de eenheidsvector van de xp-as (\mathbf{e}_{xp}):

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{yp} &= -\mathbf{e}_{xp} \times \mathbf{N} \\ &= (bw - vc)\mathbf{e}_x - (aw - uc)\mathbf{e}_y + (av - ub)\mathbf{e}_z \end{aligned}$$

met: $\mathbf{e}_{xp} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$ en $\mathbf{N} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$. Het -teken komt wederom vanuit de gekozen richting van de normaalvector. De projectievlak vectoren moeten onderling en met de normaal via een inproduct 0 opleveren.

4.4.3.6 Omzetten projectievlak naar voor-aanzicht

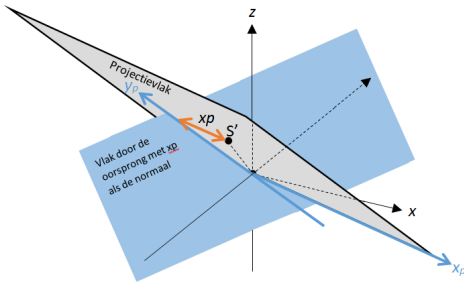
Voor de coördinaten in het voor-aanzicht worden de x_p en y_p waardens berekend door de afstand te berekenen loodrecht op het vlak door de oorsprong waar respectievelijk de x_p en de y_p -as de normaal van zijn. De x_p -as (\mathbf{e}_{xp}) en de y_p -as (\mathbf{e}_{yp}) zijn gedefinieerd:

$$\mathbf{S}' = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{e}_{xp} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{e}_{yp} = \begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix}$$

In het voor-aanzicht worden de waarden voor x_p en y_p berekend als afstand van een punt tot een vlak, zie figuur 4.14:



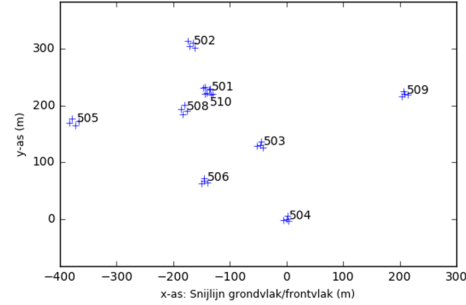
Figuur 4.14: Bepaling van x_p voor de projectie \mathbf{S}' , de afstand van \mathbf{S}' tot het vlak door de oorsprong waar de x_p -as de normaal van is.

$$x_p = \frac{ax + by + cz}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4.11)$$

$$y_p = \frac{dx + ey + fz}{\sqrt{d^2 + e^2 + f^2}} \quad (4.12)$$

Voor alle detectoren van de stations worden de coördinaten bepaald in het projectievlak. Dit levert

een voor-aanzicht op van het projectievlak met daarin de spreiding van de detectoren in de verschillende stations. Dit zijn de posities voor iedere detector waar de shower het projectievlak passeerde. Dit levert een afbeelding op zoals figuur 4.15.



Figuur 4.15: De posities van de detectoren van de stations geprojecteerd op het projectievlak van event 5.

Hier is het projectievlak afgebeeld met een kijkrichting tegen de richting van de shower in.

4.4.4 Gereconstrueerde MIP-waarden

MIP staat voor Minimum Ionizing Particle en is de waarde voor de hoeveelheid energie die de plaat meet na passeren van één deeltje. Door absorptie in de atmosfeer neemt de energie van de shower geleidelijk af. De energie van het deeltje is bij het passeren van het projectievlak dus hoger dan bij de metingen in de stations op de grond. Om de MIP-waarden te kunnen vergelijken moet deze worden teruggerekend naar de waarde bij het passeren van het projectie vlak. De gereconstrueerde MIP-waarden worden berekend met:

$$N_0 = N_x e^{\frac{X}{\lambda}} \quad (4.13)$$

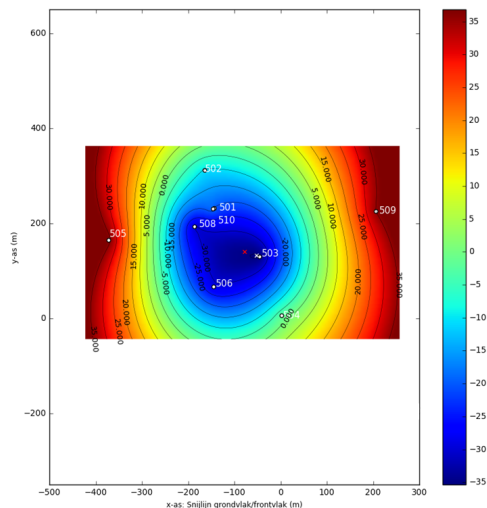
Met X de massa van de lucht die de straling per cm^2 doorsnede passeert en λ de absorptielengte. $\lambda \approx 185 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ [13]. Bij een dichtheid van $1,2 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$ is de massa van lucht per strekkende meter $12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$. $X = 0,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{m}^{-1} \cdot d_{\mathbf{S}\rightarrow f}$. $d_{\mathbf{S}\rightarrow f}$ is de afstand van station tot projectievlak (m).

4.4.5 Interpolatie aankomsttijden

Voor elke detectorplaat van elk station wordt de aankomsttijd teruggerekend naar de aankomsttijd in het projectievlak. De tijden zijn teruggerekend met behulp van de afgelegde weg (afstand station- projectievlak) en de lichtsnelheid c .

$$dt = c d_{\mathbf{s} \rightarrow \mathbf{f}} \quad (4.14)$$

Met behulp van interpolatie⁶ wordt voor een array aan punten de waarde berekend voor de aankomsttijden in het projectievlak. Een grafische weergave daarvan is te zien in figuur 4.16. Hierbij is de blauwe kleur een vroege aankomsttijd



Figuur 4.16: Interpolatie van de aankomsttijden in nanoseconden voor het projectievlak van event 5. Het rode kruisje geeft de core aan volgens de SAPPHiRE-reconstructie. Het witte kruisje is het minimum van de interpolatie. De plaats ervan wordt gegeven door de volgende coördinaten: $(-52.3, 132.2)$.

en een rode kleur een late aankomsttijd in het projectievlak. Het minimum in het array is aangegeven met een wit kruis. Dit punt is de verwachte positie van de core van de shower. Ter vergelijking staat in het rood de positie van de core uit SAPPHiRE gegeven als projectie in het projectievlak.

⁶scipy interpolate radian

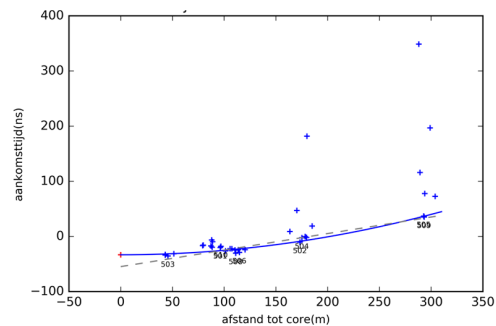
De coördinaten van de het minimum zijn gegeven in het coördinatenstelsel van het vooraanzicht. Deze coördinaten zijn terug te rekenen naar het grondvlak door ze eerst om te rekenen naar de ENU coördinaten met behulp van de eenheidsvectoren \mathbf{e}_{xp} en \mathbf{e}_{yp} en vervolgens met behulp van de normaalvector van het projectievlak de projectie op het grondvlak te berekenen.

4.5 Resultaten

Voor het event vijf is in de interpolatie van aankomsttijden een cirkelvormig patroon te herkennen. De positie van het minimum valt in de buurt van de positie van de SAPPHiRE core.

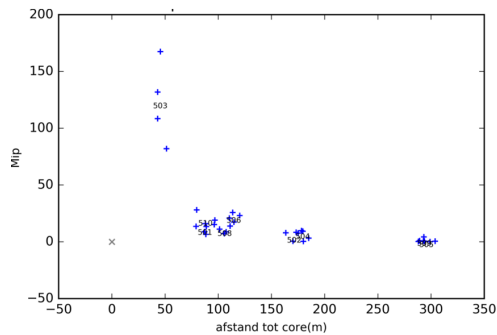
4.5.1 Aankomsttijden en MIP-waarden tot de afstand van de core

In de buurt van de core wordt een kleine spreiding tussen de aankomsttijden van de verschillende stations verwacht. Verder weg van de core is de spreiding groter. De dichtheid van de deeltjes is kleiner en de dikte van het showerfront groter. De kans dat een deeltje aan de voorkant van het front een van de detectoren raakt is verder weg van de core kleiner. In figuur 4.17 zijn voor event vijf de aankomsttijden van de detectoren uitgezet tegen de afstand tot het



Figuur 4.17: Aankomsttijden in het projectievlak per detector uitgezet tegen de afstand tot de positie van het minimum van de interpolatie, de positie waar de core verwacht wordt. Het minimum is aangegeven met het rode kruis.

gevonden minimum. De verdeling van de aankomsttijden komt overeen met de theorie. Voor de MIP-waarden geldt een tegenovergesteld verband. Bij de core wordt een hoge waarde verwacht. Naarmate de afstand tot de core groter wordt zal de MIP-waarde afnemen. In figuur 4.18 zijn voor de detectoren van elk station de MIP-waarde uitgezet ten opzichte van



Figuur 4.18: MIP-waarden uitgezet in het projectievlak per detector uitgezet tegen de afstand tot de positie van het minimum van de interpolatie, de positie waar de core verwacht wordt. Het minimum is aangegeven met het kruis.

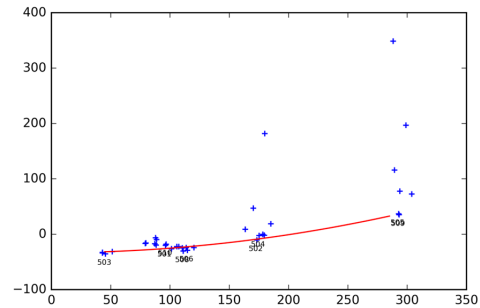
het gevonden minimum weergegeven. Bij het betreffende event neemt de spreiding van de MIP-waarde en de gemiddelde MIP-waarde af met de afstand tot de positie van het minimum.

4.5.2 3D- curve fit

Met behulp van een functiefit is gekeken in hoeverre de gereconstrueerde aankomsttijden op een paraboloid vallen. Daarvoor is een 3d-curvefit⁷ gebruikt, waarbij x en y de coördinaten in het projectievlak zijn. De gereconstrueerde aankomsttijd in het projectie vlak is de z waarde van de paraboloid. De gereconstrueerde aankomsttijds is

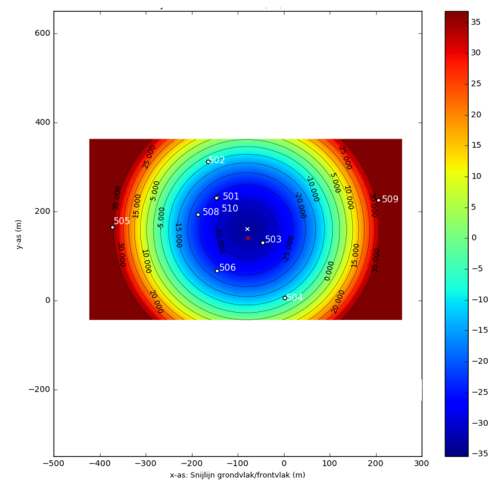
$$z = (x + a)^2 + (y + b)^2 d + c \quad (4.15)$$

Deze functie is gefit aan de eerste aankomsttijden per station. De resultaten van de fit staan in figuur 4.19. De curvefit weergegeven als aankomsttijden in het



Figuur 4.19: Curvefit van de aankomsttijden in het projectievlak van event vijf.

frontvlak. Afwijkingen van de aankomsttijden ten opzichte van de fit variëren van 1 tot 12 ns. Als de curvefit gebruikt wordt om de eenzelfde afbeelding te genereren als de interpolatie, dan komt de afbeelding als in figuur 4.20 tevoorschijn. Het minimum van de curvefit ligt dicht in de buurt van de core, zoals die binnen SAPHIRE geconstrueerd wordt, zie figuur 4.20.

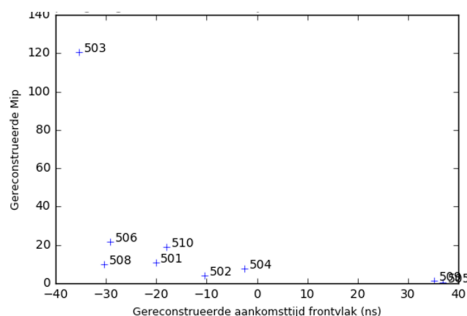


Figuur 4.20: Aankomsttijden in het projectievlak met behulp van de curve-fit van event vijf. Het witte kruis is het minimum van de curvefit, het rode kruis is de core zoals die in SAPHIRE is gereconstrueerd.

⁷Scipy.curvefit

4.5.3 Andere events

In de periode 1 tot 6 januari 2016 komen in het Science Park 51 coïncidenties voor. Daarvan zijn de eerste 20 coïncidenties bekeken. Daarvan geven vijf een cirkelvormig patroon, zes een redelijk cirkelvormig patroon, twee een beetje en zeven geen cirkelvormig patroon. Bij de coïncidenties die een cirkelvormige patroon geven, komen de grafiek van de aankomsttijden ten opzichte van de core en de grafiek van de MIP-waarden ten opzichte van de core overeen met de theorie. Bij een kleine aankomsttijd wordt een grote MIP-waarde verwacht en andersom. In figuur 4.21 is het verband gegeven tussen de MIP-waarden en de aankomsttijd voor event 5. Events waarvan het



Figuur 4.21: Verband tussen de MIP-waarde en de gereconstrueerde aankomsttijd. Bij een kleine aankomsttijd in het projectievlak wordt een hoge MIP-waarde verwacht en andersom.

verband MIP-waarde - aankomsttijd klopt geven ook een cirkelvormig patroon. Events waar dit verband niet klopt geven ook geen cirkelvormig patroon. Dit geeft dus een indicatie of het cirkelvormig patroon zichtbaar wordt. Mogelijke oorzaken zijn:

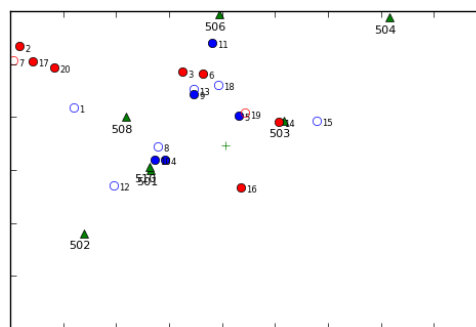
- Positie van de core ten opzichte van de stations in het cluster
- Onnauwkeurigheid in de hoekbepaling binnen SAPPHiRE
- Hoek van inval, wellicht veel meer events bekijken om daar patronen in te zien. (voor zowel zenit- als azimut-hoek

- Dubbele events

4.5.4 Positie van de core

De verwachting is dat events die aan de rand van het cluster vallen een minder duidelijk cirkelvormig patroon laten zien. Er wordt gebruik gemaakt van een zeer klein aantal meetpunten. Als de meeste stations aan één zijde van de core liggen, is er te weinig verschil tussen de metingen om de bolling van het frontvlak zichtbaar te maken.

In figuur 4.22 staat voor elk van de twintig events de positie van de core aangegeven zoals die gevonden is



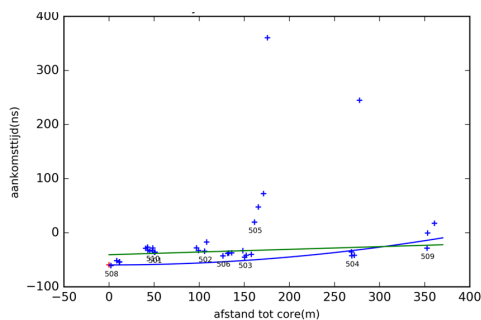
Figuur 4.22: Posities van de cores van de events 1 t/m 20 ten opzichte van de stations in het cluster Science Park Amsterdam. De events zijn gesorteerd op de mate waarin het cirkelvormig patroon is gevonden. Blauw gevuld: goed, blauw open: redelijk, rood open: een beetje, rood gevuld : geen cirkelpatroon.

met behulp van SAPPHiRE. De cores zijn gecodeerd op de mate waarin binnen dit onderzoek het cirkelvormige patroon zichtbaar is geworden. De events met een waarneembaar cirkelvormig patroon, vallen in het midden van het cluster. Aan de rand van het cluster vallen zoals verwacht een aantal events waarbij het cirkelvormig patroon niet zichtbaar wordt.

De events 3, 6, 14 en 19 geven ondanks de positie in het midden van het cluster geen cirkelvormig patroon. De verklaring hiervoor moet nog gevonden worden.

4.5.5 Aankomsttijden en MIP-waarden

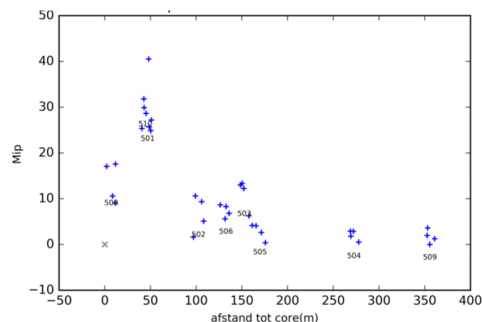
Events waar het cirkelpatroon niet tevoorschijn komt, vertonen ook in de grafieken van de aankomsttijd en MIP-waarden tegen de afstand tot de core afwijkingen. In figuur 4.23 staan van event acht de aankomsttijden ten opzichte van de afstand tot het



Figuur 4.23: Aankomsttijden in het projectievlak per detector van event acht uitgezet tegen de afstand tot de positie van het minimum van de interpolatie. Het minimum is aangegeven met het rode kruis. Station 505 zou op basis van de eerste aankomsttijd en de spreiding in de aankomsttijden verder van het minimum worden verwacht. Station 506 juist eerder.

minimum gegeven. Station 505 wordt op basis van de eerste aankomsttijd en de spreiding in de aankomsttijden verder van het minimum verwacht, station 506 juist dichterbij. In figuur 4.24 staan van event acht de MIP-waarde uitgezet tegen de afstand tot het minimum. Event 508 wordt hier op een grotere afstand tot het minimum verwacht.

Dit kan te maken hebben met de onnauwkeurigheid in de richtingsreconstructie. [12] geeft aan dat 66% van de gereconstrueerde showers binnen een foutmarge van $5,9^\circ$ vallen. Deze onnauwkeurigheid komt door de tijdsverschillen in de verwerking van de apparatuur. Bij een grotere zenithhoek is de foutmarge kleiner dan bij een kleine zenithhoek, omdat het tijdsverschil door het verschil in weglengte bij showers die schuin invallen relatief groter is dan bij showers die (bijna) loodrecht invallen. De onnauwkeurigheid in de hoekreconstructie werkt door in de bepaling van de positie op het projectievlak en in de afstand tot



Figuur 4.24: MIP-waarden van event acht uitgezet in het projectievlak per detector tegen de afstand tot de positie van het minimum van de interpolatie. Het minimum is aangegeven met het kruis. Voor station 508 zou op basis van de MIP-waarde een grotere afstand tot het minimum worden verwacht.

de projectie en daarmee in de gereconstrueerde aankomsttijd.

5 Is een Forbush Decrease waar te nemen in de detectie van HiSPARC?

Mark van de Ven



Mark van de Ven is sinds 2008 als eerstegraads docent Natuurkunde verbonden aan KSG de Breul in Zeist. Na het behalen van een tweedegraads bevoegdheid aan de Noordelijke Hogeschool Leeuwarden in 2006 heeft hij gewerkt in Hoofddorp bij het Haarlemmermeerlyceum als docent Nask, Natuurkunde, Scheikunde. Tijdens deze betrekking deed hij al ervaring op het eerstegraadsgebied op. Hij heeft zijn eerstegraadsbevoegdheid voor Natuurkunde behaald aan de Hogeschool Utrecht in 2012. Als organisator van de schoolexcursieweek naar Genève kwam hij regelmatig in contact met CERN en het Nikhef en dat heeft hem geïnspireerd om in 2016 deel te nemen aan het Leraar In Onderzoek-project aan het Nikhef. Met ingang van het schooljaar 2017-2018 zal hij

beginnen als docent Natuurkunde op het Cals College in Nieuwegein.

5.1 Samenvatting

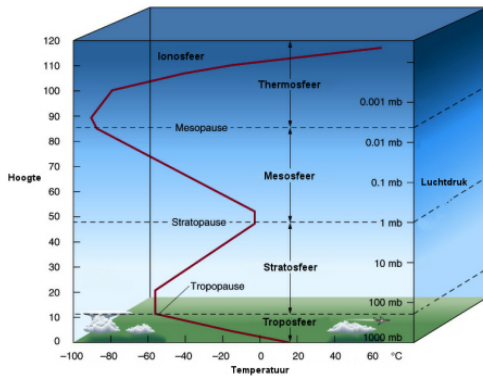
In dit onderzoek is gekeken naar de invloed van uitbarstingen op de zon op de metingen van de HiSPARC-detectoren. Uit de theorie blijkt dat deeltjes die vanuit de richting van de zon zich naar de aarde verplaatsen kunnen worden afgebogen als zij door een magnetisch veld lopen. Doordat zo'n uitbarsting het magnetisch veld tussen de zon en de aarde verstoort kan het deeltje daardoor de aardatmosfeer missen. Dit zorgt indirect voor een daling van het aantal op de aarde waargenomen deeltjes.

Eerst werd de data van de detectoren van het HiSPARC project in de periode rond een uitbarsting (coronal mass ejection) gecorrigeerd op de invloed van atmosferische druk en temperatuur. Vervolgens

werd de data vergeleken met de data van de OULU-neutronendetector. Binnen deze periode werd gekeken of er een significante afname in het aantal waargenomen deeltjes (Forbush Decrease) waarneembaar is. Dit is gedaan voor zes vergelijkbare uitbarstingen. Hieruit bleek dat de afname in de waargenomen deeltjes als gevolg van de uitbarsting op de zon erg klein is. De invloed van veranderende atmosferische druk blijkt veel groter te zijn. Het gevolg is dat er veel detectoren nodig zijn om de daling goed waar te kunnen nemen.

5.2 Inleiding

De kosmos is vergeven van hele kleine, zeer snel bewegende deeltjes. Fotonen, protonen, neutronen, elek-

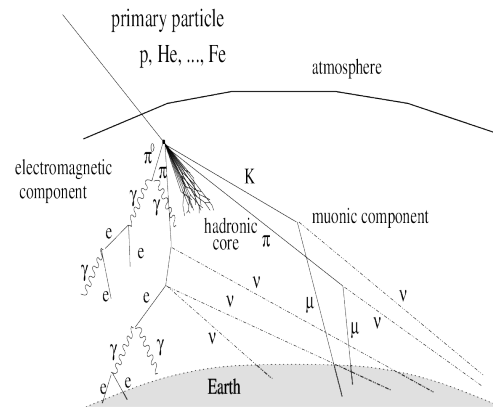


Figuur 5.2: Overzicht luchtdruk en temperatuur samenstelling van de atmosfeer. (Astronova.nl)

zijn maximum bereikt, op 900 g/cm^2 . De showers van minder hoog-energetische deeltjes bereiken hun maximum op kleinere waarden van X , dus grotere hoogte.

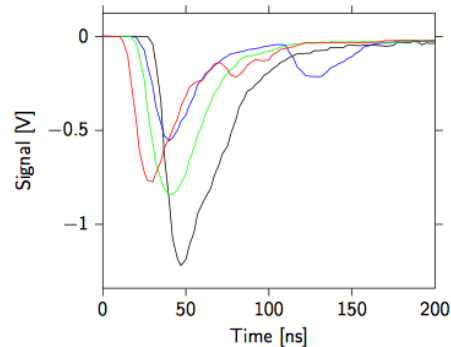
Rekening houdend met de massa en de energie die de deeltjes met zich mee dragen kan worden afgeleid dat vooral gevormde (zware) muonen en (veel lichtere) elektronen de aarde bereiken. Hierbij zullen de muonen, door hun grotere massa en grotere dracht, de meeste energie met zich mee dragen naar de detector. Deze deeltjes, zie afbeelding 5.3, kunnen, als ze in staat zijn om de aardkorst te bereiken, een puls veroorzaken in de detector. De grootte van de puls zal in grotere mate afhangen van de minder aanwezige, maar wel meer energie dragende muonen. Zowel de elektronen als muonen zijn minimum ionizing, wat betekent dat de lichtopbrengst niet of nauwelijks afhangt van de energie van het deeltje.

In de detectoren veroorzaakt zo'n showerdeeltje een lichtpuls welke door middel van een fotomultiplier wordt versterkt. De puls wordt geregistreerd wanneer hij een hoogte heeft onder de gestelde drempelwaarde (-30 mV voor 4-plaats-stations en -70 mV voor 2-plaats-stations). Een shower ontstaan uit een kosmisch deeltje, zorgt in alle platen van een detector nagenoeg tegelijk voor een puls. Uit een histogram van het aantal events tegen de waargenomen pulshoogte (of de waargenomen integraal van de puls), kan de MIP-piek (Minimal Ionising Particle) worden



Figuur 5.3: Schematische weergave van een air shower met gescheiden hadronische, muonische en elektromagnetische component (afkomstig van [14]).

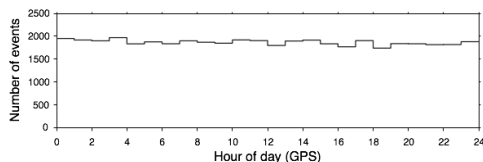
afgeleid. De MIP-piek ligt in de top van de grafiek, zie figuur 5.15.



Figuur 5.4: Één event gemeten door een station met vier detectoren, elke detector registreert een signaal (puls) die op een eigen tijdstip begint (Arrival Time) en een eigen pulshoogte heeft (Pulse Height).

Een detector kan bestaan uit 2 of 4 platen. Als in meerdere platen van een detector binnen een bereik van $1,5 \mu\text{s}$ een signaal wordt waargenomen, dan spreken we van een event (een waargenomen shower). In de data van HiSPARC wordt de flux weergegeven als het aantal events dat per uur wordt waargenomen, zie afbeelding 5.5.

Het Forbush Decrease (FD) is de daling in de flux gemeten door een detector welke wordt toegeschreven aan de invloed van een coronal-mass-ejection (CME).



Figuur 5.5: Event histogram van detector station 9 bepaald voor 27-01-2012 via data.hisparc.nl. De flux (het aantal events) staat hier per uur van de dag uitgezet.

Een CME is een uitbarsting van de zon waarbij een wolk aan deeltjes en verstoringen van het magnetische veld vanuit het oppervlak van de zon (de corona) de ruimte in wordt geslingerd. NASA heeft een uitgebreide lijst waarin de waargenomen CME's worden vastgelegd [15]. Als deze wolk aan deeltjes en magnetische velden een verstoring veroorzaakt aan het magnetische veld tussen de zon en de aarde kan dit leiden tot afbuiging van kosmische deeltjes die vanuit de richting van de zon richting de aarde bewegen. Deze kosmische deeltjes zullen de aardatmosfeer niet bereiken. Dit zorgt dat er door de detectoren op het aardoppervlak minder deeltjes worden waargenomen, oftewel een daling in de flux.

In het verleden is het FD al vaker aangetoond bij kosmische straling met een lagere energie. In neutronendetectors, die waarnemingen doen aan de neutronen die ontstaan in een shower, is gemiddeld op 1 tot 5 dagen na een CME een flinke daling (tot wel 20%) waar te nemen in de flux. Door hun intrinsieke levensduur en hun snelheid is de levensduur van muonen die ontstaan aan het begin van de shower groot genoeg om de aarde te bereiken. De grootte van de flux aan deeltjes die het aardoppervlak bereiken is sterk afhankelijk van de luchtdruk en in mindere mate ook van de temperatuur in de atmosfeer. Deze deeltjes zijn ontstaan door de botsing van kosmische deeltjes, vooral protonen met een hogere energie ($10^{15} - 10^{19}$ eV), met de atmosfeer. Hierbij moet gemeld worden dat we in dit onderzoek vooral kijken naar de afbuiging van deeltjes die afkomstig zijn uit de richting

van de zon en die in de interplanetaire ruimte al dan niet worden afgebogen. De verwachting is dat deze sneller bewegende deeltjes minder worden afgebogen en het effect veel kleiner zal zijn dan bij de neutronen die ontstaan zijn in de zon of die ontstaan zijn in de shower van kosmische deeltjes met een lagere energie (tot 10^{15} eV).

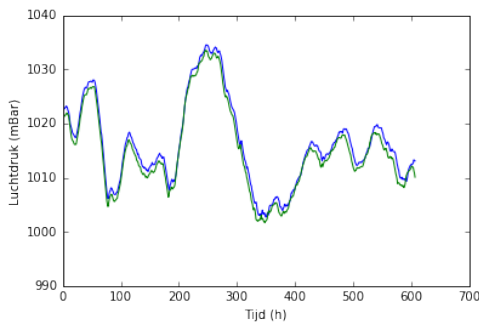
5.3 Methode

Eerst werd in de literatuur gezocht naar CME's die FD's hebben veroorzaakt in andere meetopstellingen. Dit werd gedaan om vergelijkingsmateriaal te hebben. Vervolgens werden de eigenschappen van het CME opgezocht in de LASCO-bibliotheek van NASA [15]. Hierin staan onder andere de hoek waarin de CME is uitgestoten uit de zon en ook de snelheid en massa van de CME zijn hierin opgenomen. Daarnaast staat vermeld of het om een Halo-effect gaat, wat inhoudt dat de CME zich over de aarde heen beweegt. Met behulp van een pythonscript werden vanuit de HiSPARC-data-site de losse pulshoogtes en pulsintegralen gedownload van de stations die binnen het gekozen tijdsframe aan stonden. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de sapphire API van HiSPARC [16]. Op deze data vond een correctie plaats voor de druk en temperatuur. Vervolgens werd de gemiddelde flux per detector berekend door de totale som van de flux te delen door het aantal detectoren dat aan stond. Die uitslag werd vergeleken met de uitslag van de OULU-neutronendetector [17] binnen hetzelfde tijdsframe. Deze detector meet vooral neutronen die zijn ontstaan in de detector zelf doordat secundaire deeltjes uit de shower neutronen vrijmaken in de detector. Deze langzame MeV-neutronen worden door de moderator in de detector afgeremd tot thermische energieën waarna ongeveer 6% wordt geteld door de proportional counter, een gasionisatie detector [18]. De detector meet maar heel weinig neutronen die direct van de zon afkomstig zijn.

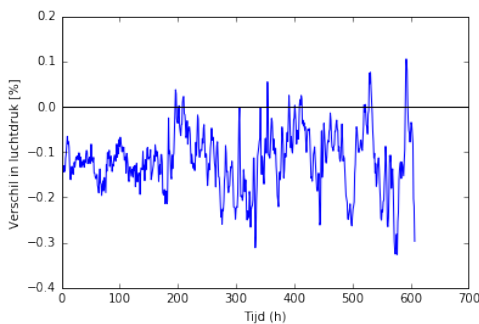
5.4 Correctie op druk en temperatuur

Om klimaat-invloed te verkleinen werd vervolgens gecorrigeerd op de invloed van luchtdruk en temperatuur. Deze twee grootheden hebben invloed op de

atmosferische diepte en dus ook op de hoeveelheid deeltjes die de detectoren bereiken. Omdat de detectoren niet allemaal over een weerstation beschikken, welke ook aan stond tijdens de periode, werd de data van het KNMI [19] voor de regio Schiphol gebruikt. Om te verifiëren of dit goed overeenkomt met de druk en temperatuur bij de meetinstrumenten werd de data van detector 501 vergeleken met de data van het KNMI, zie afbeeldingen 5.6 en 5.7. Met een maximaal



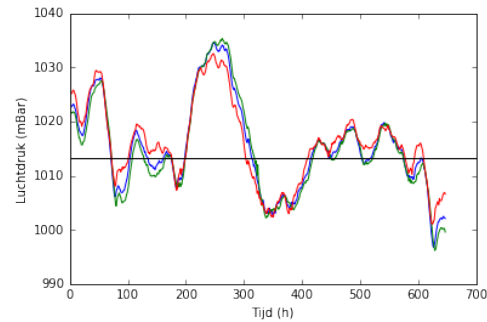
Figuur 5.6: De luchtdruk (mBar) gemeten door het weerstation van station 501 (blauw) en de luchtdruk gemeten door het KNMI op Schiphol (groen) over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011).



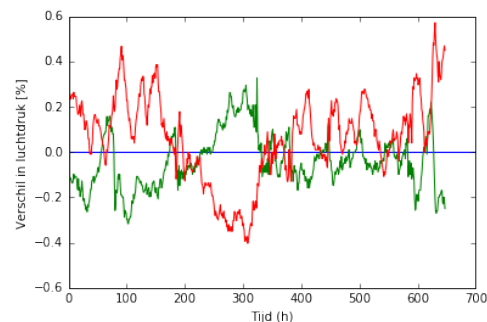
Figuur 5.7: Het relatieve verschil in luchtdruk (%) gemeten door het weerstation van station 501 ten opzichte van de luchtdruk gemeten door het KNMI op Schiphol over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011.

verschil van $-0,3\%$ blijkt dit goed overeen te komen. Daarnaast is onderzocht of de verdeling over Neder-

land als uniform mag worden gezien. De meetwaarden van drie KNMI-meetstations verspreid over Nederland (Schiphol, Leeuwarden, en Maastricht) werden tegen elkaar uitgezet, zie afbeeldingen 5.8 en 5.9.



Figuur 5.8: De luchtdruk gemeten door het KNMI van station Schiphol (blauw), Leeuwarden (groen) en Maastricht (rood) over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011.



Figuur 5.9: Het relatieve verschil in luchtdruk (%) gemeten door het weerstation van het KNMI in Leeuwarden (groen) en Maastricht (rood) ten opzichte van de luchtdruk gemeten Schiphol over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011).

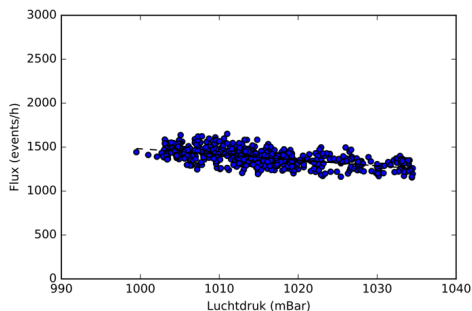
Hieruit bleek de maximale afwijking van de stations ten opzichte van de meetwaarde bij Schiphol $0,6\%$ te bedragen.

Om de data te normaliseren werd per detector een normaliseringsfactor berekend [20]. Hiertoe werd de flux uitgezet tegen de druk. De helling van de lineaire

fit geeft dan de normalisatiefactor per mBar. Vervolgens werd de afwijking van de standaarddruk ($p_0 = 1013$ mBar) vermenigvuldigd met de normalisatiefactor. Deze uiteindelijke correctiefactor (in events per uur per mBar) werd van de flux afgehaald om de gecorrigeerde flux te verkrijgen.

$$\Phi_{\text{corr}} = \Phi_{\text{obs}} - C(p - p_0), \quad (5.2)$$

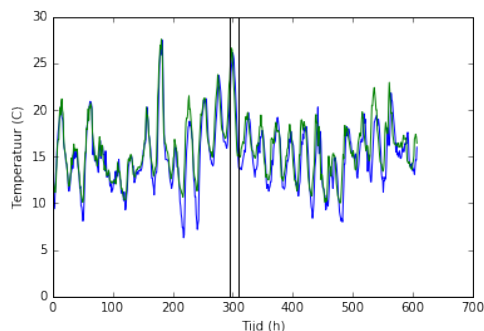
waarin p de luchtdruk is, Φ_{corr} de gecorrigeerde flux, en Φ_{obs} de gemeten flux. C is de correctie factor en p_0 de standaard luchtdruk als boven.



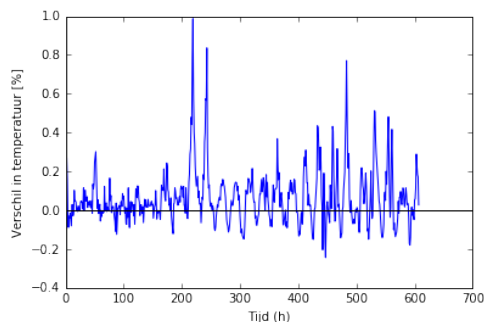
Figuur 5.10: De flux van station 5 uitgezet tegen de bijhorende luchtdruk. Uit de lineaire fit wordt de correctiefactor (-6,4 events/(h·mBar)) bepaald.

Voor de correctie op de temperatuur werd ook een analyse gemaakt van de temperatuur op Schiphol ten opzichte van station 501. Hier kwam een verschil uit van maximaal 1%. Maar omdat de invloed van de temperatuur op de flux vele malen kleiner is dan de invloed van de luchtdruk, kan dit worden gezien als een kleine variatie, zie afbeeldingen 5.11 en 5.12.

Vervolgens werd per detector gecorrigeerd op temperatuur door de afwijking van de gemiddelde temperatuur over het bereik van 26 dagen te bepalen en deze te vermenigvuldigen met de correctiefactor uit de lineaire fit. Deze uiteindelijke correctiefactor werd van de flux afgehaald. Dit levert de voor druk en temperatuur gecorrigeerde grafiek op van de flux tegen de tijd.



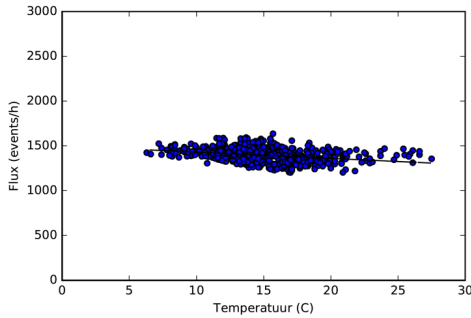
Figuur 5.11: De temperatuur gemeten door het weerstation van station 501 (groen) en gemeten door het KNMI op station Schiphol (blauw) over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011. Er is hier een duidelijk 24 uur-ritme zichtbaar.



Figuur 5.12: Het relatieve verschil in temperatuur (%) gemeten door het weerstation van station 501 en het KNMI station op Schiphol over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011. Er is hier een duidelijk 24 uur-ritme zichtbaar.

5.5 Correctie op Zenithoek

Om de stand van de zon ten opzichte van de detectoren mee te nemen werd een correctie op de tijd uitgevoerd. Zo werd de zenithhoek waarover gemeten wordt verkleind. Deze dient tussen 0° en 45° te zijn. Om te zorgen dat alleen de metingen van overdag, als de detectoren richting de zon staan gericht, mee werden genomen werd gekeken naar de zenithhoek waaronder de zon invalt. Met behulp van de online-



Figuur 5.13: De flux van station 5 voor de meting over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011, uitgezet tegen de bijbehorende temperatuur in °C. Uit de lineaire fit wordt de correctiefactor voor de temperatuur ($-7,0 \text{ events}/(\text{h}\cdot^\circ\text{C})$) bepaald.

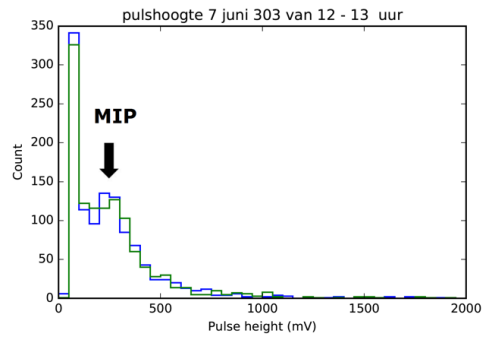
database NOAA solar calculator [21] en de coördinaten van Amsterdam is afgeleid dat het tijdsframe binnen de vier weken rond de gekozen datum overdag ligt tussen 10:00 uur en 15:00 uur. Op die tijden staat de zon binnen de 45° marge.

Coördinaten: N52°22'0" E4°54'0"
 Time Offset: 1
 Daylight savings time: Yes
 Time: 24 h

Om een contrast aan te kunnen brengen tussen wanneer de detectoren richting de zon gericht staan en wanneer niet werd een tweede tijdsframe gekozen tussen 22:00 uur en 03:00 uur.

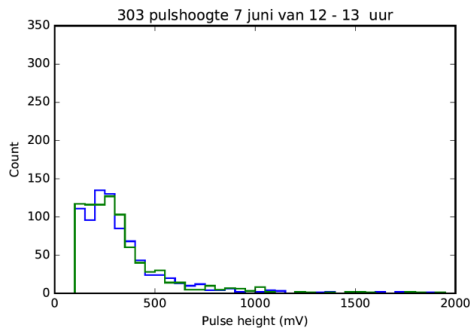
5.6 Resultaten

Deze resultaten laten een grote flux zien op 8 juni 2011. De hoge waarde voor de flux wordt alleen 's nachts waargenomen. Na onderzoek bleek deze hoge waarde vooral veroorzaakt door een extreem groot aantal getelde events met een kleine pulshoogte (onder de 100 mV) ten opzichte van de Minimal Ionising Particle (MIP)-piek (zie figuur 5.15). Hierdoor werden events geteld die geen events bleken te zijn. Om dit te voorkomen zijn alle afzonderlijke MIP's gestript van hun bereik voor de 100 mV. Hierdoor werd de te ho-



Figuur 5.15: Histogram van de pulshoogte tegen het aantal events. In de top van de grafiek is de MIP-piek zichtbaar.

ge telling veroorzaakt door pulsen met een pulshoogte onder de triggers van 30 mV en 70 mV weggefilterd en ontstond een beter beeld van het daadwerkelijke aantal events. In de metingen hierna is steeds uitgegaan van deze aanpassing op de flux. De gemeten pulsen met een pulshoogte onder de 100 mV werden steeds weggefilterd, zie afbeelding 5.16.

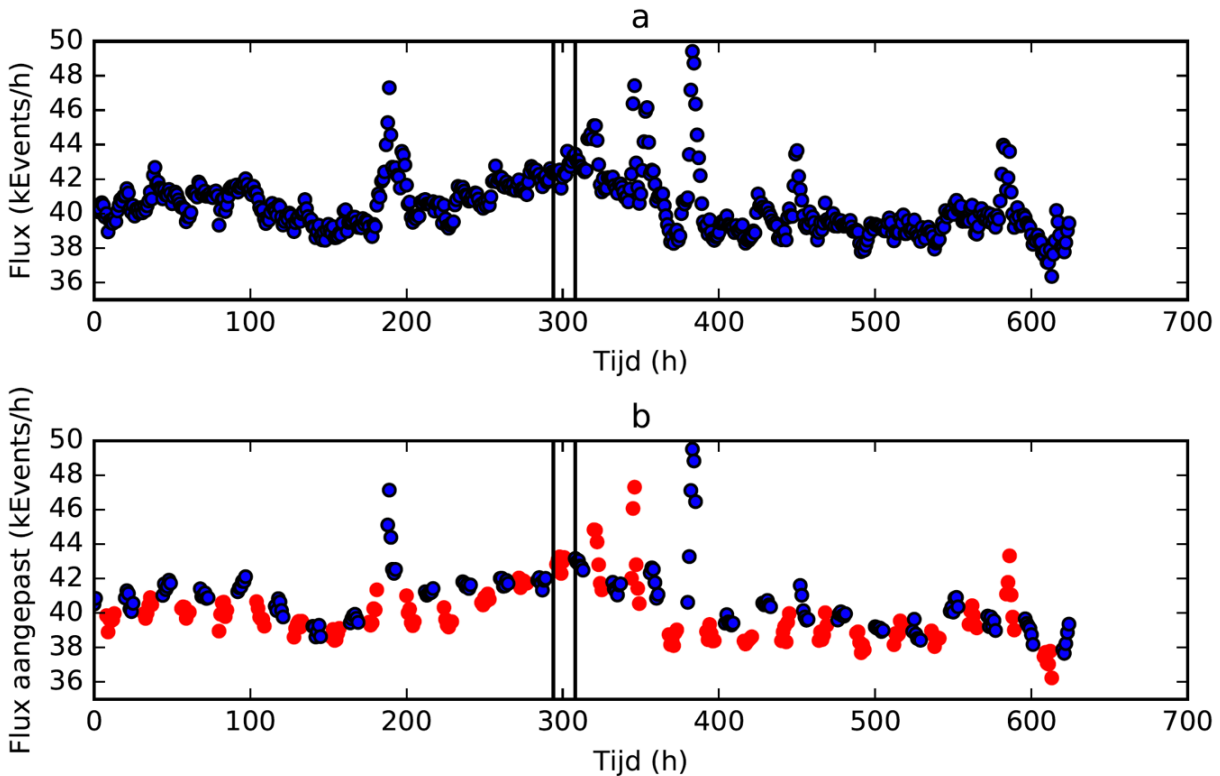


Figuur 5.16: Histogram van de pulshoogte boven de 100 mV tegen het aantal events.

Om een nog beter beeld te krijgen is de data vergeleken met de detectiedata van de OULU-neutrondetectoren in Finland [17]. De meetwaarde van deze neutronendetector wordt steeds in het rood weergegeven. Deze detector meet secundaire showerdeeltjes doordat deze deeltjes neutronen vrijmaken in de detector zelf waarna deze door de moderator

Maand	Dag	Jaar	Tijd (uu:mm:ss)	Solar elevation (°)	Zenit hoek ⁸ (°)
Mei	23	2011	10:00:00	48.73	41.27
Mei	23	2011	15:00:00	48.11	41.89
Juni	17	2011	10:00:00	50.61	39.39
Juni	17	2011	15:00:00	45.28	44.72

Tabel 5.1: Gegevens uit de NOAA solar calculator.

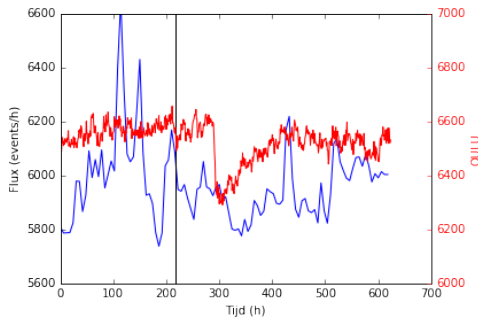


Figuur 5.14: Scatterplots van de som van de gemeten flux over de periode 23-05-2011 tot 18-06-2011 met een drukaanpassing van $-13,5$ mBar per count en een temperatuuraanpassing van $-8,8$ graden/event. a. Scatterplot van de som van alle flux-waarden gemeten door de detectoren die in de periode continue gemeten hebben in (x1000 events/h). b. Scatterplot van de som van alle fluxwaarden gemeten tussen 10-15 (rood) en tussen 22-03 (blauw).

worden afgeremd tot thermische energieën. In deze detector worden vooral secundaire protonen waargenomen.

De scatter bleek nog steeds te groot. Om het FD-

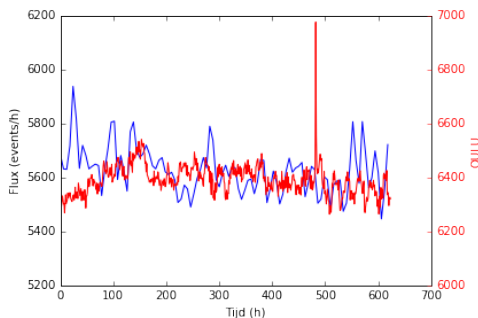
effect beter zichtbaar te maken werd besloten in bins van 6 uur te bundelen. Dit zorgt dat je een meer doorlopende meting hebt, maakt het effect groter en brengt een eventuele daling beter in beeld. Daarnaast



Figuur 5.17: HisPARC en OULU data voor de CME van 15 februari 2011, de fluxgrootte is vergelijkbaar, maar de tijdbasis van de bin is anders, 1 uur bij OULU en 6 uur bij HisPARC.

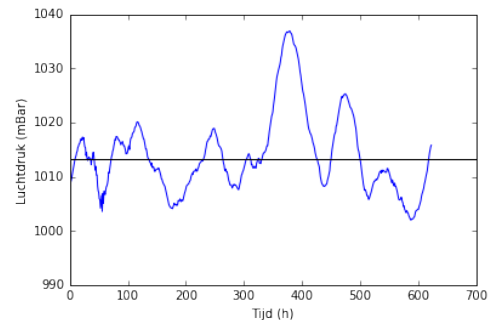
werd de gemiddelde flux berekend over alle detectoren die aan stonden, zie afbeelding 5.17.

Om na te kunnen gaan of de luchtdruk het effect van het FD teniet doet, werd een nulmeting uitgevoerd voor de periode 27 april 2012 tot 9 mei 2012. In deze periode vond geen grote FD plaats volgens de OULU database. Er is wel een duidelijke luchtdrukverandering die plaatsvindt bij 180 uur.



Figuur 5.18: Gemeten fluxgemiddelde van 45 stations gemeten over de periode 27-04-2012 tot 09-05-2012 in bins van 6 uur uitgezet naast de gemeten countrate per uur van de OULU detector in Finland.

Deze meting werd herhaald voor vijf verschillende CME's waarbij vanuit de literatuur een FD was waargenomen. De FD-grootte werd met behulp van een liniaal bepaald uit de grafiek en vervolgens vergele-



Figuur 5.19: Luchtdruk gemeten door het KNMI op Schiphol over de periode 27-04-2012 tot 09-05-2012.

ken met de literatuur.

Hieronder staan de grafieken van HisPARC en OULU van deze CME's ingedeeld zoals bij de nulmeting. Links de meetwaarden van HisPARC en OULU en rechts de bijhorende luchtdruk voor de periode.

5.7 Conclusie

Uit de geproduceerde grafieken kan worden opge- maakt dat er wel een effect van het FD waarneembaar is, maar tevens dat deze vaak overschaduw wordt door de invloed van de luchtdruk. Alleen wanneer een gemiddelde wordt genomen van veel detectoren is het effect zichtbaar geworden. Daarbij moet worden vermeld dat het hier gaat om een kleine meting (slechts 5 specifieke FD-gebeurtenissen binnen 5 jaar) van een specifieke CME met een Halo-effect. En dat het effect vaker niet dan wel is waargenomen.

Verder onderzoek is nodig naar de eigenschappen van de CME gekoppeld aan de waarneembare FD. Hierbij kan gekeken worden naar de oriëntatie van het magnetisch veld of naar niet halo-CME-events waarbij een FD waarneembaar is bij lagere energie-deeltjes. Ook is verder onderzoek mogelijk naar het verschil van FD op 2-plaats of 4-plaats detectoren. In dit onderzoek zijn deze steeds als één station gezien bij het middelen van de waargenomen deeltjes.

Datum	% fluxverandering per FD		
	OULU	EEE	HiSPARC
18 februari 2011	-4,5	-4,0 ²	Niet zichtbaar
4 juni 2011	–	–	-2,8
6 maart 2012	-12	-7,0 ³	-0,6
14 juni 2012	-3,2	–	0
7 november 2014	-2,8	-4,0 ⁴	-2,6
7 november 2015	-3,0	-2,8 ⁵	-3,0

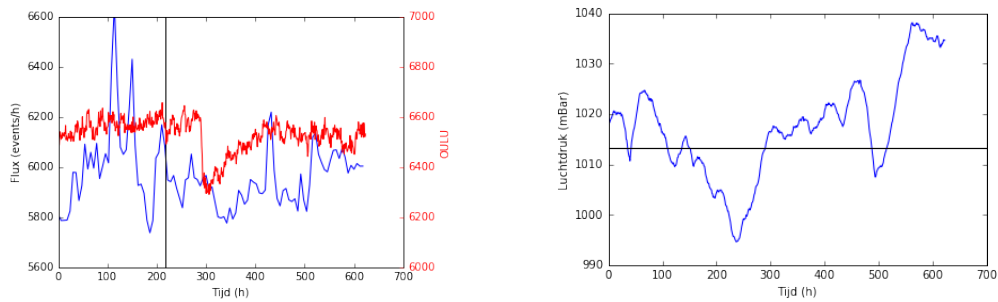
Tabel 5.2: De CME-gebeurtenissen die met HiSPARC bestudeerd zijn, vergeleken met de resultaten van twee andere experimenten.

² EEE detector in Altamura, ([22])

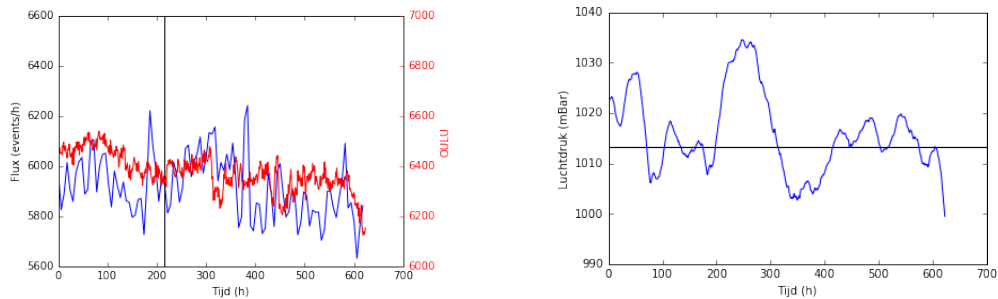
³ EEE detector in Altamura, ([23])

⁴ EEE detector in Altamura, ([23])

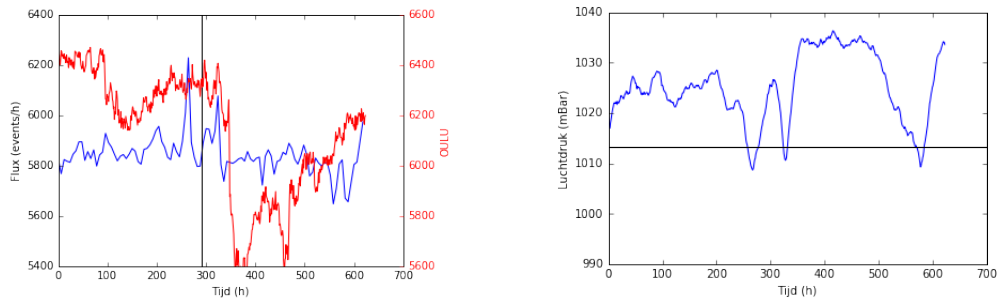
⁵ EEE detectoren BOLO-03 + BOLO-04 + LAQU-01 + SAVO-02 + TORI-03, ([24])



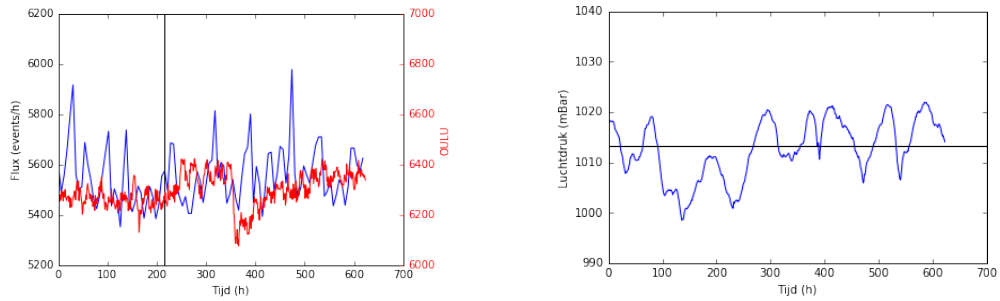
Figuur 5.20: Links: meetwaarden OULU-neutronendetector en HiSPARC gemiddelde van 31 stations voor de periode 6 februari 2011 tot 4 maart 2011. Rechts: de bijhorende luchtdruk op Schiphol.



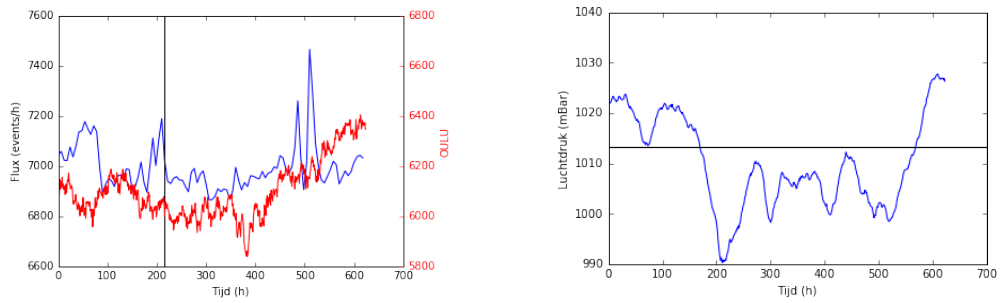
Figuur 5.21: Links: meetwaarden OULU-neutronendetector en HiSPARC gemiddelde van 25 stations voor de periode 23 mei 2011 tot 18 juni 2011. Rechts: de bijhorende luchtdruk op Schiphol.



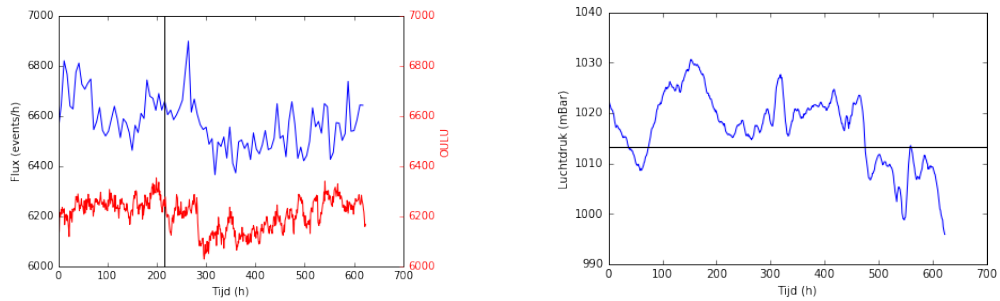
Figuur 5.22: Links: meetwaarden OULU-neutronendetector en HiSPARC gemiddelde van 42 stations voor de periode 23 februari 2012 tot 20 maart 2012. Rechts: de bijhorende luchtdruk op Schiphol.



Figuur 5.23: Links: meetwaarden OULU-neutronendetector en HiSPARC gemiddelde van 42 stations voor de periode 2 juni 2012 tot 28 juni 2012. Rechts: de bijhorende luchtdruk op Schiphol.



Figuur 5.24: Links: meetwaarden OULU-neutronendetector en HiSPARC gemiddelde van 44 stations voor de periode 26 oktober 2014 tot 21 november 2014. Rechts: de bijhorende luchtdruk op Schiphol.



Figuur 5.25: Links: Meetwaarden OULU-neutronendetector en HiSPARC gemiddelde van 51 stations voor de periode 26 oktober 2015 tot 21 november 2015. Rechts: de bijhorende luchtdruk op Schiphol.

6 Richtingreconstructie bij opstellingen van drie stations.

Nathalie van der Weiden



Nathalie van der Weiden is als eerstegraadsdocent Natuurkunde verbonden aan het Alberdingk Thijm College in Hilversum. Zij heeft aan de Vrije Universiteit Amsterdam in 2015 haar master Particle and Astroparticle Physics gehaald. Daarna heeft zij haar eerstegraadsbevoegdheid gehaald en is nu twee jaar werkzaam in het onderwijs. Het project Leraar in Onderzoek is een goede kans om naast het lesgeven ook onderzoek te kunnen doen.

6.1 Introductie

6.1.1 Kosmische straling en HiSPARC

De aarde wordt continu gebombardeerd met kosmische straling. Deze straling bestaat uit allerlei soorten primaire deeltjes, zoals protonen, elektronen of atoomkernen. Een extended air shower (EAS) ontstaat als een primair deeltje botst met een atoomkern in de atmosfeer. Door deze botsing ontstaan er nieuwe (hoogenergetische) deeltjes. Een deel van deze deeltjes zijn hadronen die weer snel vervallen in andere deeltjes en elektromagnetische straling. Deze deeltjes kunnen op hun beurt ook nieuwe (hoogenergetische) deeltjes maken door botsingen. Op deze manier ontstaat er een lawine van deeltjes, waarvan de laatste deeltjes, afhankelijk van de energie van het eerste deeltje en de hoogte van de eerste interactie, tot op het aardoppervlak kunnen worden gemeten.

De energie van de primaire deeltjes kan variëren van 10^{14} tot 10^{20} eV.

Onderzoeksgroepen die zich bezighouden met de detectie van EAS zijn onder andere KASCADE, AUGER en HiSPARC. HiSPARC is een Nederlands project waarbij onderzoekers samenwerken met middelbare scholen voor de analyse van kosmische straling. Scholen plaatsen detectoren op hun daken en docenten en scholieren maken, installeren en onderhouden de stations. Op deze manier worden leerlingen al vroeg betrokken bij wetenschappelijk onderzoek en kunnen over een groot oppervlak deeltjeslawines gedetecteerd worden.

Een HiSPARC detectiestation bestaat uit twee of vier detectoren. Wanneer een geladen deeltje de detector raakt, ontstaat er in de scintillatorplaten van de detector een lichtsignaal dat wordt geregistreerd met de aanwezige elektronica. Wanneer er in twee of meer

detectoren van een station een signaal wordt waargenomen, zal het signaal worden opgeslagen. Bij data van meerdere stations worden coïncidenties opgeslagen als het tijdsverschil tussen de detectie in de verschillende meetstations korter is dan $2,0 \mu\text{s}$.

Bij onderzoek naar kosmische straling is het belangrijk om te kunnen reconstrueren wat de oorspronkelijke richting van het primaire deeltje was. Voor de beschrijving van de positie van de deeltjeslawine wordt gebruik gemaakt van twee hoeken: de zenit (θ) en de azimut (ϕ). De zenithhoek is gedefinieerd als $\theta = 0^\circ$ recht boven de detector en $\theta = 90^\circ$ op de horizon. De azimut is gedefinieerd als $\phi = 0^\circ$ richting het oosten, $\phi = 90^\circ$ richting het noorden, $\phi = 180^\circ$, richting het westen en $\phi = 270^\circ$ richting het zuiden. Omdat de hemel een isotrope verdeling heeft als emitter, is de verwachting dat uit elke windrichting evenveel deeltjeslawines aankomen. per tijdseenheid. De verdeling voor de azimut zal dan ook vlak zijn, wanneer het aantal gemeten lawines wordt uitgezet tegen de hoek.

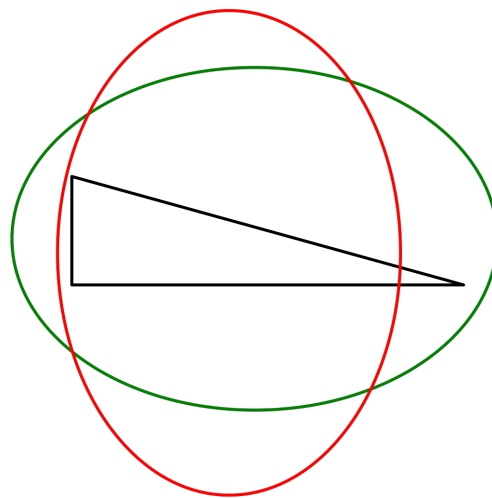
6.1.2 Onderzoeksvragen en verwachting

Zoals beschreven, is de verwachting dat de azimutverdeling vlak is wanneer het aantal gemeten lawines wordt uitgezet tegen de azimut. Dit geldt alleen als de meetopstelling geen voorkeursrichting heeft. In eerder onderzoek is gekeken naar het effect van de vorm van de driehoek op de richtingreconstructie [25]. Hieruit is gebleken dat de acceptatie van de azimut afhankelijk is van de vorm van de driehoek waarin de stations staan opgesteld. Bij een gelijkzijdige driehoek is de acceptatie van de azimut voor alle richtingen gelijk, terwijl onregelmatige driehoeken een voorkeursrichting hebben. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de lawines die over de lange as van de driehoek bewegen een grotere kans hebben om gedetecteerd te worden dan lawines die over de korte as van de driehoek bewegen.

Deze verwachting is gebaseerd op de vorm van de lawines. De aanname is dat als een lawine ontstaat, de vorm van de lawine in de richting loodrecht op het bewegingsvlak een cirkel is. Als de lawine nu onder een bepaalde hoek met de zenit op het aardoppervlak terecht komt, wordt de vorm van de lawine uitgerekt

tot een ellips. Als de lawine nu aankomt over de lange as van de driehoek valt dit samen met de lange as van de ellips en is de kans groot dat alle drie de stations de lawine detecteren. Als de lawine aankomt over de korte as van de driehoek, vallen de korte as van de driehoek en de lange as van de ellips samen. Dit vergroot de kans dat een station de lawine niet detecteert (zie ook figuur 6.1).

Bij een eerste analyse van de azimutverdeling voor een gelijkzijdige driehoek en een onregelmatige driehoek blijkt dit echter niet de verklaring te zijn. Daarom is het doel van dit onderzoek om een verklaring te vinden voor de verdeling van de azimut.



Figuur 6.1: De shower die over de lange as van de driehoek aankomt, raakt alle drie de stations (groene ellips), terwijl de shower die over de korte as aankomt een van de drie stations mist (rode ellips).

6.2 Methode

6.2.1 Opbouw van de stations in de driehoek

Om een goede richtingreconstructie te kunnen uitvoeren, zijn minstens drie detectoren nodig. Dit kan in een vier-plaatsstation waardoor er maar één station nodig is voor een richtingreconstructie. Veel scholen hebben echter een twee-plaatsstation op het dak staan. Door drie stations met twee detectoren in een

driehoek op te stellen is het toch mogelijk om een richtingreconstructie uit te voeren.

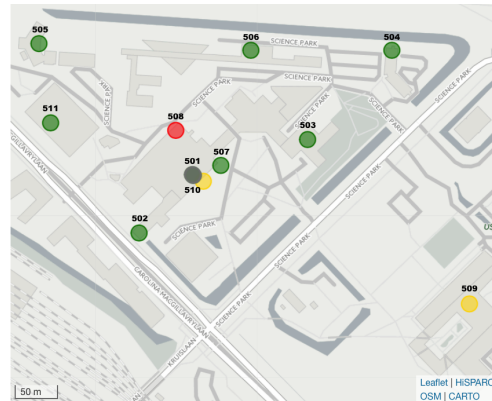
Bij de opstelling van de drie stations in een driehoek is de vorm van de driehoek van invloed op de reconstructies. Bij data van meerdere stations worden coïncidenties opgeslagen. Deze coïncidenties worden opgeslagen als het tijdsverschil tussen de detectie in de verschillende meetstations korter is dan $2,0 \mu\text{s}$. Driehoeken waarbij de onderlinge afstand tussen de stations kleiner is dan 1500 m zijn over het algemeen geschikt voor richtingreconstructie. Deze afstand is gekozen, omdat de kans op coïncidenties bij afstanden groter dan 1500 m kleiner is dan de kans op een toevallige coïncidentie.

Door de instelling van de stations zijn er heel weinig toevallige coïncidenties, waardoor aangenomen kan worden dat de waargenomen deeltjes binnen deze $2,0 \mu\text{s}$ tot dezelfde deeltjeslawine behoren. De tijdsverschillen tussen de stations geeft informatie over de richting waaruit het front van de deeltjeslawine op de stations valt. Om de richting van de deeltjeslawine te reconstrueren is daarnaast nog informatie over de positie van de stations ten opzichte van elkaar nodig. Als de opstelling van de stations een gelijkzijdige driehoek vormt, zal vanuit alle richtingen ($0 - 360^\circ$) evenveel deeltjeslawines gedetecteerd worden. De acceptatie is dan overall even groot. Een afwijkende driehoek zal meer deeltjeslawines detecteren die over de lange as bewegen. Dit komt doordat bij de deeltjeslawines die loodrecht op de lange as bewegen het kan zijn dat een van de buitenste stations de deeltjes uit de deeltjeslawine niet meet.

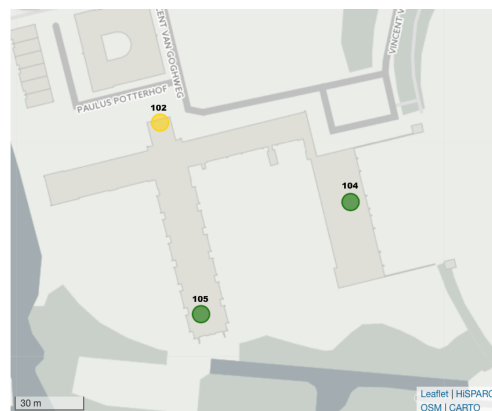
6.2.2 Dataselectie

Met behulp van het SAPPHiRE-pakket zijn er coïncidenties gedownload voor verschillende periodes en verschillende driehoeken. Er is gekeken naar tien verschillende stations in verschillende opstellingen, waarvan kan worden aangenomen dat ze goed gepositioneerd stonden. Zeven van de gekozen stations staan op het Science Park en drie stations staan op het Zaanlands Lyceum in Zaandam. In figuur 6.2 zijn de posities van de stations op het Science Park en in figuur 6.3 op het Zaanlands Lyceum weergegeven. Op basis van de uptime van de stations werden ver-

schillende periodes geselecteerd. Tabel 6.1 geeft een overzicht van de gebruikte driehoeken en periodes. Voor de driehoek op het Zaanlands Lyceum (station 102, 104 en 105) is gebruik gemaakt van de periodes 1 juli 2012 tot 20 september 2013 en 16 maart 2016 tot 27 november 2016. De periode tussen 20 september 2013 en 16 maart 2016 werd niet meegenomen, omdat in deze periode station 102 draaide op een ander besturingssysteem, waardoor de tijdsverschillen tussen de stations niet bepaald kan worden. Daarnaast wordt er als voorwaarde bij het downloaden



Figuur 6.2: Locaties van de verschillende detectoren op het Science Park.



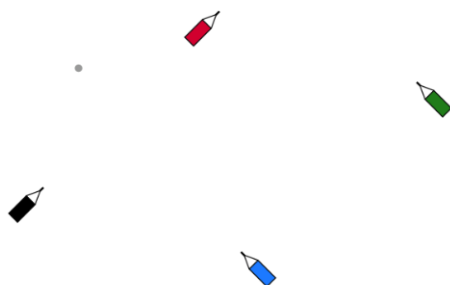
Figuur 6.3: Locaties van de verschillende detectoren op het Zaanlands Lyceum.

van de coïncidenties meegenomen dat alle stations in een gegeven driehoek een onderdeel moeten zijn van de coïncidentie.

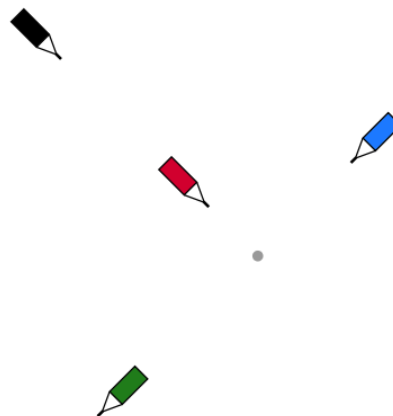
Stations in de driehoek	Periode gedownloade data
102-104-105	1 juli 2012 tot 20 september 2013
102-104-105	16 maart 2016 tot 27 november 2016
502-505-506	1 januari 2013 tot 31 december 2013
503-504-506	1 januari 2013 tot 31 december 2013
504-506-511	1 juni 2015 tot 30 november 2016
504-508-511	1 juni 2015 tot 30 november 2016
505-506-511	1 juni 2015 tot 30 november 2016
506-508-511	1 juni 2015 tot 30 november 2016

Tabel 6.1: De gebruikte driehoeken en geselecteerde periodes voor het downloaden van de data.

Verder is data geselecteerd voor twee stations. Hierbij is gekozen voor station 501 en station 503. Deze stations zijn gekozen vanwege de opstelling van de detectoren binnen het station, zie hiervoor figuren 6.4 en 6.5. Voor de selectie van de data is gebruik gemaakt van data uit januari 2015.



Figuur 6.4: Configuratie van de detectoren van station 501. Hierbij is detector 1 weergegeven in het zwart, detector 2 in het rood, detector 3 in het groen en detector 4 in het blauw.



Figuur 6.5: Configuratie van de detectoren van station 503. Hierbij is detector 1 weergegeven in het zwart, detector 2 in het rood, detector 3 in het groen en detector 4 in het blauw.

6.2.3 Richtingreconstructie

Voor een goede richtingreconstructie zijn minstens drie detectoren nodig, omdat er minstens twee onafhankelijke tijdverschillen nodig zijn om de richting van de lawine te reconstrueren. In figuur 6.6 is een situatie weergegeven van een vlak deeltjesfront, waarvan de normaal een zenithoek θ heeft met het (x, y) -vlak en een azimuthhoek ϕ met x -as⁹. Het deeltjesfront passeert eerst detector 1 en een bepaalde tijd later (Δt_1) detector 0. Op dezelfde manier kan ook het tijdverschil (Δt_2) tussen detector 0 en detector 2 bepaald worden. In ref. [26] zijn formules voor de zenit en azimuth afgeleid als functie van deze tijdverschillen en de posities van de detectoren ten opzichte van elkaar:

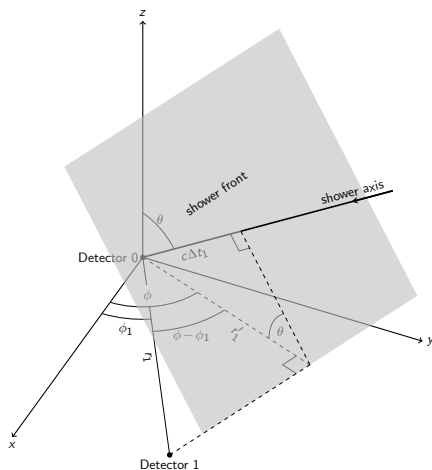
$$\tan \phi = \frac{r_1 \Delta t_2 \cos(\phi_1) - r_2 \Delta t_1 \cos(\phi_2)}{r_1 \Delta t_2 \sin(\phi_1) - r_2 \Delta t_1 \sin(\phi_2)} \quad (6.1)$$

$$\sin \theta = \frac{c \Delta t_1}{r_1 \cos(\phi - \phi_1)} \quad (6.2)$$

Hierbij is ϕ_1 de hoek tussen de x -as en de lijn die detector 0 en detector 1 verbindt en r_1 de afstand tussen

⁹De x -as wijst richting het oosten, zodat een hoek van 0° overeenkomt met de definitie voor de azimuth.

deze detectoren en is ϕ_2 de hoek tussen de x -as en de lijn die detector 0 en detector 2 verbindt en r_2 de afstand tussen deze detectoren. c is de lichtsnelheid.



Figuur 6.6: Driedimensionale weergave van het coördinatensysteem gebruikt voor de reconstructie van de richting van de deeltjeslawine [26].

6.2.4 CORSIKA simulaties

Door CORSIKA [27] worden de airshowers gesimuleerd met als resultaat gegevens over de deeltjes die de grond bereiken. Van deze deeltjes wordt het type en de impuls opgeslagen in een bestand. Bij de simulatie kunnen het type, de energie en invalshoek van het primaire deeltje worden gekozen. Binnen HiSPARC is een grote dataset met uitvoer van CORSIKA simulaties aanwezig. Tijdens dit onderzoek zijn CORSIKA simulaties gebruikt voor protonen als primair deeltje. Hierbij varieerde de energie van het primaire proton van 10^{14} tot 10^{20} eV, en werd de zenithoek en azimuthhoek willekeurig gekozen.

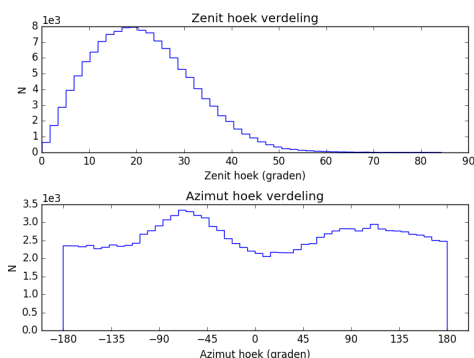
6.3 Resultaten

6.3.1 Resultaten Zaanlands Lyceum

De driehoek op het Zaanlands Lyceum is een bijna gelijkzijdige driehoek. In dit geval is dan ook de verwachting dat de azimuthverdeling vlak is. De eerste

resultaten van de reconstructie voor de driehoek op het Zaanlands Lyceum zijn te zien in figuur 6.7. In de figuur is duidelijk te zien dat de azimuthverdeling niet vlak is, maar dat er een voorkeursrichting lijkt te zijn voor showers die uit het noord-noord-westen of het zuid-zuid-oosten komen.

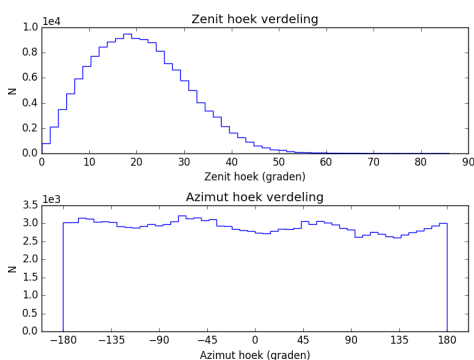
De verdeling zoals deze te zien is in figuur 6.7, wordt verwacht bij een niet-gelijkzijdige driehoek [25]. Uit controle van de gegevens die gebruikt worden voor de reconstructie van de richting van de shower, blijkt dat de afstanden tussen de stations duidt op een gelijkbenige driehoek in plaats van een gelijkzijdige driehoek. De afstanden tussen de stations zijn weergegeven in tabel 6.2. Daarnaast zijn in tabel 6.2 de afstanden te zien, zoals deze gebruikt zijn voor een simulatie, waarbij gekeken is naar het effect van de afstanden tussen de stations op de azimuthverdeling. Het blijkt dat de afstanden die volgen uit de API, verschillen van de afstanden die gemeten zijn met Google Maps. Voor het tweede geval zijn de resultaten van de reconstructie te zien in figuur 6.8. Hieruit volgt dat de verdeling voor de azimuth in dit geval wel voldoet aan de verwachtingen. Het is echter nog niet vastgesteld dat de met Google Maps gemeten afstanden kloppen. Om een uitspraak te kunnen doen welke afstanden juist zijn, zal dit nagemeten moeten worden. Uit de resultaten blijkt echter wel dat de azimuthverdeling zeer gevoelig is voor de positie van de stations. Bij een variatie van de positie van de stations van maximaal 8 meter blijkt dat de azimuthverdeling zeer sterk verandert. Hierbij moet worden opgemerkt dat de vorm van de driehoek ongeveer gelijk is. De driehoek gemeten met Google Maps is echter wel groter.



Figuur 6.7: De zenit en azimut verdeling voor de drie station (102, 104 en 105) op het Zaanlands Lyceum. De plots zijn gemaakt met data uit 2012, 2013 en 2016.

Stations	Afstand (m) volgens API	Afstand (m) volgens Google Maps
102-104	91,29	93,49
102-105	87,98	95,48
104-105	80,97	85,28

Tabel 6.2: De afstanden tussen de stations 102, 104 en 105 op het Zaanlands Lyceum, in de tweede kolom de afstanden die volgen uit de API en in de derde kolom de afstanden die volgen uit het opmeten van de afstanden met Google Maps.



Figuur 6.8: De zenit en azimut verdeling voor de drie stations (102, 104 en 105) op het Zaanlands Lyceum. De plots zijn gemaakt met data uit 2012, 2013 en 2016. De afstanden tussen de stations zijn veranderd naar de afstanden zoals gemeten met Google Maps (zie tabel 6.2).

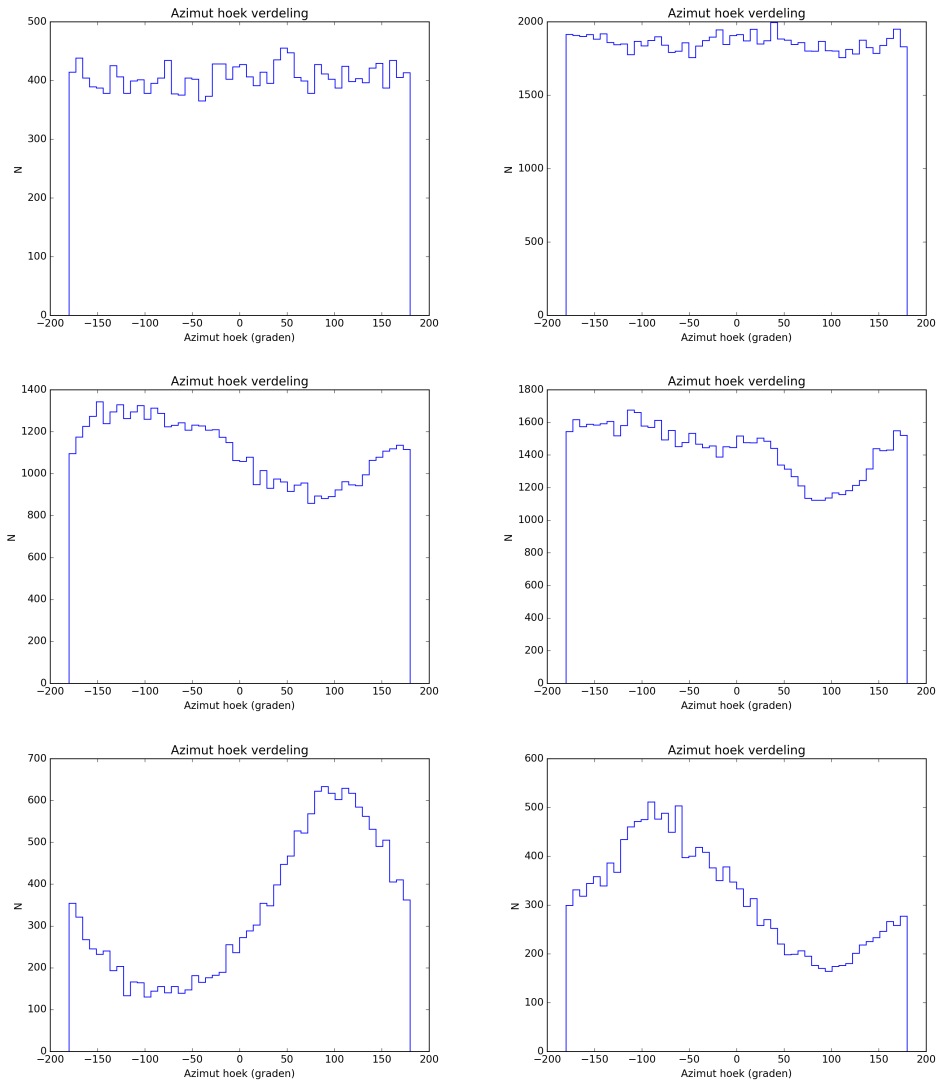
Meetstations	Vorm van de driehoek	Afstanden
502-505-506	Gelijkzijdig	d(502-505)=247 m d(505-506)=244 m d(502-506)=248 m
503-504-506	Gelijkzijdig	d(503-504)=142 m d(504-506)=164 m d(503-506)=123 m
505-506-511	Gelijkbenig	d(505-506)=244 m d(506-511)=245 m d(505-511)= 92 m
506-508-511	Gelijkbenig	d(506-508)=127 m d(508-511)=146 m d(506-511)=245 m
504-506-511	-	d(504-506)=164 m d(506-511)=245 m d(504-511)=403 m
504-508-511	-	d(504-508)=267 m d(508-511)=146 m d(504-511)=403 m

Tabel 6.3: De gebruikte driehoeken voor dit onderzoek uit het Science Park cluster. De laatste kolom bevat de afstanden tussen de drie stations.

6.3.2 Resultaten Science Park

Het Science Park cluster bestaat uit 11 stations. De stations staan allemaal binnen een afstand van maximaal 600 m van elkaar. Hierdoor is het mogelijk om verschillende driehoeken van stations te selecteren om zo het effect van de vorm van de driehoek te onderzoeken. Voor dit onderzoek zijn verschillende soorten driehoeken gemaakt, deze driehoeken zijn weergegeven in tabel 6.3.

Voor de azimut verdeling is de verwachting dat er een voorkeursrichting is voor deeltjes die over de lange as van de in een driehoek opgestelde stations aankomen. Dit betekent dus dat er voor een gelijkzijdige driehoek geen voorkeursrichting is, er is immers geen lange as. In figuur 6.9a en 6.9b is dit ook terug te zien. De azimut verdeling is vlak, wat betekent dat er geen voorkeur is voor deeltjes uit een bepaalde richting. Figuur 6.9d tot en met 6.9f verschillen echter wel van de verwachting, hoewel er een duidelijke voorkeur te



Figuur 6.9: Resultaten voor de gereconstrueerde azimut verdeling voor verschillende combinaties van stations. De gelijkzijdige driehoeken: boven links 502-505-506 en rechts 503-504-506, de gelijkbenige driehoeken: midden links 505-506-511 en rechts 506-508-511, en de overige driehoeken: onder links 504-506-511 en rechts 504-508-511.

zien is voor deeltjes die uit een bepaalde richting komen. De verwachting voor een driehoek met een lange as, zoals de gelijkbenige driehoeken in dit onderzoek, is de verwachting dat deeltjes die over de lange as van de driehoek bewegen, eerder tot een coïncidentie leiden dan deeltjes die over de korte as bewegen, omdat de kans dat de drie stations geraakt worden in het eerste geval groter is. De verwachte azimut verdeling is dan ook een sinus met een periode van π . Dit is niet terug te zien in 6.9d tot en met 6.9f.

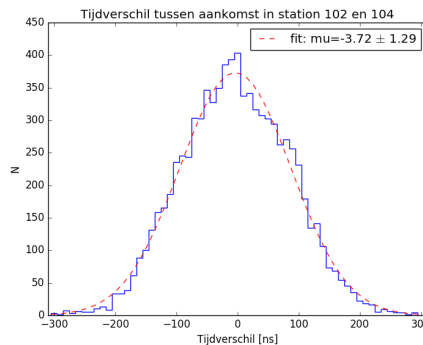
Drie mogelijke verklaringen voor deze resultaten zijn tijdens dit onderzoek onderzocht. De eerste mogelijke verklaring is dat de berekening van de tijdverschillen tussen de stations niet goed ging. Om een reconstructie uit te kunnen voeren waarbij drie stations betrokken zijn, is het van belang dat het moment waarop een deeltje gedetecteerd wordt goed geregistreerd wordt. Omdat elk station zijn eigen sc gps-tijd heeft, wordt hiervoor gecorrigeerd door het toevoegen van een timing-offset. Als hiervoor niet goed wordt gecorrigeerd, vindt het reconstructie-algoritme mogelijk verkeerde waarden voor de azimut. Om dit te onderzoeken is er gekeken naar de tijdverschillen tussen de stations en de bepaling van de timing-offsets. De tweede mogelijke verklaring is dat het reconstructie-algoritme zelf de verkeerde azimut reconstrueert. Om deze verklaring te onderzoeken zijn er verschillende reconstructies gebruikt op de data en zijn de resultaten van deze reconstructies vergeleken. De derde mogelijke verklaring ligt bij het aardmagnetisch veld. Mogelijk zorgt het aardmagnetisch veld voor een afbuiging van deeltjes, waardoor de aanname dat deeltjes homogeen verdeeld op het aardoppervlak aankomen niet correct is.

Timing-offsets

Als een event wordt geregistreerd dan wordt de tijd vastgelegd. Elk station heeft zijn eigen sc gps-tijd, dus om een verschil in aankomsttijd te bepalen moet er rekening gehouden worden met de verschillende GPS-tijden van de stations. Om hiervoor te corrigeren worden de station timing-offsets bepaald en opgeslagen in de database.

Voor het bepalen van de station timing-offsets is voor

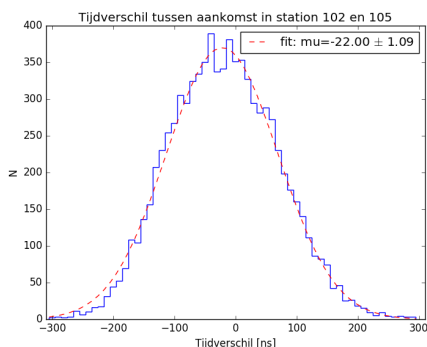
de driehoek 102-104-105 het verschil in aankomsttijd bepaald voor paren van stations. De tijdverschillen zijn normaal verdeeld. Het gemiddelde van de normale verdeling zou na correctie rond nul moeten liggen. Voor correctie is de station timing-offset gelijk aan het gemiddelde van de normale verdeling. In figuur 6.10 en 6.11 zijn de tijdverschillen te zien tussen de stations 102, 104 en 105. Zoals te zien in deze figuren zijn de tijdverschillen normaal verdeeld en is het gemiddelde ongelijk aan nul. Dit betekent dat de GPStijden van de stations verschillen. Als de resultaten van de fit aan de tijdverschillen vergeleken worden met de opgeslagen tijdverschillen, blijken deze hetzelfde te zijn. Bij het bepalen van de tijdverschillen op twee verschillende manieren komen de resultaten overeen, waardoor dus aangenomen kan worden dat de station timing-offsets correct bepaald zijn en dus geen mogelijke verklaring voor de gevonden resultaten van de verschillende driehoeken is.



Figuur 6.10: Resultaten voor de bepaling van de tijdverschillen tussen de stations: 102-104.

Reconstructie-algoritme

De huidige reconstructie-algoritmes maken gebruik van de timing-offsets van de stations. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen drie situaties: direct, fit en curved. Het direct-algoritme wordt gebruikt als er precies drie tijden zijn. Bij een reconstructie waarbij drie stations meedoen, zal dit algoritme altijd gebruikt worden als er voor de eerste keer een reconstructie op de data wordt uitgevoerd. Dit komt



Figuur 6.11: Resultaten voor de bepaling van de tijdsverschillen tussen de stations: 102-105.

omdat van elke detectie in een station alleen de eerste aankomsttijd wordt meegenomen. Bij coïncidenties tussen drie stations zijn er dus altijd precies drie tijden. Het fit-algoritme wordt gebruikt als er meer dan drie tijden zijn. In de praktijk betekent dit dat het fit-algoritme alleen gebruikt wordt als er meer dan drie stations worden meegenomen in een coïncidentie. Tot slot wordt het curved-algoritme gebruikt als er drie of meer tijden zijn én als de positie van de core bekend is. Hierdoor kan dit algoritme pas gebruikt worden als op de data al eerder een reconstructie gedraaid is. Het curved-algoritme neemt bij de reconstructie mee dat het showerfront niet plat is, maar gebogen. Deze drie huidige algoritmes zijn regressiealgoritmes. Het is ook mogelijk om een algoritme te gebruiken waarbij er gefit wordt. Om te onderzoeken wat de invloed is van het algoritme op de azimuth verdeling is er ook een reconstructie gedaan met het fit-algoritme. Er zijn echter geen grote verschillen gevonden bij de azimuth verdelingen bij het gebruik van de verschillende algoritmes. Dus ook het reconstructie-algoritme is op dit moment geen verklaring voor de gevonden azimuth verdeling.

Aardmagnetisch veld

Door het aardmagnetisch veld zou het kunnen zijn dat de deeltjes niet homogeen verdeeld op de aarde terecht komen. Om dit te testen is berekend hoe ver muonen met een energie van 1 GeV worden afgebogen

in het aardmagnetisch veld. Voor een deeltje in een magneetveld geldt:

$$q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (6.3)$$

Met de aanname dat het magneetveld en de bewegingsrichting van het deeltje loodrecht op elkaar staan, kan de straal van de baan van het deeltje beschreven worden als:

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q} \quad (6.4)$$

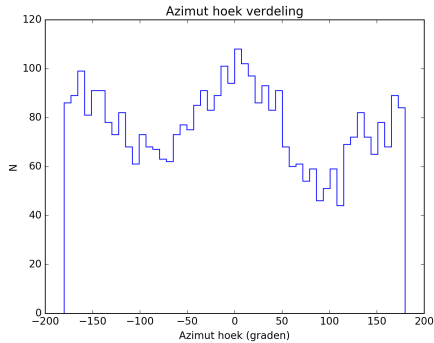
Op een hoogte van 30 km (de afstand tot het aardoppervlak waarbij de eerste interacties met de atmosfeer plaatsvinden) geldt voor de straal: $r \approx 5 \cdot 10^4 \text{m}$. Dit betekent dat de deeltjes over een afstand van 30 km in totaal ongeveer 16° afbuigen. Dit komt neer op een maximale verschuiving van de azimuthhoek en van de zenithhoek over ongeveer 6 graden. Hierdoor ontstaat dus wel een verschuiving in de azimuthverdeling, maar niet de verschuiving van 90 graden die te zien is in de resultaten.

6.3.3 Resultaten CORSIKA simulatie Science Park

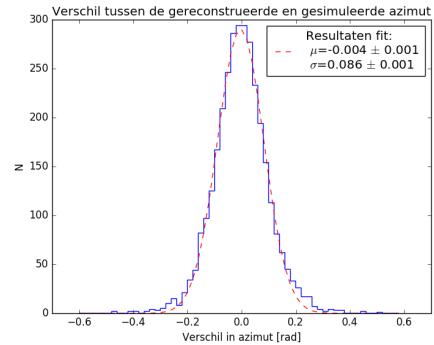
Simulaties zijn gedaan voor verschillende driehoeken op het Science Park en voor enkele stations.

Simulatie van een driehoek van stations

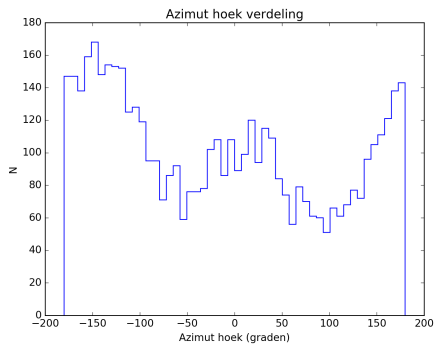
Voor de simulatie is gekeken naar twee verschillende driehoeken: 505-506-511 en 506-508-511¹⁰. De resultaten voor deze simulatie zijn te zien in de figuren 6.12 en 6.13. Deze driehoeken zijn geselecteerd, omdat de resultaten van de data bij deze driehoeken niet verklaarbaar zijn. Zoals te zien is in deze figuren komen de resultaten van des simulatie niet overeen met de resultaten van de data (zie 6.9c en 6.9d). Hoewel in de simulatie in beide gevallen twee pieken te zien zijn, corresponderen deze pieken niet met de lange as van de driehoek. Ten opzichte van de lange as van de driehoek zijn de pieken in beide figuren ongeveer 25° gedraaid. De figuren 6.14 en 6.15 laten zien dat het verschil tussen de gesimuleerde en gereconstru-



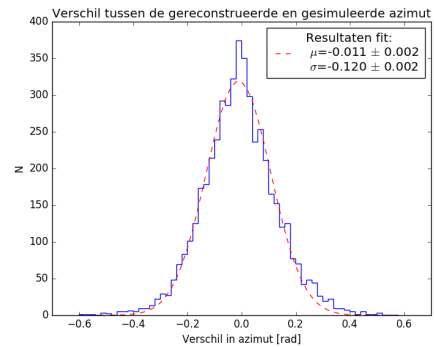
Figuur 6.12: Resultaten voor de gereconstrueerde azimut verdelings van de simulatie voor de stations: 505-506-511.



Figuur 6.14: Resultaten voor het verschil tussen de gereconstrueerde azimut en de echte waarde van de azimut voor de stations: 505-506-511.



Figuur 6.13: Resultaten voor de gereconstrueerde azimut verdeling van de simulatie voor verschillende combinaties van 506-508-511.



Figuur 6.15: Resultaten voor het verschil tussen de gereconstrueerde azimut en de echte waarde van de azimut voor verschillende combinaties van stations: 506-508-511.

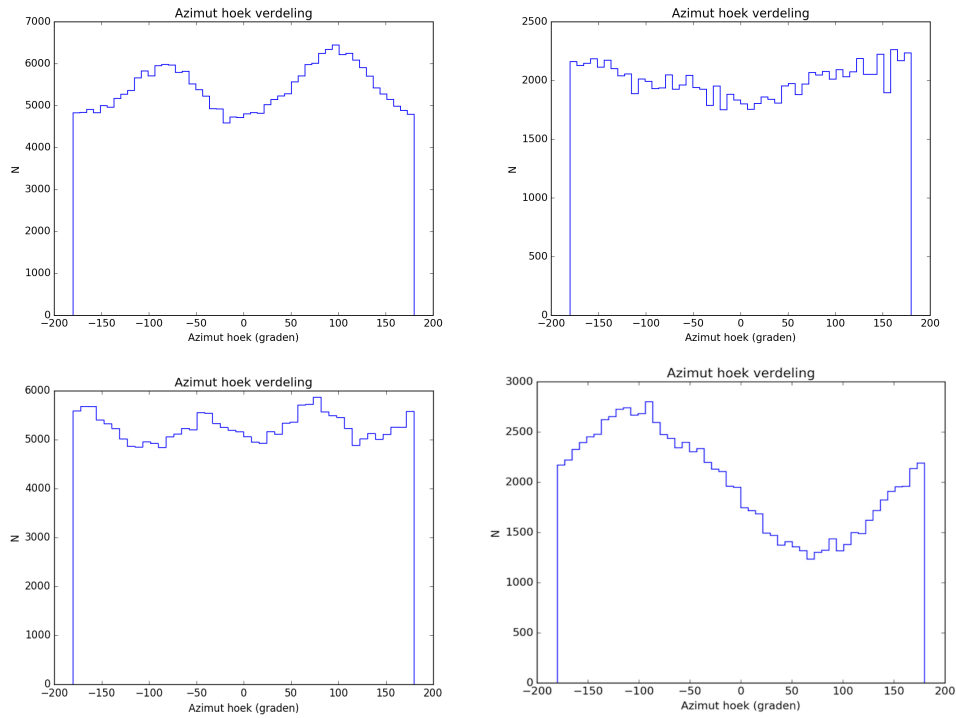
eerde waarden normaal verdeeld zijn rond nul. De reconstructie en de simulatie komen dus overeen. Dit betekent wel dat voor deze driehoeken ook de simulaties niet overeenkomt met de verwachtingen, waardoor verder onderzoek noodzakelijk is. Voor een beter begrip van de simulaties is data gesimuleerd van één vier-plaatstation.

¹⁰Zie tabel 6.3 voor de informatie over de afstanden tussen de stations en de vorm van de driehoek

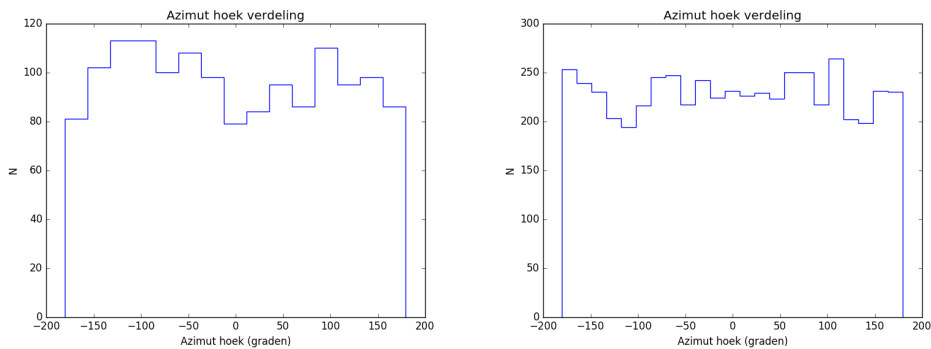
Simulaties van een station

Voor de simulaties van een station is gebruik gemaakt van de stations 501 en 503, vanwege de opstelling van de detectoren binnen de stations. Om een beter begrip te ontwikkelen is voor beide stations data uit januari 2015 geselecteerd en gereconstrueerd. De resultaten zijn te zien in figuur 6.16.

Daarnaast zijn er ook simulaties gedaan voor showers met een energie van 10^{14} eV. De resultaten zijn te zien in figuur 6.17. Zoals te zien in deze figuren komen



Figuur 6.16: Resultaten voor de data en de reconstructie van de stations 501 (data: links boven en simulatie: rechts boven) en 503 (data: links onder en simulatie: rechts onder).



Figuur 6.17: De resultaten van de simulatie voor station 501 (links) en 503 (rechts). Voor de reconstructie zijn de tijdverschillen uit de simulatie gebruikt.

de data en de simulatie niet overeen. Het probleem ligt bij de reconstructie van de simulatie. Bij de reconstructie van de simulatie wordt de timing-offset tussen de detectoren verkeerd bepaald. Tijdens de

simulatie worden de timing-offsets tussen de detectoren willekeurig gekozen. Echter, bij de reconstructie worden de timing-offsets gebruikt uit de API. Dit betekent dus dat de verkeerde tijdverschillen tussen de detectoren worden gebruikt, en daardoor komen de data en de simulatie niet overeen. Wanneer de timing-offsets uit de simulaties worden gebruikt, komen de resultaten van de data en simulatie wel overeen, zoals te zien is in 6.17. Voor deze figuur is tijdens de simulatie alle mogelijke energieën (10^{14} tot 10^{20} eV) voor primaire deeltjes gebruikt en is voor de selectie van de zenithoeken gebruik gemaakt van de zenithoek verdeling voor kosmische straling [28].

6.3.4 Conclusie en discussie

Gedurende dit onderzoek is gekeken naar de richtingreconstructie in het HiSPARC experiment. Voor driehoeken van stations is gekeken naar de drie stations op het Zaanlands Lyceum en verschillende combinaties van stations op het SciencePark in Amsterdam. Bij de opstelling van de stations in een driehoek wordt verwacht dat er een voorkeursrichting voor de azimut is voor deeltjes die in de richting van de lange as van de driehoek bewegen. De data laat echter een ander resultaat zien. Voor gelijkzijdige driehoeken komt de verwachting uit, er is geen voorkeursrichting bij deze driehoeken te zien. Bij andere typen driehoeken, zowel gelijkbenige driehoeken als driehoeken met een willekeurige vorm, is er wel een voorkeursrichting te zien, maar anders dan verwacht komt deze voorkeursrichting niet overeen met de lange as van de driehoek. Als mogelijke verklaring voor de resultaten is gekeken naar timing-offsets tussen de stations, naar verschillende reconstructiealgoritmes en naar het effect van het aardmagnetisch veld op de richting van de primaire deeltjes. Dit had echter geen effect op de resultaten van de reconstructie.

Naast de data is ook gekeken naar simulaties van combinaties van drie stations. Hierbij is gebruik gemaakt van CORSIKA simulaties van de kosmische straling en simulaties van de detectoren en stations. Ook de simulaties van driehoeken van stations tonen een resultaat dat niet overeenkomt met de verwachting. Omdat ook de simulaties niet overeenkomen met de verwachting die gebaseerd is op de geometrie van de

driehoeken, is tot slot gekeken naar simulaties en data van een enkel vier-plaatstation. Met een vier-plaatstation is het ook mogelijk om een richtingreconstructie uit te voeren en één station is makkelijker te begrijpen dan een combinatie van drie stations. Uit de resultaten voor één station volgt dat de data en de simulaties, na correcties voor de timing-offsets, overeenkomen. De data en simulaties komen echter niet overeen met de verwachting. De data en de verwachting zijn ongeveer 90 graden gedraaid ten opzichte van elkaar. Dit kan betekenen dat de oorspronkelijke aanname dat lawines die over de lange as van de driehoek bewegen een grotere kans hebben om gedetecteerd te worden niet klopt. Dit kan komen doordat er meer effecten mee spelen bij de reconstructie dan alleen de oriëntatie van de detectoren.

Kortom voor één station komen data en simulaties overeen met elkaar, maar niet met de verwachting. Voor de reconstructie van de data bij meerdere stations komen data en simulatie niet overeen. Voor beide effecten is tijdens dit onderzoek echter nog geen verklaring voor gevonden en er is meer onderzoek nodig om de gevonden resultaten te verklaren.

7 Konklusie

Afgelopen jaar hebben vijf docenten uit het voorgezet onderwijs in Amsterdam weer in de keuken van het wetenschappelijk bedrijf kunnen kijken. De resultaten van hun onderzoek worden gepresenteerd in dit dokument.

Zoals in de inleiding werd uitgelegd, is gekozen om onderzoek uit te voeren binnen het kader van het HiSPARC projekt. Alle aspecten hiervan komen aan bod; hardware, software ontwikkeling en data analyse. Verdieping van theoretisch begrip werd bereikt in een serie seminars. Ook werden aktuele wetenschappelijke vraagstukken bestudeerd met begeleiding door leden van de lokale wetenschappelijke staf. Dit jaar is de fokus van de onderzoeken gelegen in het begrip van de opstelling. Khalid Akrikez heeft de efficiëntie van stations op het Sciene Park onder de loep genomen. Jeroen Bezemer heeft de rekonstruktie van de positie van de kern van de kosmische shower ter hand genomen nu niet gebruik makend van de pulshoogten, maar van de aankomsttijden van de deeltjes. Nathalie van der Weiden heeft de respons van één enkel station en van een kluster stations gesimuleerd en vergeleken met data, Mark van de Ven heeft diverse periodes waarin de zon uitbarstingen vertoonde genomen en daarvoor de respons van HiSPARC bepaald. Reno Beekman, tenslotte, heeft de signalen van de HiSPARC detektoren ten tijde van het optreden een bliksem in de buurt van deze detektoren onderzocht. Het goed omlijnde kader en het deelnemen aan een gemeenschappelijk projekt, werd bereikt door het veelvuldig overleg tussen deelnemers en begeleiders. Na één en twee derde deel van het jaar werd door de deel-

nemers een voortgangsrapport gepresenteerd. Deze bijeenkomsten heben uitgebreide en inspirerende discussies opgeleverd. Docenten hebben elkaar dan ook vaak getroffen als *sparring partners*: diverse vraagstukken zijn voor het voetlicht gebracht en besproken. Dit jaar werd wederom een kickoff bijeenkomst gehouden met een deskundige van buiten Nikhef. Prof. Olaf Scholten (Groningen) opende het seizoen met twee kolleges. Daarnaast werd het jaar afgesloten met een einde-jaars bijeenkomst waarin de LiO's elkaar hun resultaten presenteerden.

Dit jaar is een begin gemaakt aan de toepassing van notebooks in het HiSPARC projekt. Een verzameling van notebooks werd aangeboden aan zowel de deelnemers aan het LiO programma als de leerlingen in de klas. In beide omgevingen blijkt dat deze notebooks een snellere en betere vooruitgang van de programmeervaardigheden tot gevolg hadden. Tenslotte, ook dit jaar hebben weer vele sponsors geholpen door het HiSPARC projekt te steunen. Speciale dank gaat uit naar SURFSara, dat het mogelijk gemaakt heeft om de notebooks in een webpagina te integreren.

Referenties

- [1] K.A. Olive et al. Review of particle physics. *Chin. Phys. C*, 38:1, 2014.
- [2] J.W. van Holten. Kosmische straling: airshowers. Site bezocht in 2017. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HISPARC/Lesmateriaal_fysica_-_jan-willem_/shower.pdf.
- [3] D.B. Fokkema. *The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of shower direction*. PhD thesis, University of Twente, 2012.
- [4] D. Pennink-Bakker. Analyse van het pulshoogte histogram. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2009/2010, 2010. in Dutch. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HISPARC/documenten/Leraar_in_Onderzoek/HISPARC_Li0_document_071210.pdf.
- [5] R.T. Bakker. The HiSPARC experiment, an analysis of the MPV and the number of events per unit time. Bachelor thesis, 2012.
- [6] A. Dubinova et.al. Prediction of lightning inception by large ice particles and extensive air showers. *Phys. Rev. Lett.*, 115:015002, 2015.
- [7] R.E. Beekman. Extensive airshowers en bliksem: een verband? Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2015/2016, 2016. in Dutch. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HISPARC/documenten/Leraar_in_Onderzoek/HISPARC_Li0_document_2016-2.pdf.
- [8] D.R. Poelman. On the science of lightning: An overview, 2010. Koninklijk Meteorologisch Instituut van België, report N°56.
- [9] H. Beekhuis and I. Holleman. Upgrade and evaluation of a lightning detection system. presentatie op ILDC18, 2004.
- [10] T. Stanev. *High energy cosmic rays, 2nd edition*. Springer-Praxis books in astrophysics and astronomy. Springer, Chichester UK, 2004.
- [11] U.S. Standard Atmosphere, 1976. Available from: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770009539_1977009539.pdf.
- [12] D.B. Fokkema. *The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of shower direction*. PhD thesis, University of Twente, 2012.
- [13] T. Antoni et al. Measurements of attenuation and absorption lengths with the KASCADE experiment. *Astropart. Phys.*, 19:703–714, 2003.
- [14] P. Trávníček. *Detection of high-energy muons in cosmic ray showers*. PhD thesis, Charles University, Prague, 2004.
- [15] 2011. Bezocht 9 november 2016. Available from: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/cme_list/UNIVERSAL/2011_06/univ2011_06.html.
- [16] T. Kooij. Github - HiSPARC/SAPPHiRE. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2009/2010, 2016. Bezocht via SAPPHiRE, a framework for HiSPARC: 17 april 2017. Available from: <https://github.com/hisparc/sapphire>.
- [17] Bezocht 9 november 2016. Available from: <https://cosmicrays.oulu.fi>.
- [18] N. Fuller. Neutron monitors. bezocht 26 juni 2017. Available from: <http://www.nmdb.eu/?q=node/142>.
- [19] Uurgegevens. bezocht 14 november 2016. Available from: <http://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/data-ophalen-vanuit-een-script>.
- [20] L. de Vries. Search for a correlation between HiSPARC cosmic-ray data and weather measurements., 2012. Master Thesis Univ. Amsterdam. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HISPARC/werk_van_students/Loran2012_.pdf.
- [21] NOAA ESRL Solar Position Calculator. (n.d.). Bezocht 14 november 2016. Available from: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/azel.html>.

- [22] M. Abbrescia. Observation of the february 2011 forbush decrease by the eee telescopes. *The European Physical Journal Plus*, 126:61, 2011.
- [23] M. Abbrescia. Results from the observations of forbush decreases by the extreme energy events experiment. *Proceedings of Science*, 2015.
- [24] M. Abbrescia. The eee project - science in schools: state and results. *Nucl Phys B.*, 2016.
- [25] R. Zonneveld. Hoekreconstructie en de vorm van de gebruikte driehoek. Jaarverslag Leraar in Onderzoek 2012/2013, 2013. in Dutch. Available from: http://www.hisparc.nl/fileadmin/HiSPARC/documenten/Leraar_in_Onderzoek/HiSPARC_Li0_document_2013.pdf.
- [26] D.B. Fokkema. *The HiSPARC Experiment, data acquisition and reconstruction of shower direction*. PhD thesis, University of Twente, 2012.
- [27] D. Heck et al. Corsika, a Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Technical Report FZKA6019, Institute for Nuclear Physics Forschungszentrum und Universität Karlsruhe, 1998. Available from: https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf.
- [28] A. Iyono et al. Zenith angle distribution and atmospheric effect for EAS with LAAS experiments. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, 4:47–50, 2008.