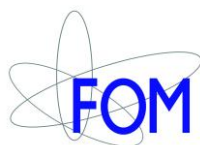


‘Leraar in Onderzoek’

Hoogenergetische Kosmische Straling

26 maart 2016



Op de voorpagina de deelnemende docenten op het terras van het FOM/Nikhef instituut. V.l.n.r.: Niek Schultheiss, Norbert van Veen, David Fokkema, Ricky Zonneveld en Matthijs van Vulpen. Op de achtergrond het nieuwe station 508. De docenten zijn bij het Nikhef werkzaam geweest.

Begeleiding: Bob van Eijk, David Fokkema, Jan-Willem van Holten en Jos Steijger.

Eindredactie: Bob van Eijk en Jos Steijger. Dit document is ook in pdf formaat beschikbaar [i]

Het project 'Leraar in Onderzoek' is financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM).

Inhoud

1.	Inleiding	5
2.	Energiereconstructie van showers met pulshoogte en pulsintegralen.....	7
2.1.	Inleiding	7
2.2.	Signaaldetectie	8
2.3.	Theorie energie-reconstructie.....	12
2.4.	Uitvoering onderzoek.....	13
2.5.	Resultaten LDF fit	17
2.6.	Resultaten χ^2 : showercore reconstructie	18
2.7.	Conclusie	20
2.8.	Referenties	21
3.	Kosmische stralen en bliksem	23
3.1.	Theoretische achtergrond	23
3.1.1.	Bliksem	23
3.1.2.	Wat we wel weten.....	23
3.1.3.	Wat we nog niet weten	24
3.2.	De hypothese.....	25
3.3.	Runaway Breakdown.....	25
3.4.	Het onderzoek	26
3.5.	Werkwijze	26
3.5.1.	Deel 1: Samen met HiSPARC.....	26
3.5.2.	Deel 2: Samen met het KNMI	34
4.	Hoekreconstructie en de vorm van de gebruikte driehoek	39
4.1.	Detectie van deeltjeslawines door middel van een cluster met drie meetstations.....	39
4.2.	Vorm van de driehoek en detectie van deeltjes	39
4.3.	Clusteropstelling Sciencepark Amsterdam.....	41
4.4.	Onderzoeksopdracht	41
4.5.	Karakteristieken van een driehoek.....	42
4.6.	Parameters van een paar gebruikte driehoeken.....	43
4.7.	Hoekreconstructie uit data van de meetstations.....	44
4.7.1.	Simulatie van geaccepteerde azimut hoeken.	46
4.8.	Relatieve amplitudebepaling.....	47
4.9.	Het verband tussen vorm van de driehoek en de hoekreconstructie.....	48
4.9.1.	Werkwijze	48
4.9.2.	Opmerkingen	48

4.10.	Conclusie	49
4.11.	Dankwoord	49
4.12.	Referenties:	50

1. Inleiding

Het FOM¹ programma '**Leraar in Onderzoek**' (LiO) stelt HAVO/VWO docenten natuurkunde in de gelegenheid om een jaar lang, 1 dag in de week, onderzoek uit te voeren bij een aan FOM gelieerde wetenschappelijke instelling. Het onderzoek richt zich, naast een aantal didactische aspecten, vooral op het oplossen van hedendaagse natuurwetenschappelijke vraagstukken. Op deze wijze komen docenten uit het voortgezet middelbaar onderwijs een jaar lang in nauw contact met het academisch onderzoek en nemen nader kennis van de huidige wetenschappelijke wijze van werken. Ze ontwikkelen hun eigen onderzoeks vaardigheden en zullen waarschijnlijk hun enthousiasme voor een universitaire studie natuurkunde aan hun leerlingen weten over te brengen.

Men vreest dat de (te) beperkte instroom van eerstejaars de sterke positie van het Nederlandse onderzoek in deze discipline bedreigt. Heden heeft Nederland internationaal gezien in de natuurwetenschappen een uitstekende reputatie die we willen behouden. De terugloop is terug te voeren op diverse factoren, zoals de interesse die op een middelbare school voor een studie of beroep wordt gewekt, de maatschappelijke relevantie die studie en beroep uitstralen, de glamour van het beroep, alsmede het carrièreperspectief, de beloningsstructuur en de onbekendheid met het klimaat aan universiteit of wetenschappelijke instelling, in het bijzonder met het (fundamenteel) onderzoek.

Tijdens het academische jaar 2012/2013 hebben wederom docenten onderzoek uitgevoerd op het gebied van de subatomaire natuurkunde. Norbert van Veen, Matthijs van Vulpen en Ricky Zonneveld zijn werkzaam geweest bij het Nikhef in Amsterdam. In de volgende hoofdstukken doen zij verslag van hun eigen wetenschappelijk onderzoek. David Fokkema en Niek Schultheiss hebben hun tijd besteed aan de ontwikkeling van lesmateriaal voor het voortgezet onderwijs. De resultaten daarvan zijn beschikbaar op de HiSPARC website (<http://www.hisparc.nl>).

Dit document (en rapporten uit 2008/2009, 2009/2010 en 2010/2011) is ook elektronisch beschikbaar op die site.

¹ Het project 'Leraar in Onderzoek' wordt financieel mogelijk gemaakt door de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM).

2. Energiereconstructie van showers met pulshoogte en pulsintegralen.

Norbert van Veen



Norbert van Veen werkt op het Fons Vitae Lyceum in Amsterdam, als docent Natuurkunde, ANW en Science. Na een aantal jaren op de Universiteit van Amsterdam voor de ITS academy te hebben gewerkt, is nu de aanstelling 'leraar in onderzoek' op het Nikhef een nieuwe uitdaging.

Abstract

In dit onderzoek wordt bij kosmische showers de deeltjesdichtheid per detector berekend door respectievelijk de MIP-piek van de pulshoogte en de MIP-piek van de pulsintegraal te gebruiken. Op deze wijze ontstaan van dezelfde data, verschillende databestanden, waarin de deeltjesdichtheid per detector op verschillende manier is berekend. Met behulp van deze grootheden wordt een LDF (parameterfit) gefit aan de data. Met behulp van de kleinste kwadraten methode wordt berekend wat de Chi kwadraat waarde van een bepaalde LDF fit is. Beide methoden voor de MIP-bepalingen kunnen zo kwantitatief met elkaar vergeleken worden.

2.1. Inleiding

De aarde wordt continu gebombardeerd door kosmische straling. De kosmische straling bestaat uit allerlei primaire deeltjes, zoals ijzerkernen, protonen, koolstofkernen etc. Deze deeltjes hebben energieën variërend van 10^{14} t/m 10^{20} eV, waarvan de hoogste energiewaarden op aarde in versnellers niet bereikt kunnen worden. De oorsprong van kosmische straling met hoge energie is tot op heden onbekend.

Als primaire deeltjes op de atmosfeer botsen, ontstaat er een cascade van allerlei secundaire deeltjes, dat een Extended Air Shower (EAS) wordt genoemd. Deze EAS reikt, afhankelijk van de energie van het primaire deeltje en de hoogte van de eerste botsing, tot het aardoppervlak. Victor Hess was de eerste die deze EAS of kosmische showers daadwerkelijk gemeten heeft tijdens diverse metingen met een luchtballon in 1912. Hess merkte dat de intensiteit van de straling hoger werd naarmate hij hoger in de atmosfeer kwam. Terwijl men toen dacht dat deze straling voornamelijk uit

de aarde afkomstig moest zijn en de intensiteit dus zou moeten afnemen op grotere hoogte. Tegenwoordig wordt er veel onderzoek verricht aan deze EAS, door onder andere de volgende onderzoeksgroepen: KASCADE, AUGER en HiSPARC.

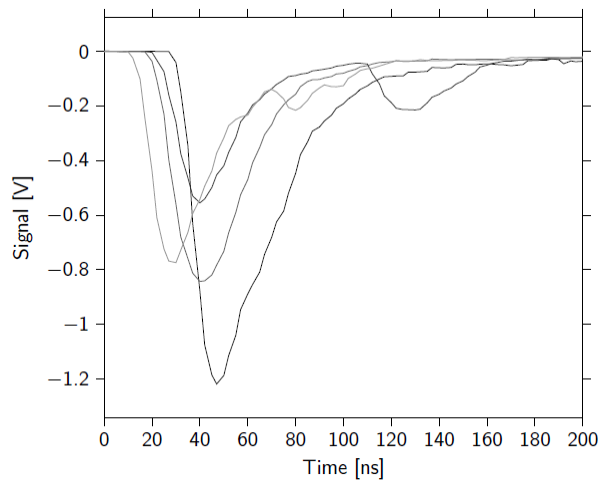
HiSPARC is een Nederlands project dat tot doel heeft om deze kosmische showers te meten en te analyseren. Het project werkt samen met middelbare scholen, de scholen plaatsen de detectie stations op hun daken en leraren en leerlingen installeren, beheren en onderhouden de stations, en houden de kwaliteit van de ermee verkregen meetgegevens in de gaten. Zo worden showers in een groot oppervlak gemeten en worden middelbare scholieren betrokken bij wetenschappelijk onderzoek.

De HiSPARC detectiestations meten de deeltjes van de EAS die het aardoppervlak bereiken en zijn via een netwerk verbonden met het NIKHEF en de Universiteit van Nijmegen. De HiSPARC detectoren kunnen de fotonen, muonen en elektronen meten die in zo'n EAS voorkomen. Een station bestaat uit twee of vier detectoren, die ieder een eigen signaal bij een detectie van een EAS geven. De interessante grootheden die uit het signaal bepaald kunnen worden zijn de pulshoogte, de pulsintegraal en de timing. Is het signaal hoog genoeg en meten twee of meer detectoren binnen een korte tijdsperiode een signaal, dan slaat het meetstation dit signaal op als een event in de database. Per uur worden typisch zo'n 2000 tot 3000 events geregistreerd per station. Als meerdere detectoren of stations binnen een bepaalde tijd deeltjes detecteren dan spreken we van een coïncidentie. Bij een coïncidentie behoren dus alle metingen op dat moment bij één EAS.

Een belangrijk deel van het onderzoek naar showers is het bepalen van de energie of showergrootte. Dit artikel behandelt een stap in de bepaling van de energie van showers, die door zes stations tegelijk gemeten worden. Om een nauwkeurige bepaling te krijgen van de energie en showergrootte, wordt de data van de stations op het sciencepark in Amsterdam gebruikt en geanalyseerd. Dit artikel beschrijft showeranalyse op basis van twee grootheden, de pulshoogte en pulsintegraal en de resultaten daarvan.

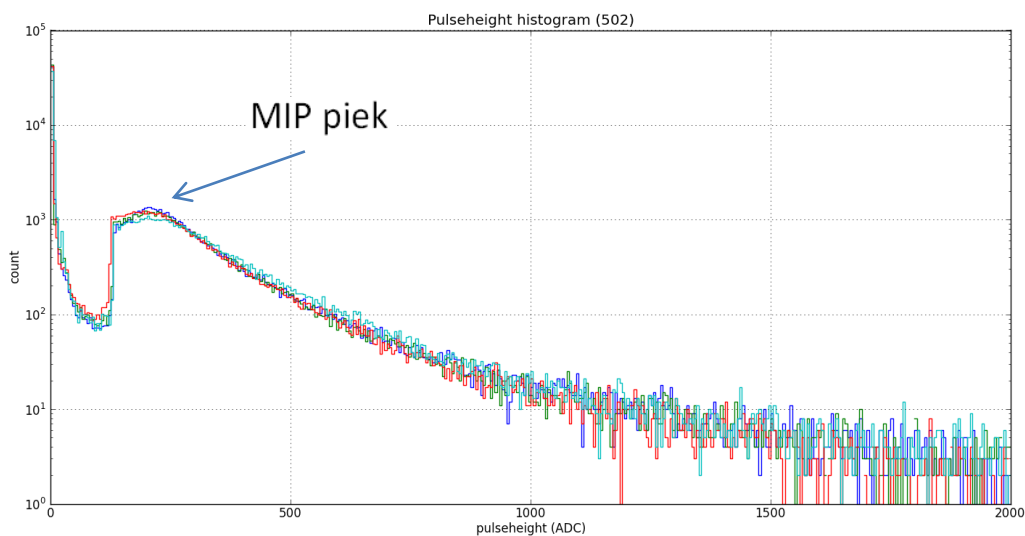
2.2. Signaaldetectie

De fotomultiplieurs van de detectoren geven een uitslag zoals in figuur 2.1 te zien is. 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. Ook kan de oppervlakte onder de puls berekend worden, de zgn. 'pulsintegraal', deze waarde wordt evenals de pulshoogte opgeslagen in de database van HiSPARC.



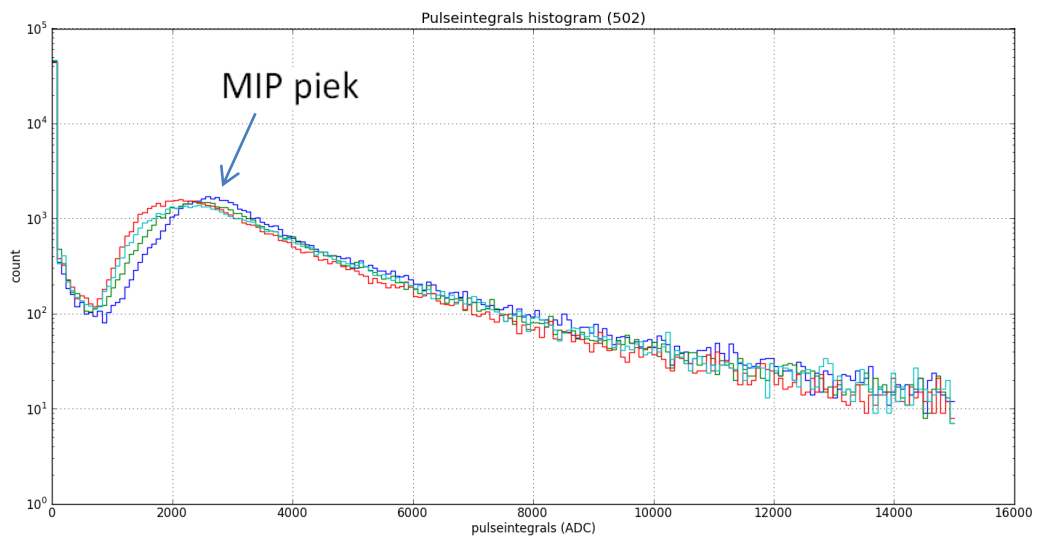
Figuur 2.1 Een event van een HiSPARC station dat gedigitaliseerd is in de ADC. Te zien is dat de aankomsttijd van de deeltjes niet in elke detector gelijk is. Dit gegeven wordt gebruikt voor de richting reconstructie van de EAS. De 'hoogte' van de puls geeft informatie over de 'puls hoogte' en de oppervlakte onder de puls is de 'pulsintegraal'. Figuur overgenomen uit Fokkema (2012, pag. 44)[1]

De geregistreerde events variëren in pulshoogte en dus ook in pulsinintegraal, omdat de energie en deeltjesaantallen voor de showers variëren. Als van een bepaalde periode alle geregistreerde events van een station geplot worden in een histogram, kan met behulp van dat histogram de MIP (minimum ionizing particle) piek per detector bepaald worden. In figuur 2.2 is de MIP-piek aangegeven in het pulshoogte diagram van station 502. Een uitgebreide analyse van Pennink [2] heeft laten zien dat gebeurtenissen in de MIP-piek een grote waarschijnlijkheid hebben dat er in die gebeurtenissen slechts één deeltje werd gedetecteerd.



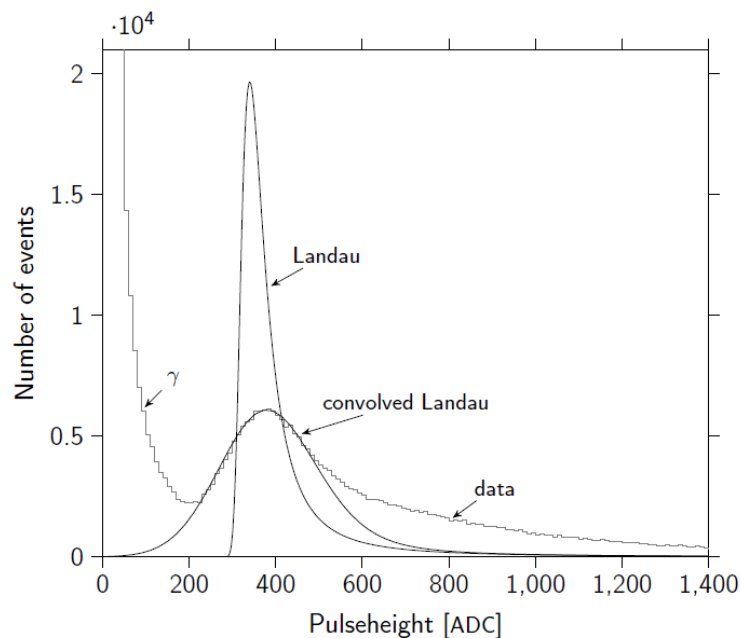
Figuur 2.2 Pulshoogte histogram. In dit figuur zijn de pulshoogten van de geregistreerde events van 4 detectoren weergegeven. De pijl geeft de locatie van de MIP-pieken aan. De MIP-waarde varieert echter per detector en is ook temperatuur afhankelijk. Zie Bartels [3].

Een dergelijk histogram kan ook gemaakt worden van de pulsintegralen van de events, die geregistreerd zijn in dezelfde periode.



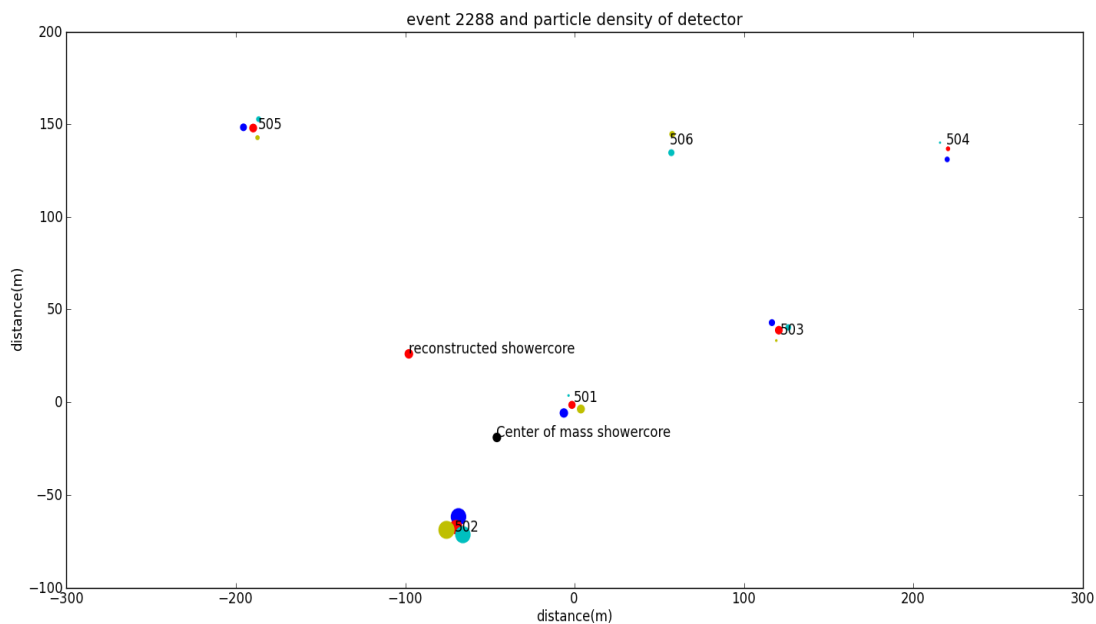
Figuur 2.3 pulsintegralen histogram. In dit figuur zijn de pulsintegralen van de geregistreerde events van 4 detectoren weergegeven. De pijl geeft de locatie van de MIP-pieken aan. Duidelijk is te zien dat hier de MIP-pieken per detector verschillen.

Uit Pennink's beschrijving van het pulshoogte diagram [2, pag 19-21] volgt dat de vorm van het pulshoogtediagram te beschrijven is door een convolutie van een Landau verdeling van het energieverlies van de deeltjes met een Gauss-kromme, die de resolutie van de detector beschrijft. Zie figuur 2.4.



Figuur 2.4 pulshoogte histogram. Pennink [2] en Fokkema [1] beschrijven de vorm het pulshoogte histogram; links in het figuur het dalende gamma spectrum en rechts de convolutie van de Landau functie van het energieverlies van de deeltjes en Gauss-kromme van de detector. Figuur overgenomen uit [1, pag 50].

Omdat de piek van het pulshoogte- en pulsintegraalhistogram zo belangrijk is, moet zo exact mogelijk de MIP-waarde bepaald worden uit beide diagrammen. Bartels [3, pag. 16-18] gebruikt daartoe een Gauss-kromme om het piek deel van het pulshoogte histogram te fitten en zo de waarde van de MIP te achterhalen. Omdat de MIP-piek de waarde aangeeft die bij één gedetecteerd deeltje hoort kan deze waarde gebruikt worden om per event de deeltjesdichtheid per detector te bepalen. Met behulp van de deeltjesdichtheid per station en per detector is het mogelijk om de plaats van de showercore te reconstrueren, het aantal deeltjes van de EAS en de energie van het primaire deeltje te bepalen. Montanus [4] heeft laten zien dat de verhoudingen van de deeltjesdichtheid per detector of de gemiddelde deeltjesdichtheid per station gebruikt kan worden voor een nauwkeurige bepaling van de hiervoor genoemde grootheden. Ook Steijger [5] gebruikt de dichtheden van verschillende detectoren om met oplossingscirkels de showercore te kunnen vinden. Zie figuur 2.5.



Figuur 2.5 Een geregistreerd event. De nummers van de stations van het Sciencepark cluster zijn aangegeven. Van elk station zijn de uitslagen van de detectoren weergegeven door de grootte van de cirkels. Een grote cirkel komt dus overeen met een grote deeltjesdichtheid per detector. Als startwaarde voor de fit aan een LDF-functie om de positie van een showercore te vinden, kan de ‘center of mass’ methode gebruikt worden. Deze methode berekent het gewogen gemiddelde van de gemeten deeltjesdichtheid en de afstand tot de stations. In dit figuur is ook een gereconstrueerde showercore te zien.

Als met behulp van de MIP-waarde de deeltjesdichtheid per event en per detector is berekend, dan kan met behulp van een gekozen laterale distributie functie een bepaling worden gedaan van de energie van een EAS. Naarmate de energie van een EAS groter is en afstand van de showercore kleiner is tot een station is ook de uitslag van een detector hoger. De berekende deeltjesdichtheid is dan ook groter. Zie figuur 2.5.

Het doel van dit onderzoek is om te kijken naar de reconstructie van shower grootte/energie op basis van twee methoden, namelijk met de MIP bepaald uit het pulshoogte diagram en deze te vergelijken met een reconstructie gebaseerd op de MIP-waarden uit het pulsintegralen diagram. Om deze methoden kwantitatief met elkaar te vergelijken wordt de χ^2 waarde van de showercore bepaling bekeken.

Tijdens het onderzoek is data gebruikt van 10 mei en 10 juni 2013, omdat in deze periode alle zes stations in het sciencepark cluster gecontroleerd zijn en goede data leverden. De ruwe data werd opgehaald uit de database (`data.hisparc.nl`) en later gebruikt om van iedere dag twee bestanden te maken met berekeningen van de deeltjesdichtheid met de twee MIP-methoden. Op deze manier zijn van elke dag verschillen in reconstructie van shower grootte/energie te bekijken².

2.3. Theorie energie-reconstructie

De reconstructie van de grootte van een kosmische shower is nodig om daarmee de energie van de kosmische deeltje te schatten. Doordat meerdere stations mee doen bij een coïncidentie, kan op verschillende afstanden van de showercore de deeltjesdichtheid van een shower gemeten worden. Deze verdeling van de deeltjesdichtheid in een vlak loodrecht op de richting van inval wordt de laterale deeltjes distributie genoemd. De gemeten laterale deeltjes distributie wordt gefit met een theoretische verdeling, een laterale distributie functie (LDF). Bij deze fit zijn de positie van de showercore en de deeltjesgrootte de belangrijkste uitkomsten.

Om de grootte van een EAS te vinden wordt gebruikt gemaakt van een functie voor laterale distributie (LDF) van de deeltjes in de EAS. De formule is een aanpassing van de NKG-formule, waarbij verhoudingen van de deeltjesdichtheid in de detectoren wordt gebruikt om een schatting te maken voor de beginwaarden voor de fit. Bosboom [6] heeft in zijn verslag gekozen voor de LDF van KASCADE, waarbij de parameters zijn aangepast aan fysische metingen. De LDF en de waarden van de constanten zijn overgenomen van Apel (formule 5 en 6) [7].

$$\rho(r) = N_e \cdot \hat{c}(s) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s-\alpha} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-\beta} \quad 2.1$$

met

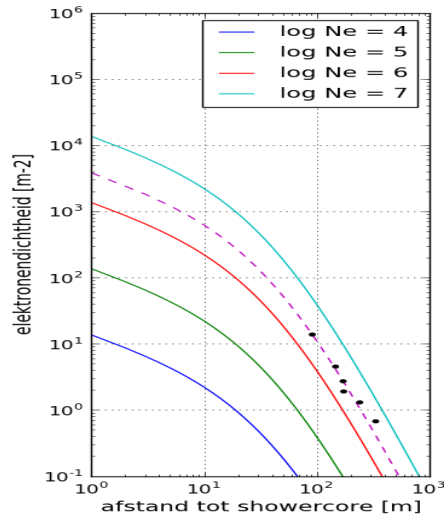
$$\hat{c}(s) = \frac{\Gamma(\beta-s)}{2\pi r_0^2 \Gamma(s-\alpha+2) \Gamma(\alpha+\beta-2s-2)} \quad 2.2$$

Waarin:

N_e het aantal deeltjes van de shower (shower size), s de age parameter en r_0 is een aangepaste Molière straal. De waarden van de constanten zijn: $\alpha = 1.5$, $\beta = 3.6$, $r_0 = 40$ m en $s = 0.94$.

In figuur 2.5 wordt de deeltjesdichtheid weergegeven per event per detector. De ‘curvefit’ functie van Python kan met behulp van de gemeten gemiddelde dichtheid per station een LDF fitten aan de data en op deze manier de showergrootte reconstrueren. De ‘curvefit’ verandert de parameters (positie van de showercore en N_e) van de LDF, zodat de resulterende functie zo goed mogelijk door de datapunten gaat. Zie figuur 2.6. Als de showergrootte bekend is kan de energie van de shower uitgerekend worden. Aangezien de shower kan zijn ontstaan uit meerdere verschillende primaire deeltjes zoals, ijzerkernen of protonen, zal ook de samenstelling van de showers verschillen. De verhouding tussen elektronen en muonen geeft een indicatie voor de identiteit van het primaire deeltje. Steijger [8] geeft het verband tussen showergrootte en energie van het primaire deeltje in figuur 7 op basis van het simulatie programma CORSIKA.

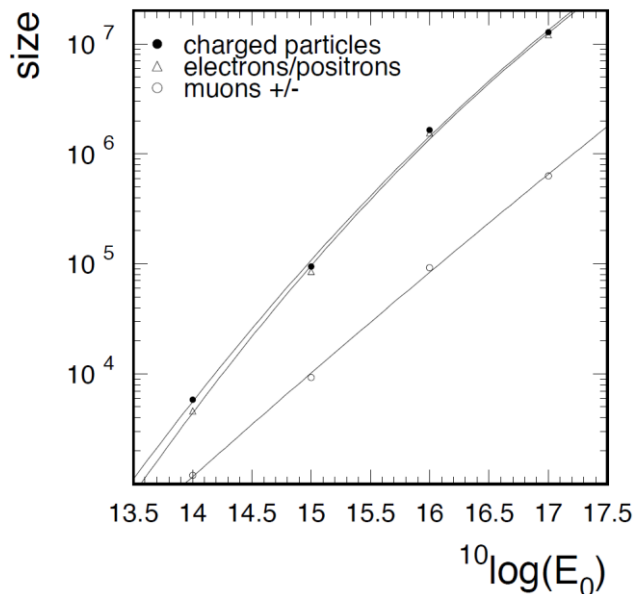
² Er is gebruik gemaakt van de branch ‘pulseheight_integrals’ van HiSPARC/SAPPHiRE in Github om programma’s aan te passen.



Figuur 2.6 LDF fit. Een event is gefit aan de LDF van KASCADE. De lijnen geven LDF's van respectievelijk showergrootten van 10⁴ t/m 10⁷ aan. Het gereconstrueerde event (stippellijn) van 6 stations heeft een showersize tussen 10⁶ en 10⁷

2.4. Uitvoering onderzoek

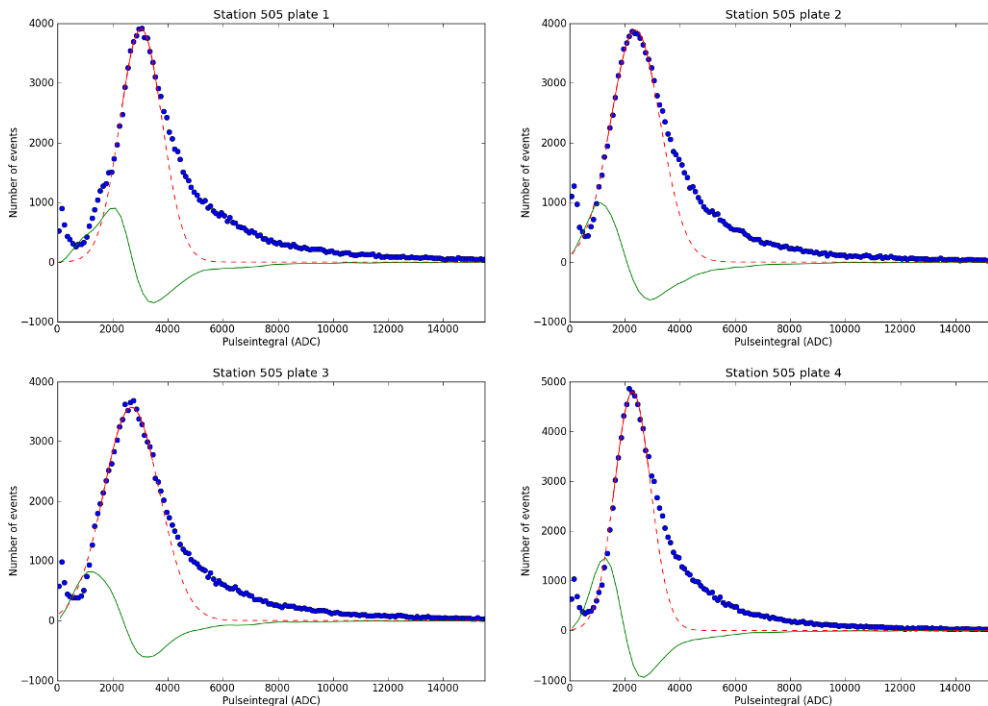
Zoals gebleken is uit de vorige paragrafen, is de bepaling van deeltjesdichtheid van de detectorplaten erg belangrijk om via een LDF fit een goede waarde voor de showersize te verkrijgen. Data-analyse van HiSPARC gaat via het SAPHIRE-analyse pakket, dat David Fokkema ontwikkeld heeft. In dit analyse pakket, gebaseerd op de programmeertaal Python, zou de MIP-waarde berekend moeten worden met behulp van pulshoogte histogrammen van de betrokken detectoren. Echter de MIP waarde is in de analyse tot nu toe op een vaste waarde van 380 ADC gezet en daarom zijn de bepalingen van de deeltjes dichtheden en dus showergrootte van een EAS tot op heden niet erg



Figuur 2.7 Verband tussen showergrootte en de energie van het primaire deeltje.

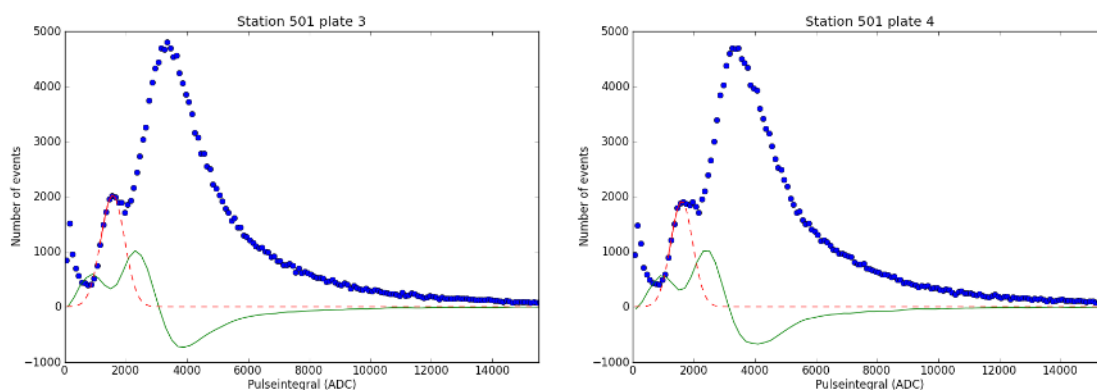
nauwkeurig te noemen. In het werk van Bartels [3, pag. 30] is 380 ADC zelfs een erg hoge waarde, die vrijwel niet bereikt wordt in de door hem bestudeerde detectoren van station 1006. Ook in de stations van het sciencepark cluster komt deze hoge waarde niet voor.

Om een zo nauwkeurig mogelijke fit te verkrijgen wordt met behulp van een Python programma de vorm van het pulshoogte histogram geanalyseerd door Lam[11]. De afgeleide van de vorm in respectievelijk het (wat glad gestreken) pulshoogte- en pulsintegraal histogram, bepaalt de grenzen waartussen de Gauss-fit plaatsvindt. Zie figuur 2.8. Op deze manier is voor alle detectoren in de stations 501 t/m 506 de waarde van MIP-puls en MIP –integraal bepaald en gebruikt om de deeltjesdichtheid uit te rekenen.



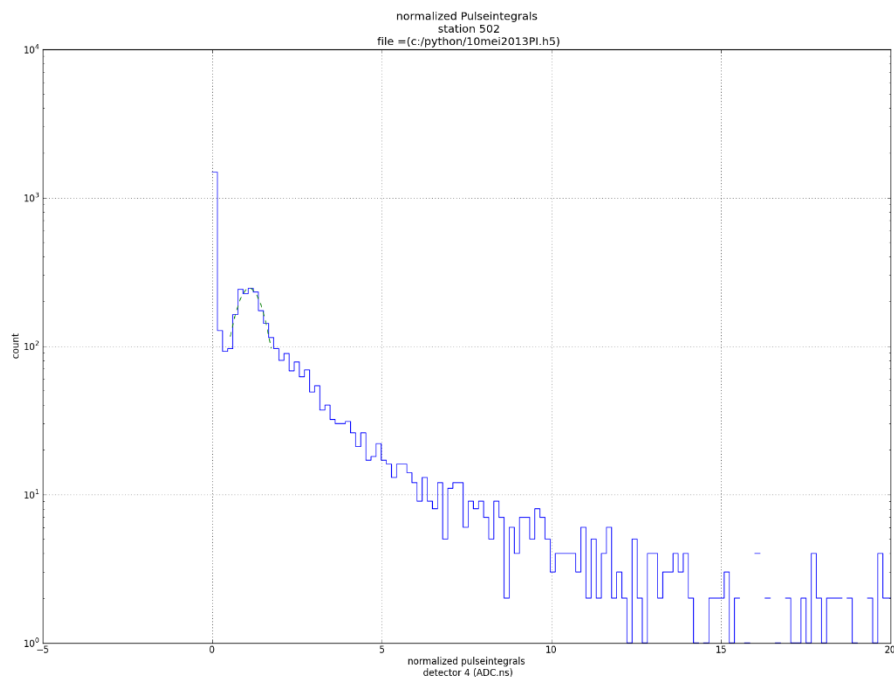
Figuur 2.8 Gauss fit met zijn afgeleide als grenzen. In de bovenstaande figuur zijn de pulsintegraal histogrammen van de 4 detectoren van station 505 te zien. De groene lijn is een afgeleide van de eerste ruwe fit van een Gauss-kromme door de punten. De groene lijn bepaalt de grenzen waartussen Gauss fit gedaan moet worden door het minimum en het maximum te kiezen van deze lijn. Dit gebied bepaalt het domein voor de uiteindelijke ‘curvfit’ procedure om de MIP-piek te vinden.

Bij het uitvoeren van het Python script dat de MIP-waarden bepaalt bleek echter dat station 501 te laag getriggerd is en daarom een extra piek voor de hoofdpiek heeft. Dit script pakt de eerste piek en geeft dus voor station 501 een te lage waarde voor de MIP piek in detector 3 en 4 (zie figuur 2.9). Dit is opgelost door voor station 501 de MIP waarden handmatig in te voeren.



Figuur 2.9 Verkeerde fit bij station 501. Het Python script pakt bij detector 3 en 4 de eerste piek en geeft dus een foutieve waarde voor de MIP piek terug.

De MIP-waarde is de ADC-waarde van precies één deeltje, dat gedetecteerd wordt in de detector. Dit betekent dat als de uitgerekende deeltjes dichtheden nu geplot worden in een histogram, dit histogram een piek zou moeten hebben bij 0 en rond de 1. De waarde 0 omdat de detectoren soms niet mee doen met een event en de waarde 1, omdat de kans dat één deeltje wordt gedetecteerd wordt groter is dan de kans dat er meerdere deeltjes gedetecteerd worden. Deze genormaliseerde pulshoogte en pulsintegraal histogrammen geven inderdaad deze verwachte pieken bij 0 en 1. Zie figuur 2.10.



Figuur 2.10 histogram van berekende deeltjesdichtheid met MIP-integraal. Dit histogram laat zien dat er een duidelijke piek is rond 1 en 0.

De genormaliseerde pulshoogte- en pulsintegraal histogrammen van alle detectoren zijn gefit met een Gauss-kromme om te kijken of de piek inderdaad rond de waarde 1 zit. De resultaten van deze fit procedure staan gegeven in tabel 2.1. In tabel 2.1 is te zien dat de piek rond de 1 ligt. De standaarddeviatie van elke fit is ook gegeven. De waarde van de piek is meestal rond de 1 of iets meer. Dat de piek een iets grotere waarde geeft dan 1 komt, omdat er rechts van de piek meer bins zitten (zie figuur 2.10). De Gauss-kromme wordt dus iets naar rechts getrokken.

Gegevens PH/PI histogram 10 mei						Gegevens PH/PI histogram 10 juni					
Station	Detector nr.	Piek Puls-hoogte	Sd (σ)	Piek Puls-integraal	Sd (σ)	Station	Detector nr.	Piek Puls-Hoogte	Sd (σ)	Piek Puls-integraal	Sd (σ)
Station 501	1	1.043	0.420	1.056	0.400	Station 501	1	1.078	0.451	1.096	0.445
	2	1.067	0.421	1.087	0.429		2	1.078	0.449	1.079	0.459
	3	1.052	0.435	1.063	0.440		3	1.058	0.464	1.056	0.471
	4	1.033	0.420	1.067	0.450		4	1.048	0.475	1.086	0.513
Station 502	1	1.090	0.387	1.065	0.351	Station 502	1	1.104	0.468	1.092	0.467
	2	1.086	0.437	1.075	0.412		2	1.127	0.501	1.092	0.481
	3	1.057	0.472	1.057	0.479		3	1.141	0.537	1.102	0.571
	4	1.089	0.461	1.099	0.465		4	1.155	0.521	1.122	0.517

Station 503						Station 503					
	1	1.054	0.393	1.058	0.429		1	1.097	0.436	1.121	0.455
	2	1.085	0.407	1.094	0.440		2	1.099	0.466	1.102	0.469
	3	1.061	0.404	1.050	0.428		3	1.064	0.431	1.101	0.451
	4	1.087	0.403	1.074	0.379		4	1.072	0.420	1.100	0.469
Station 504						Station 504					
	1	1.073	0.432	1.082	0.462		1	1.082	0.502	1.110	0.483
	2	1.074	0.417	1.072	0.411		2	1.081	0.480	1.092	0.485
	3	1.104	0.515	1.085	0.557		3	1.102	0.504	1.097	0.524
	4	1.137	0.519	1.131	0.582		4	1.129	0.584	1.110	0.623
Station 505						Station 505					
	1	1.042	0.455	1.052	0.404		1	1.027	0.463	1.031	0.487
	2	1.158	0.537	1.085	0.487		2	1.147	0.591	1.082	0.479
	3	0.996	0.574	1.019	0.502		3	1.067	0.515	1.064	0.559
	4	1.077	0.396	1.073	0.365		4	1.121	0.487	1.117	0.486
Station 506						Station 506					
	1	1.051	0.454	1.062	0.442		1	1.104	0.495	1.105	0.528
	2	1.092	0.426	1.070	0.412		2	1.09	0.453	1.105	0.437
	3	1.120	0.413	1.081	0.368		3	1.086	0.421	1.100	0.428
	4	1.077	0.399	1.091	0.392		4	1.104	0.467	1.102	0.446

Tabel 2.1 overzicht van de gefitte piek en zijn standaarddeviatie in de genormaliseerde pulshoogte en pulsintegraal histogrammen van de datafiles van 10 mei en 10 juni. De orde grootte van de standaarddeviatie werd ook gevonden in het werk van Pennink [2]. Hogere waarden voor σ kunnen veroorzaakt zijn door hoogspanningsinstabiliteit, gainstatistiek in de PhotoMultipliers, ruis en overspraak in elektronica, imperfecte lijmnaden of de hoek van inval van de muonen.

De pulsen van de MIPs zullen ongeveer hetzelfde zijn. Dat de pulshoogte een maat is en evenredig is met het aantal MIPs, is dus alleen geldig als de pulsen op precies hetzelfde moment aankomen, afgezien van verzadigingseffecten. Als we kijken naar een puls dan bevat deze lading. De fotonen worden getransporteerd naar de fotobuis, daarbij bereikt slechts een paar procent de fotobuis (zie Pennink[2]), een kwart daarvan wordt omgezet in een foto elektron in de kathode van de PMT. Die paar worden dan vermenigvuldigd in de buis (factor 1-10 miljoen). Dat is de ladingpuls. Door middel van een weerstand wordt dat een spanningpuls, maar allerlei capaciteiten smeren die puls (zie figuur 2.1) ook nog wat uit in de tijd. Uitsmeren betekent een langere maar lagere puls. Lading gaat echter niet verloren, dus de pulsintegraal (=lading) lijkt dus een beter criterium voor MIP-bepaling dan pulshoogte. De verwachting is dus dat de methode die pulsintegralen gebruikt voor de MIP-bepaling een betere reconstructie van de showergrootte kan opleveren, omdat op deze manier de signaalgrootte beter bepaald kan worden.

Het SAPPHiRE pakket van Fokkema geeft naast de LDF-fit ook de waarde van χ^2 voor de bepaling van de showergrootte aan. De χ^2 kan bepaald worden op de volgende manier. Bosboom [6] formule 1.10.

$$\chi^2(N_e, R_i) = \sum_{i=1}^n \frac{(\rho(N_e, R_i) - \rho_i)^2}{\rho(N_e, R_i)} \quad 2.3)$$

Waarin:

$\rho(N_e, R_i)$ de berekende dichtheid volgens de LDF (met N_e de grootte van de shower en R_i de afstand van positie i naar de as van de shower),

ρ_i de waargenomen dichtheid.

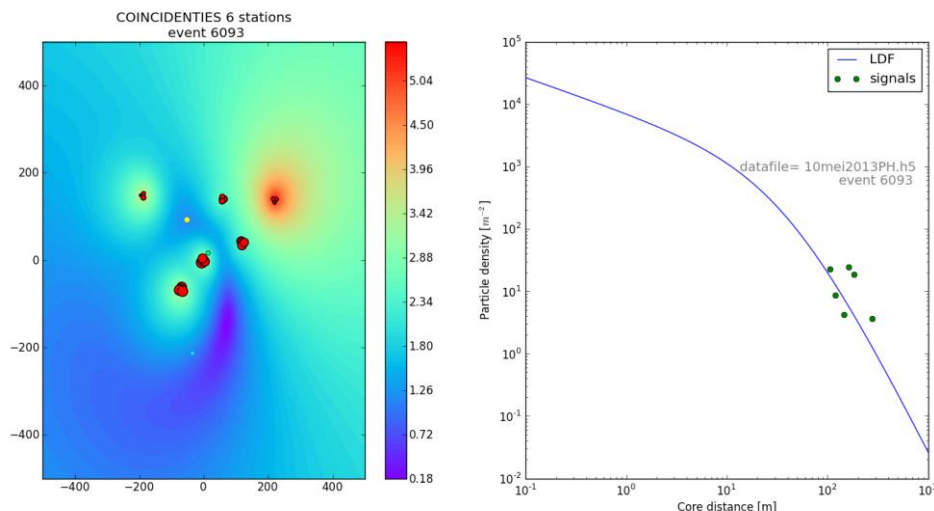
Onder de aanname dat de dominante fout in de metingen ρ_i statistisch zijn (m.a.w. normaal verdeeld) en dat $\rho(N_e, R_i)$ de correcte LDF is, dan is het argument van de som gemiddeld 1, want de teller is de verwachte variantie en de noemer is de variantie voor de Poissonverdeling. De som is dus

het aantal punten. Omdat de fit 3 parameters (drie vrijheden) heeft kan je altijd drie termen in de som nul maken. Dus χ^2 is ongeveer $n-3$ onder de gestelde condities (juiste LDF en Poisson).

Bosboom [6] heeft aangetoond dat het fitten van gesimuleerde data vaak een te kleine bij een enkel station of te grote showergrootte bij een cluster van stations opleverde, als er een realistische fout in de deeltjesdichtheid aan de simulatie werd toegevoegd. Steijger [9] heeft daartoe een aantal statistische testen vergeleken die een maat geven voor de hoeveelheid informatie die in de datapunten zit. De T_{cc} test (zie Bosboom [6]) geeft een betrouwbaarheid die afhangt van de hoogte van de T_{cc} waarde, d.w.z. hoe hoger de waarde van T_{cc} hoe betrouwbaarder de reconstructie zal zijn. Volgens Steijger [9] heeft een T_{cc} waarde > 10 een hoge waarschijnlijkheid (98%) dat de gemeten deeltjesdichtheden uit een verschillende Poisson-verdeling komen. Om dus nauwkeurige reconstructie te verkrijgen worden events geselecteerd op de waarde van de T_{cc} en het aantal stations, omdat meerdere stations ook meer meetpunten geven voor de LDF fit. (zie figuur 2.6.) Bosboom[6] richtte zich in zijn onderzoek vooral op willekeurige showers en kreeg daarbij geen goede resultaten voor de reconstructie. Om een betrouwbare reconstructie te kunnen doen, beginnen we met coïncidentie events waaraan 6 stations meedoen en selecteren we deze coïncidentie events op een T_{cc} waarde > 30 . Met deze voorwaarden krijgen we veel punten in de LDF-fit (namelijk 6) en is er een hoge betrouwbaarheid voor de reconstructie.

2.5. Resultaten LDF fit

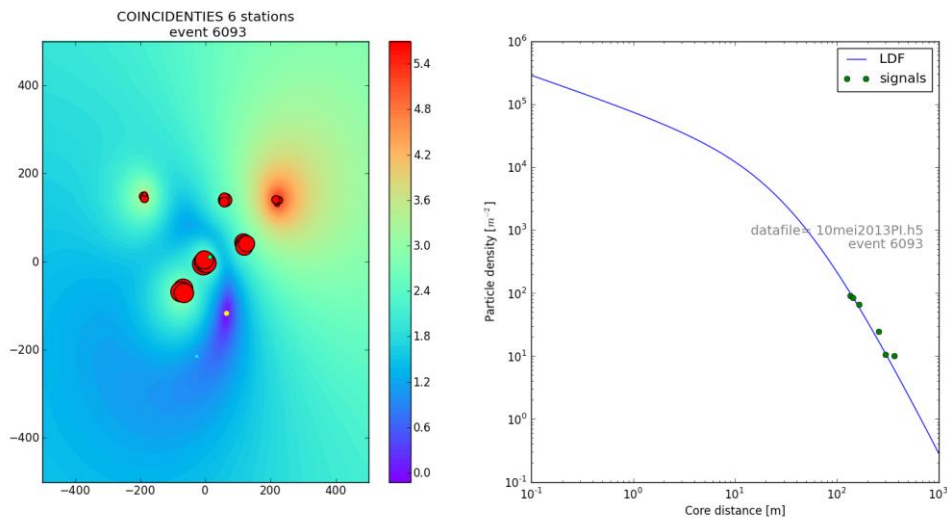
Nu de deeltjesdichtheid bepaald wordt met de exacte MIP-pieken (van de pulshoogte en pulsintegralen) kunnen we zien of er verschillen zijn tussen bepalingen van de showercore en fit van de LDF-functies. Het script van SAPPHiRE: 'core_reconstruction', geeft de gebruiker een kans om te kijken naar een uitgebreide LDF fit en het χ^2 vlak rond de showercore. Zoals uit formule 2.2 blijkt zou de showercore te vinden moeten zijn in het minimum van het χ^2 vlak. Als voorbeeld staan hieronder de figuren van hetzelfde coïncidentie event (6093, 10 mei 2013) bepaald met MIP-pulshoogte en



Figuur 2.11 LDF fit met behulp van pulshoogte.

MIP-integralen. Wat opvalt is dat het χ^2 -vlak beter gedefinieerd is bij het plaatje van de MIP bepaald met pulsintegralen (figuur 2.12). De showercore wordt bij de MIP pulsintegralen wel gevonden in het χ^2 -minimum, bij de MIP pulshoogte niet. Er zijn echter ook andere coïncidentie events waarbij de verschillen nihil zijn. Als de showercore in het minimum van het χ^2 -vlak gereconstrueerd wordt dan

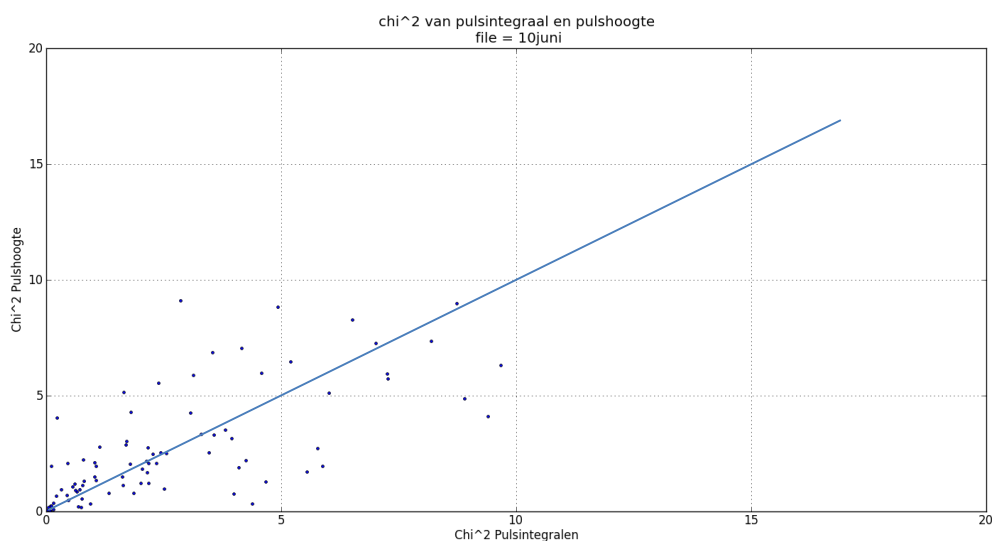
liggen de punten van de deeltjesdichtheid per station ook (beter) op de LDF-grafiek. Zie figuur 2.12; rechterplaatje.



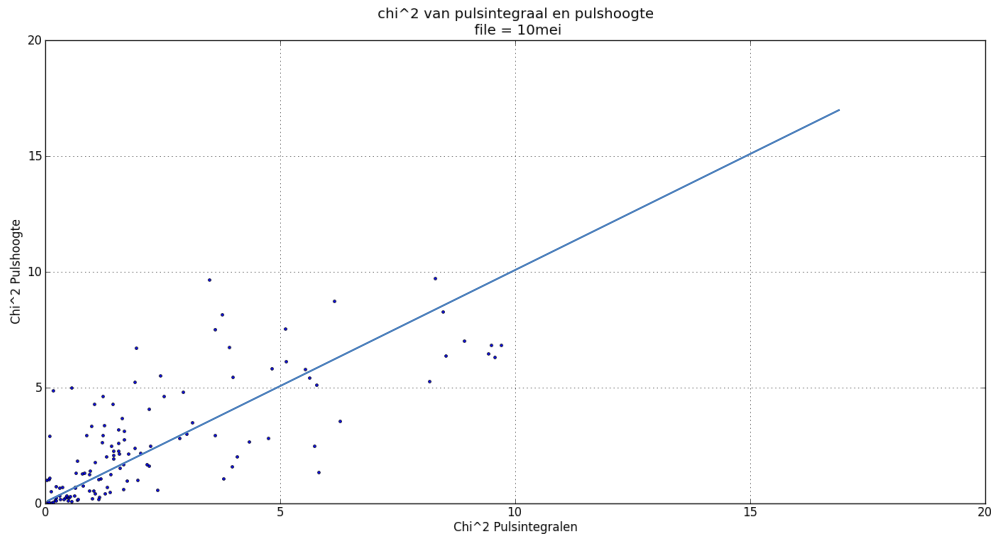
Figuur 2.12 LDF fit met behulp van pulsintegralen. Het gebied rond de showercore (gele stip) is beter begrensd dan bij figuur 2.11. De ‘beste’ positie van de showercore in het minimum (paarse gedeelte) van het χ^2 -vlak wordt nu wel gevonden.

2.6. Resultaten χ^2 : showercore reconstructie

In de vorige paragraaf is aangetoond, dat er een verschil is tussen de twee gebruikte methoden voor tenminste één van de bestudeerde coïncidentie events. Om daadwerkelijk naar de verschillen tussen de reconstructies te kijken moeten we de χ^2 -waarden voor elke showercore reconstructie met elkaar vergelijken. Daartoe zijn twee plotjes gemaakt van de twee beschikbare dagen 10 juni en 10 mei van 2013. Als één MIP-bepaling beter zou zijn dan een andere, dan zouden er in een diagram van χ^2 -pulshoogte tegen χ^2 -pulsintegralen duidelijk kleinere waarden van één methode de overhand hebben in het diagram. In figuur 2.13 is het diagram van 10 juni getoond en in figuur 2.14 het diagram van 10 mei.



Figuur 2.13 χ^2 -pulshoogte tegen χ^2 -pulsintegralen 10 juni. Er lijkt geen voorkeur te zijn voor één bepaalde MIP-bepaling aangezien de punten redelijk rondom een lijn met helling 1 te liggen.



Figuur 2.14 χ^2 -pulshoogte tegen χ^2 -pulsintegralen 10 mei. Er lijkt geen voorkeur te zijn voor één bepaalde MIP-bepaling aangezien de punten redelijk rondom een lijn met helling 1 te liggen.

Formule 2.4 en 2.5 worden gebruikt voor een vergelijking van de χ^2 -waarden van beide MIP-bepalingen.

$$s = \begin{cases} 1, & \chi_{i\ PI}^2 < \chi_{i\ PH}^2 \\ 0, & \chi_{i\ PI}^2 \geq \chi_{i\ PH}^2 \end{cases} \quad 2.4)$$

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i)}{n} \quad 2.5)$$

Waarin:

φ : de verhouding $\chi_{PI}^2 / \chi_{PH}^2$

χ_{PI}^2 : χ^2 van pulsintegralen, na showercore reconstructie

χ_{PH}^2 : χ^2 van pulshoogten, na showercore reconstructie

i : telt het aantal gebeurtenissen

Formule 2.4 geeft aan dat de twee waarden χ^2 per event (χ_{PI}^2 en χ_{PH}^2) met elkaar worden vergeleken, als $\chi_{PI}^2 < \chi_{PH}^2$, dan wordt een 1 opgeteld, anders een 0. Als de waarden van χ_{PI}^2 en χ_{PH}^2 ongeveer gelijk zouden zijn (zoals in figuur 2.13 en 2.14 te zien is), dan zou φ (formule 2.5) de waarde 0,5 hebben. Een hogere waarde dan 0,5 betekent dat het vaker voorkomt dat $\chi_{PI}^2 < \chi_{PH}^2$ en dat de reconstructie beter verloopt als MIP op basis van pulsintegralen wordt gebruikt. In tabel 2.2 staan de resultaten voor 10 mei en 10 juni.

Uit tabel 2.2 blijkt dat φ in alle gevallen groter is dan 0,5 met hoge waarden bij de coïncidenties van 6 stations. Er moet wel opgemerkt worden dat het aantal events met 6 stations erg klein is, zodat elk event een grote bijdrage levert aan de berekening van φ . Toch is φ in alle gevallen groter dan 0,5 en is er dus een betere reconstructie mogelijk als de MIP van de pulsintegraal wordt bepaald.

	φ (6 stations)		φ (5 stations)		φ (4 stations)	
10 juni	0.604	89%	0.617	93%	0.593	99,8%
# events	43		115		386	
10 mei	0.610	89%	0.516	63%	0.581	99,5%
# events	41		153		420	

Tabel 2.2 overzicht φ en aantal events voor de twee datafiles. De coïncidenties waarbij 6 stations betrokken zijn, hebben een hoge verhouding χ^2_{PI} , χ^2_{PH} wat betekent dat de χ^2_{PI} een betere reconstructie geven van de showercore en dus ook een betere LDF fit geven. Het betrouwbaarheidsinterval is ook gegeven.

2.7. Conclusie

Bij de vergelijking tussen de reconstructie met behulp van twee verschillende MIP-methoden blijken er verschillen te zijn tussen de kwaliteit van de reconstructie, zoals te zien is in tabel 2.2. De methode waarbij de MIP bepaald wordt met de pulsintegralen lijkt betere reconstructies te leveren en in bepaalde gevallen wel de showercore in het minimum van het χ^2 vlak te plaatsen. In tabel 2.2 is te zien dat φ in alle gevallen groter is dan 0,5, wat een voorkeur voor de MIP-bepaling met pulsintegralen betekent. Dit onderzoek moet nog verder uitgebreid worden met coïncidenties waarbij minder stations betrokken zijn. Ook moeten er grotere datafiles over langere perioden bekeken worden om een over een gebruikte bepaling van MIP-waarden te kunnen geven.

2.8. Referenties

- [1] Fokkema, D.B.R.A. (2012) *The HiSPARC Experiment; data acquisition and reconstruction of shower direction*, PhD Thesis
- [2] Pennink, D. (2010) *Analyse van het pulshoogte histogram*, LIO jaarverslag 2009/2010
- [3] Bartels, R.T. (2012) *The HiSPARC experiment, an analysis of the MPV and the number of events per unit time*, Bachelor Research Thesis. FOM-Nikhef
- [4] Montanus, H. (2010) *De detectie van kosmische straling*, LIO jaarverslag 2009/2010
- [5] Steijger, J.J.M. (2011) *Energy reconstruction in HiSPARC, an exploration of the field*, internal document, Nikhef, HiSPARC
- [6] Bosboom, N. (2012) *Energie-reconstructie in een Monte Carlo simulatie*, LIO jaarverslag 2009/2010
- [7] Apel W.D. et al. (2006) ‘*Comparison of measured and simulated lateral distributions for electrons and muons with KASCADE*’. *Astroparticle Physics*, 24:467–483, 2006.
- [8] Steijger, J.J.M. (2013) *Energy reconstruction in HiSPARC, step 3: the LDF function and its measurement by HiSPARC*, internal document, Nikhef.
- [9] Steijger, J.J.M. (2012) *Energy reconstruction in HiSPARC, step 2: information content of the LDF*, internal document, Nikhef.
- [10] Kok, M. (2008) *Bepaling van de energie en richting van het primaire deeltje op de HiSPARC website*. Stageverslag, master applied physics, Universiteit Twente.
- [11] Lam, C. B. *Bachelor Thesis: to be published* (2013)

3. Kosmische stralen en bliksem

Matthijs van Vulpen

3.1. Theoretische achtergrond

3.1.1. Bliksem

In tegenstelling tot wat algemeen wordt aangenomen, zijn er nog veel vragen over wat bliksem veroorzaakt. Benjamin Franklin was een van de eerste mensen die onderzocht wat bliksem precies was toen hij in 1752 een vlieger met daaraan een metalen sleutel oplet in een onweerswolk. De sleutel verbond hij met de vlieger door een geleidend touw, terwijl Franklin de vlieger vasthield met een droog, niet geleidend lint. Franklin bracht de sleutel daarna in contact met een Leidse fles. Toen deze een uitslag vertoonde, liet Franklin zien dat de sleutel elektrisch geladen was.

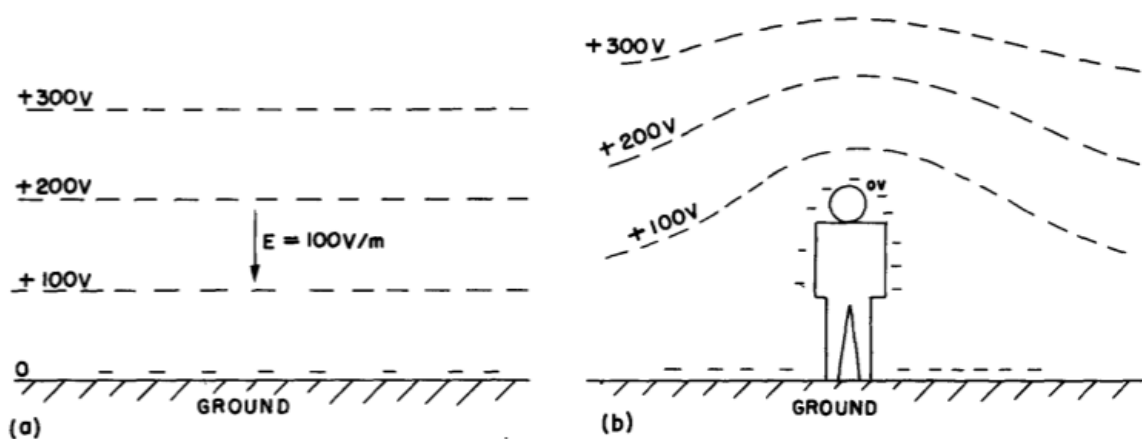


Figuur 3.1 Franklin met zijn vlieger experiment

Franklin toonde aan dat bliksem inderdaad een elektrische ontlading is: een grote ontdekking, gezien het feit dat in deze periode pas de eerste experimenten met elektriciteit werden gedaan. Toch kon Franklin niet achterhalen wat bliksem veroorzaakt. Wij weten dat nog steeds niet.

3.1.2. Wat we wel weten

Op aarde heerst een elektrisch veld van ongeveer 100 volt/m. Hoe hoger in de atmosfeer, des te zwakker dit veld. Het totale potentiaal verschil tussen de oppervlakte van de aarde en de bovenkant van de atmosfeer ligt rond de 400.000 volt. De lucht is een slechte geleider, zodat er slechts een kleine stroom stroomt, van ongeveer 10 milliampère per vierkante meter. De geladen deeltjes komen van onder andere luchtmoleculen die geïoniseerd zijn.



Figuur 3.2 Het potentiaalverschil op aarde. (Bron: Feynman lectures)

In de eerste instantie werd gedacht dat de ionisatie van de lucht werd veroorzaakt door de radioactiviteit van de aarde. Dan zou men verwachten dat hoe verder men van het aardoppervlak is, des te minder geïoniseerde deeltjes er zouden zijn. Echter in 1912 ontdekte Victor Hess dat de ionisatie juist toeneemt bij grotere hoogtes. Deze ontdekking leidde tot de aanname van kosmische straling: deeltjes uit de ruimte zorgen voor ionen in de atmosfeer van de aarde. Gezien er meer ionisatie plaats vindt verder weg van het aardoppervlak en doordat de atmosfeer daar ijler is, kunnen geladen deeltjes hoger op meer en vrijer bewegen dan dicht bij het aardoppervlak. Dit heeft tot gevolg dat de elektrische geleidbaarheid hoog in de atmosfeer groter is dan dicht bij de grond.

De totale positieve elektrische stroom die het negatieve aardoppervlak bereikt is vrijwel constant en is rond de 1800 ampère. Met een totaal potentiaal verschil van 400.000 volt bereikt er dus op elk moment een vermogen van zo een 700 megawatt de aarde. Men zou verwachten dat de aarde dan binnen enkele ogenblikken zou ontladen. Toch is dat niet het geval en blijft het potentiaalverschil intact. Er moet dus een bron zijn die van de top van de atmosfeer naar de oppervlakte van de aarde stroomt en de aarde negatief geladen houdt. Dit is wat – één op de tien - bliksems doen: deze draagt negatieve lading naar de aarde en houdt zo het potentiaalverschil tussen de aarde en de atmosfeer intact. In dit opzicht werkt bliksem als een soort batterij.

Over hoe deze batterij precies werkt is nog erg weinig bekend. Wel is bekend dat luchtstromen, waterdruppels en ijsdeeltjes ervoor kunnen zorgen dat positieve en negatieve geladen moleculen scheiden en dat de ijsdeeltjes een lading krijgen als ze met elkaar botsen. Aangevoeld is dat kleine ijsdeeltjes hierbij positief worden geladen en grotere ijsdeeltjes negatief. De kleine deeltjes worden door luchtstromen hoog in een wolk gebracht, terwijl de zwaardere deeltjes door de zwaartekracht onderin een wolk blijven. Hierdoor ontstaat er een elektrisch veld in de wolk. Een bliksem ontlading ontladend dit veld: bliksem is grofweg een grote vonk die net als een stroomdraad naar de aarde van een elektrisch circuit springt. Alleen is hier de stroomdraad de geladen wolk, en de aarde is hier de grond. Ontladingen kunnen ook in de wolk zelf plaatsvinden.

3.1.3. Wat we nog niet weten

Een bliksem is dus een elektrische ontlading in of vanuit een onweerswolk. De ontlading kan naar de grond, naar een andere wolk, naar een andere plek in de wolk of naar de open lucht gaan. Hoewel

meerder details van dit proces niet duidelijk zijn, ligt de grootste vraag in wat de vonk in de eerste plaats ontsteekt: de elektrische velden die in de wolken heersen zijn te zwak om spontaan te ontladen. Bekend is dat om een ontlading teweeg te brengen er een elektrisch veld van rond de 3 MV/m nodig is. Zulke sterke velden zijn nog niet in onweerswolken waargenomen. Veldsterktes in onweerswolken variëren van 130 kV/m tot in extreme gevallen 500 kV/m. Dus hoe kan een ontlading plaats vinden?

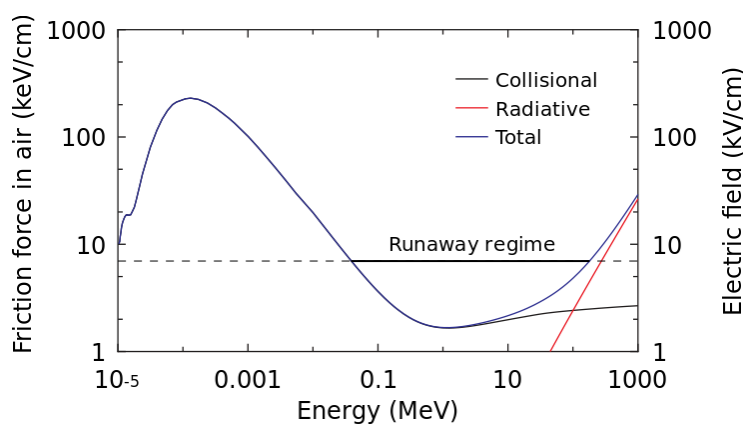
3.2. De hypothese

Er zijn meerdere theorieën die proberen te verklaren wat een bliksemontlading kan initiëren. Een gangbare theorie zegt dat er willekeurige maar sterke fluctuaties kunnen plaatsvinden -veroorzaakt door ijskristallen- die de weg voor een ontlading vrij maken. Dat die sterke veldsterktes niet gemeten zijn kan te maken hebben met hoe de veldsterktes gemeten worden: met een veldmeter aan een ballon. De kans dat een ballon met een meter op de juiste plek op het juiste moment is, is natuurlijk erg klein.

Een andere theorie betreft kosmische straling –hoogenergetische deeltjes uit de ruimte die de aarde continue bombarderen– bij blikseminitiatie. Deze deeltjes kunnen luchtmoleculen ioniseren en elektronen vrijmaken als ze met luchtmoleculen in botsing komen. Gebeurt dit in een onweerswolk, dan worden de vrijgemaakte elektronen door het aanwezige elektrische veld versneld, en op hun beurt meer elektronen vrijmaken. Dit proces – *runaway breakdown*– zou bliksem kunnen initiëren.

3.3. Runaway Breakdown

Runaway breakdown is een theorie van blikseminitiatie dat het eerst door Alex Gurevich is beschreven in 1992. *Runaway breakdown* komt op het volgende neer. Elektronen kunnen ongeveer 1 cm vrij bewegen in lucht; elektronen die zich voortplanten met een snelheid die tegen de snelheid van het licht ligt kunnen tot ongeveer een meter komen. Door deze langere weg kunnen de elektronen versneld worden door het elektrisch veld in de wolken, zodat ze een energie krijgen die vele malen hoger ligt dan normale vrije elektronen. Als deze hoogenergetische elektronen met luchtmoleculen botsen, dan worden andere hoogenergetische elektronen vrijgemaakt: deze kunnen op hun beurt nog meer hoogenergetische elektronen vrijmaken. Op deze manier ontstaat er een lawine van losgemaakte hoogenergetische elektronen, oftewel een *runaway breakdown*.



Figuur 3.3 Runaway breakdown

Gurevich stelt dat deze elektronen lawine de oorzaak is van de elektrische ontlading in een onweerswolk. Echter er is een hoogenergetisch elektron nodig dat dit *runaway* proces start. Volgens Gurevich komt dit hoogenergetisch deeltje uit de ruimte.

3.4. Het onderzoek

Het HiSPARC project is een middelbaar school project dat leerlingen laat deelnemen aan een echt astrofysisch onderzoek naar kosmische straling. Op het dak van hun school installeren leerlingen zelf een aantal detectorplaten die een deeltjes regen -die wordt veroorzaakt door een hoogenergetisch kosmisch deeltje- registreert. De data worden via een internet verbinding naar een publiekelijk toegankelijke database gestuurd, waar leerlingen analyses op kunnen loslaten. Vooralsnog zijn er 7 clusters met samen meer dan 100 stations.

Dit goed werkend netwerk dat kosmische straling registreert, leent zich uitstekend voor onderzoek naar de correlatie tussen kosmische straling en bliksemontladingen.

3.5. Werkwijze

3.5.1. Deel 1: Samen met HiSPARC

Om de plaats van een bliksem ontlading te bepalen maakt het HiSPARC project gebruik van de Boltek LD-250 *Long Range* bliksem detector. De detector meet elektromagnetische straling in het (korte golf) radio gebied.



Figuur 3.4 De Boltek LD-250 bliksem detector en antenne

De LD-250 meet drie elementen van een bliksem ontlading, namelijk een gecorrigeerde afstand naar de ontlading (0 -300 mijlen), een ongecorrigeerde afstand (0 – 300 mijlen) en de hoek van de ontlading ten opzichte van de detector (000,0 – 359,9 graden). Daarnaast registreert de detector ruis en kan de frequentie en een waarschuwing afgeven als de ontlading dichtbij heeft plaatsgevonden.

De output van de detector wordt gegeven door een code met de volgende structuren:

\$WIMLI,<ddd>,<uuu>,<bbb.b>*<cs><cr><lf>

<ddd> - corrected strike distance 0-300 miles
<uuu> - uncorrected strike distance 0-300 miles
<bbb.b> - bearing to strike 000.0-359.9 degrees
<cs> - checksum in hex
<cr> - carriage return
<lf> - line feed

\$WIMLN*<cs><cr><lf>

<cs> - checksum in hex
<cr> - carriage return
<lf> - line feed

\$WIMST,<ccc>,<sss>,<ca>,<sa>,<hhh.h>*<cs><cr><lf>

<ccc> - close strike rate 0-999 strikes/minute
<sss> - total strike rate 0-999 strikes/minute
<ca> - close alarm status (0: not active, 1: active)
<sa> - severe alarm status (0: not active, 1: active)
<hhh.h> - current heading from GPS or compass
<cs> - checksum in hex
<cr> - carriage return
<lf> - line feed

\$WIMLI geeft aan dat de code die volgt betrekking heeft op de bliksem ontleding; \$WIMLN duidt de ruis aan en \$WIMST de zogenaamde status van de detector. Bij het wegschrijven van de data kan door deze aanduiding de code geordend worden.

De *checksum in hex* dient als een controle om te kijken of elk karakter dat de detector geeft ook geregistreerd wordt. Om de *checksum in hex* te bepalen worden de tekens van de code omgerekend in hun decimale waarde, bij elkaar opgeteld en vervolgens de modulus waarde van 256 genomen. De uitkomst wordt tot slot omgezet in *hex*. Bijvoorbeeld om de *checksum* van \$WIMST,0,0,0,0,000.0*42 om te zetten in *hex* wordt elk karakter, zonder de asterisk maar met de komma's en punt omgerekend naar hun decimale waarde en opgeteld. Dit komt op 1090. De modulus waarde van 256 over 1090 geeft 66. Omgezet in *hex* wordt dit getal 42.

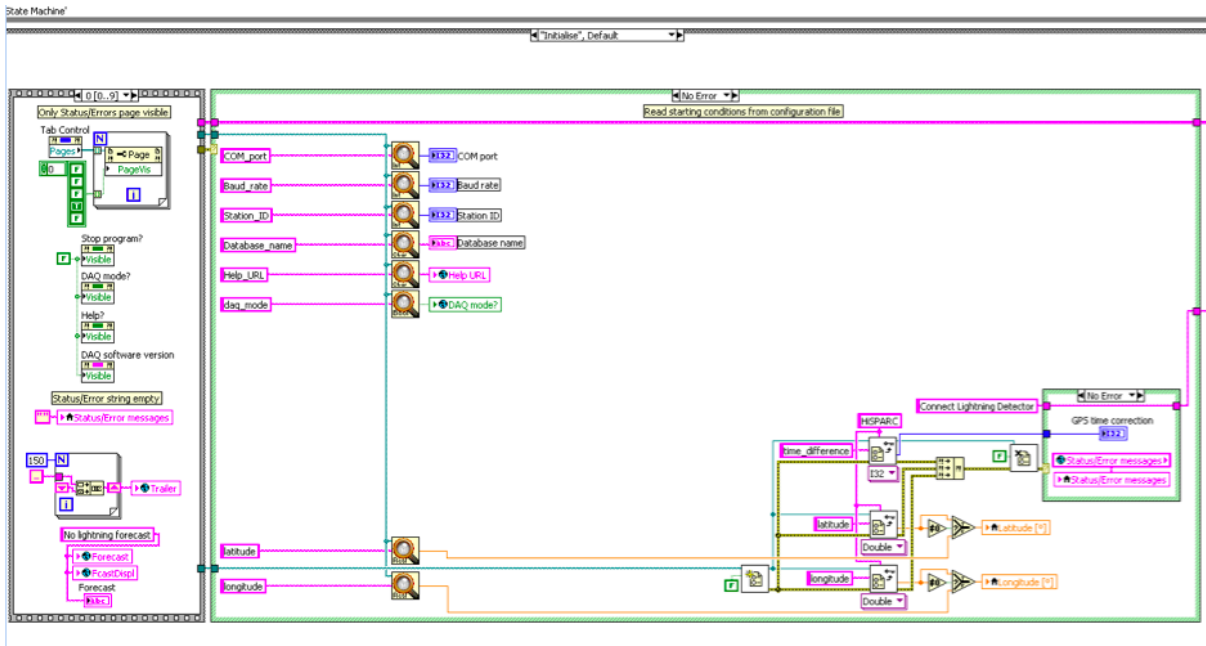
De *carriage return* en *line feed* dienen om het einde van de signaal code aan te duiden.

3.5.1.1. Registratie van de bliksemgegevens: LabView

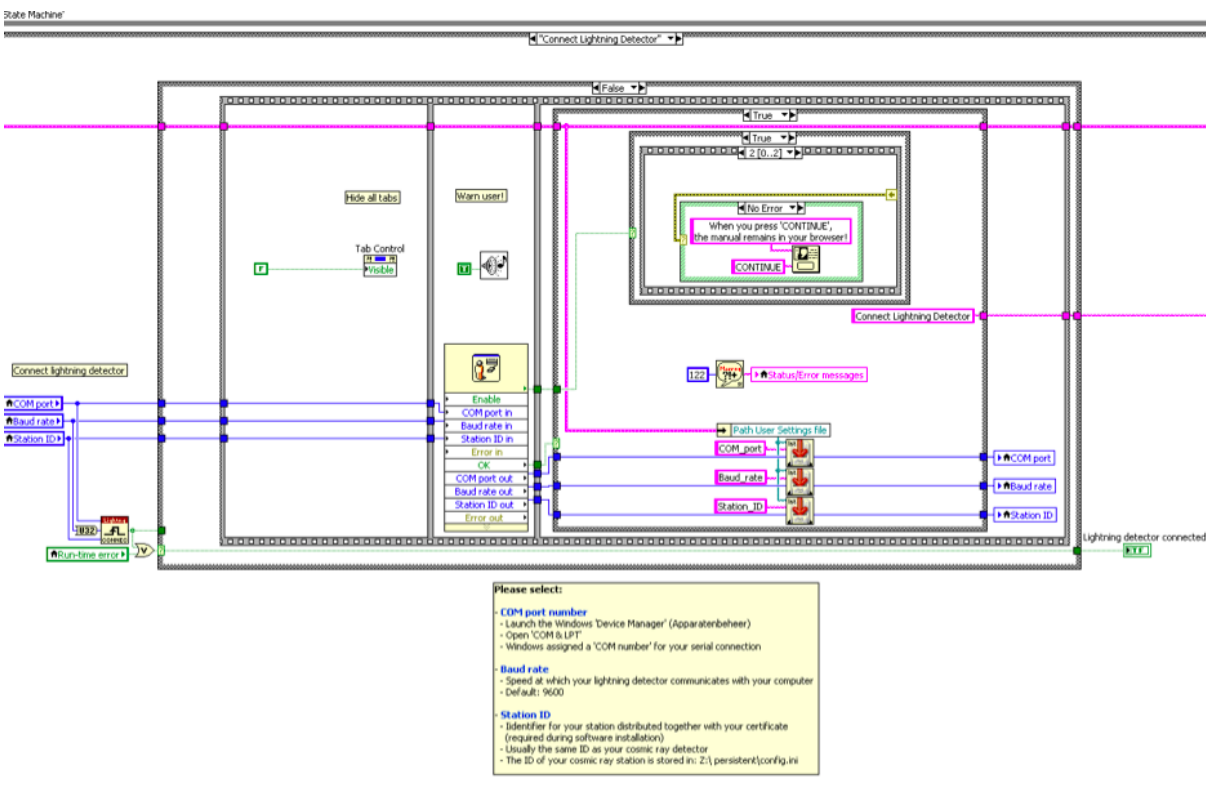
Om de data van de bliksem detector weg te schrijven en geschikt te maken voor opslag wordt gebruikt gemaakt van *LabView*. *LabView* is een grafische programmeeromgeving dat ontwikkeld is door National Instruments. Met *LabView* kunnen programma's geschreven worden die onder andere meetinstrumenten besturen en data verzamelen. Voor de bliksemdetectie met HiSPARC is een *LabView* omgeving ontwikkeld waarmee via een frontpaneel de Boltex LD-250 bestuurd en afgelezen kan worden. Voor de tijdsbepaling wordt een GPS ontvanger gebruikt, die in de zogenaamde *over determined clock mode* staat. De GPS module heeft zijn eigen positie bepaald en richt zich dan alleen op het meten van de tijd.

Verder bereidt het programma de data code zo voor, dat de bliksem data in de HiSPARC database kan worden opgeslagen en kan worden geanalyseerd. Dit gaat als volgt te werk

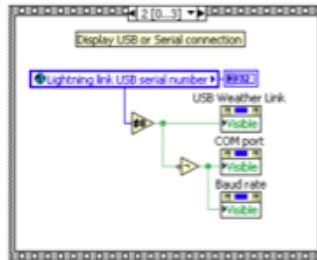
Stap 1 Initiëren



Stap 2 Verbinden met bliksem detector



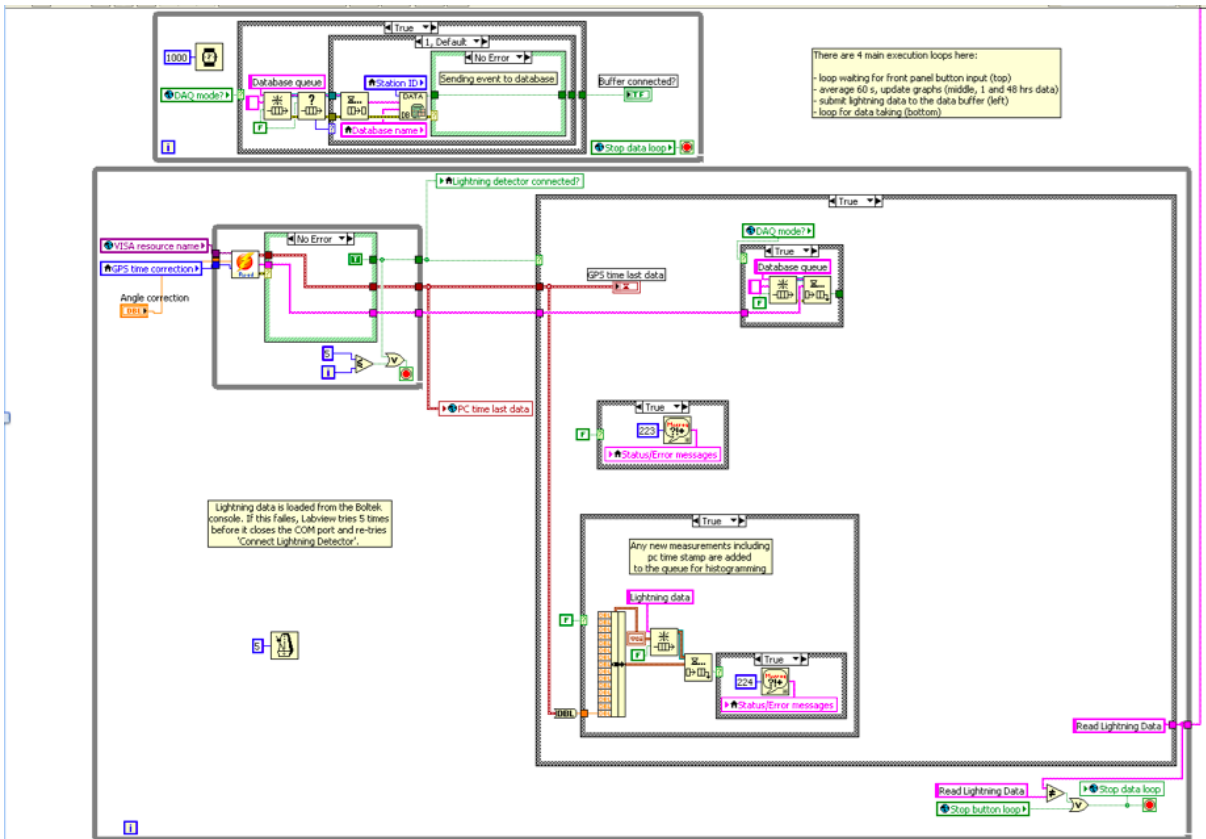
Stap 3 Set parameters



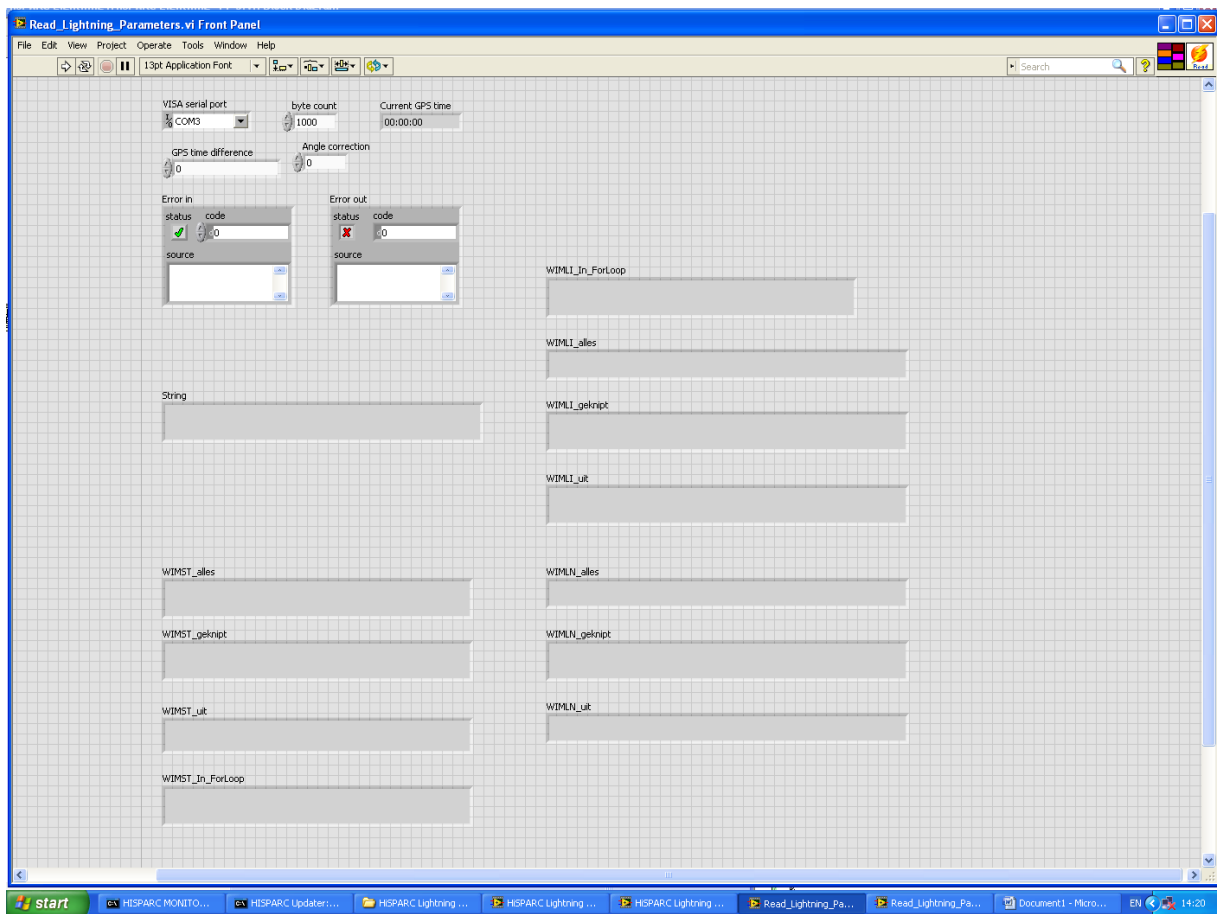
Read Lightning Data

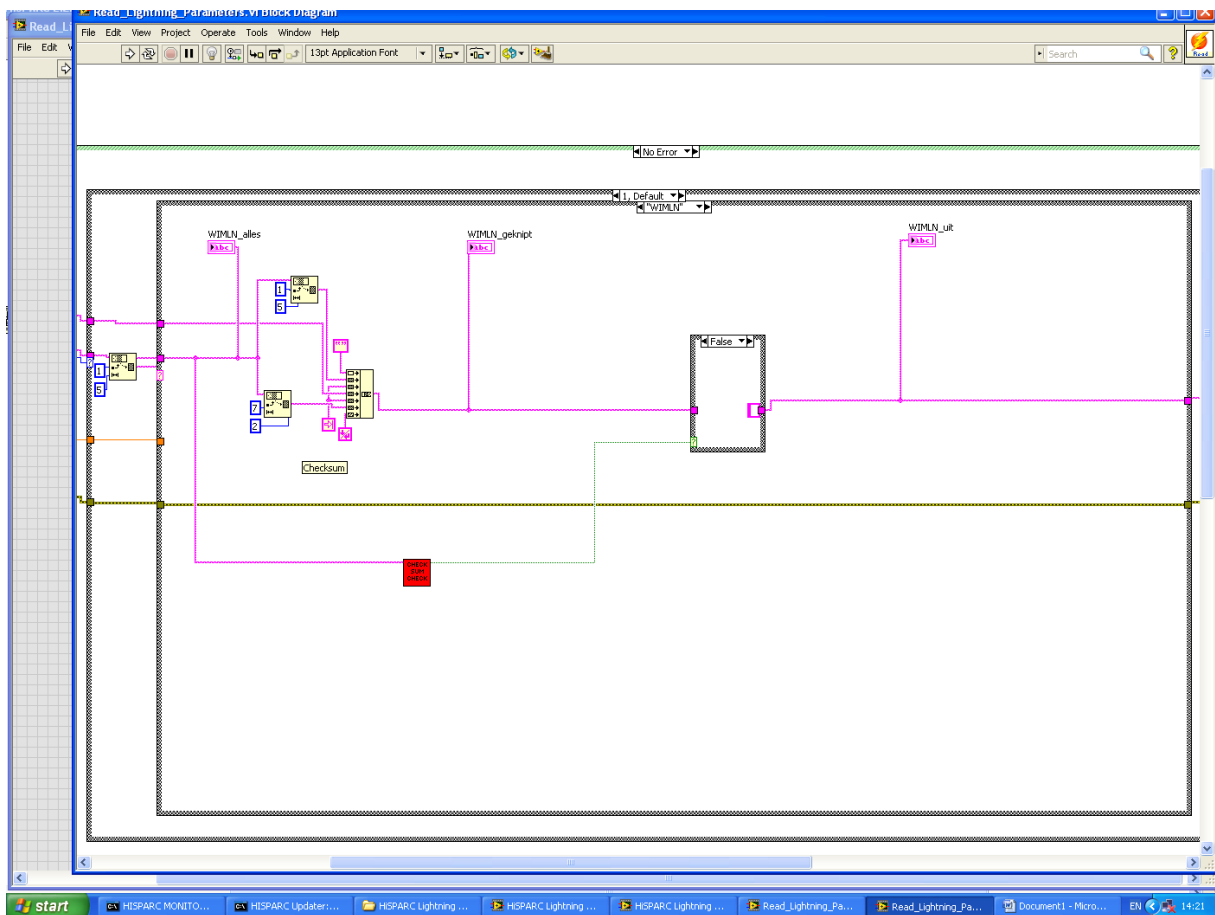
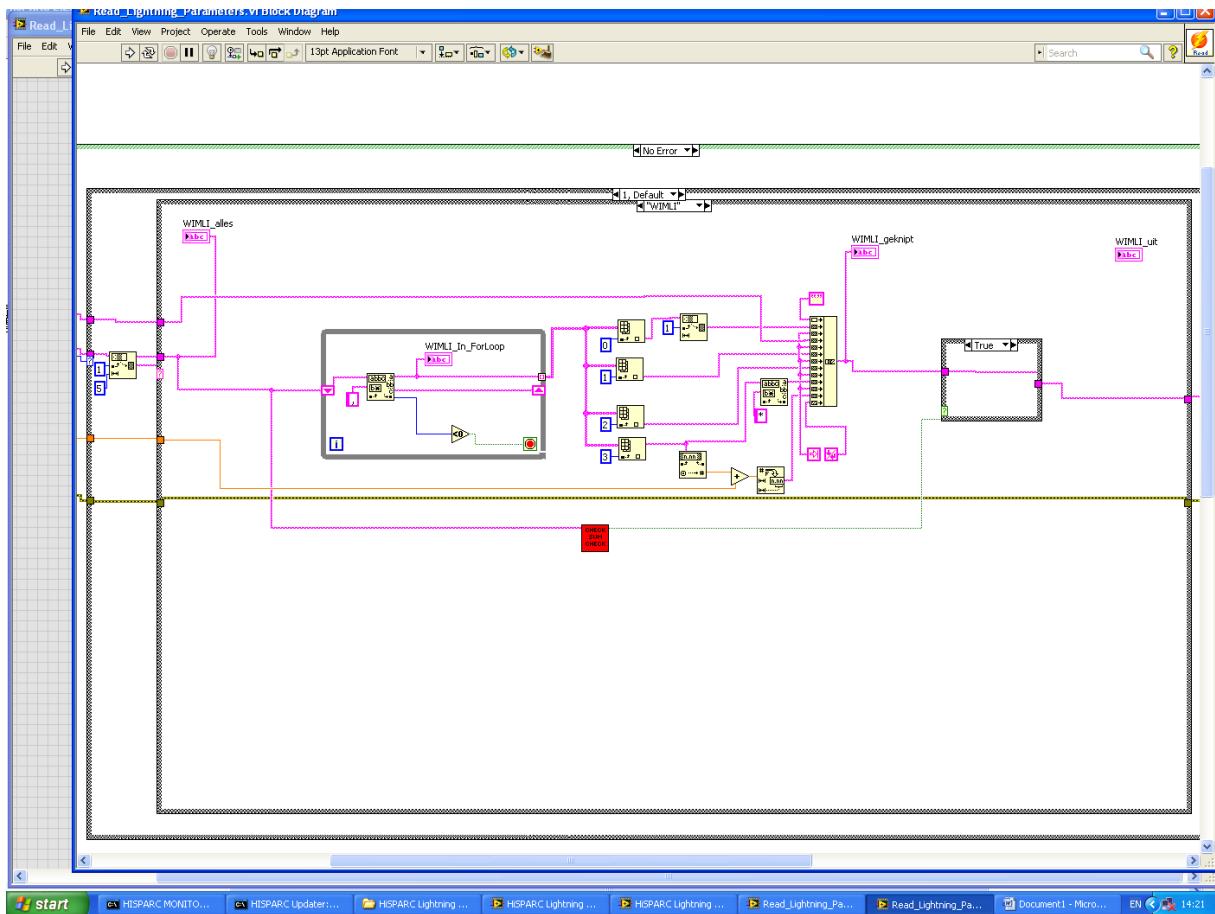
Latitude [°]
[Ctrl] [Enter]
Longitude [°]
[Ctrl] [Enter]

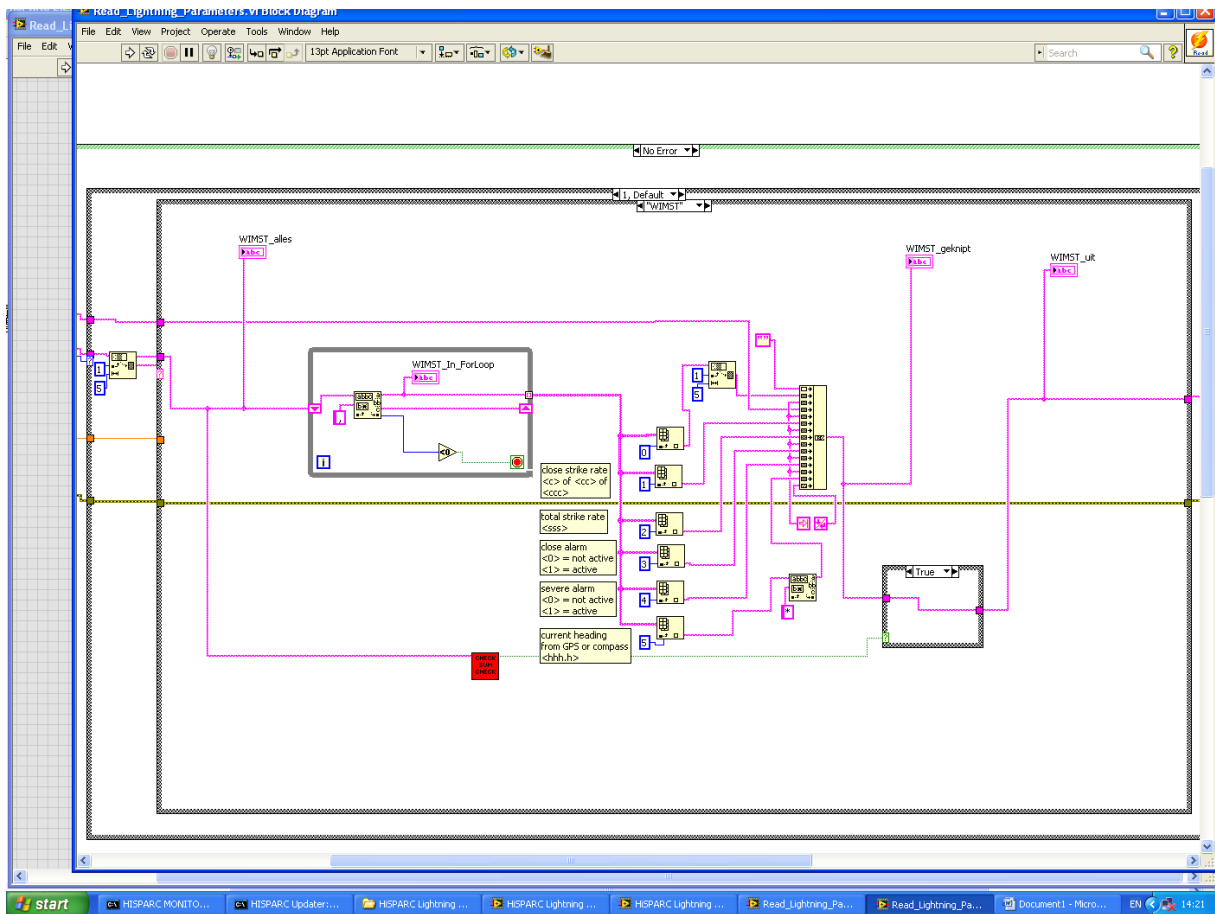
Step 4: Read detector



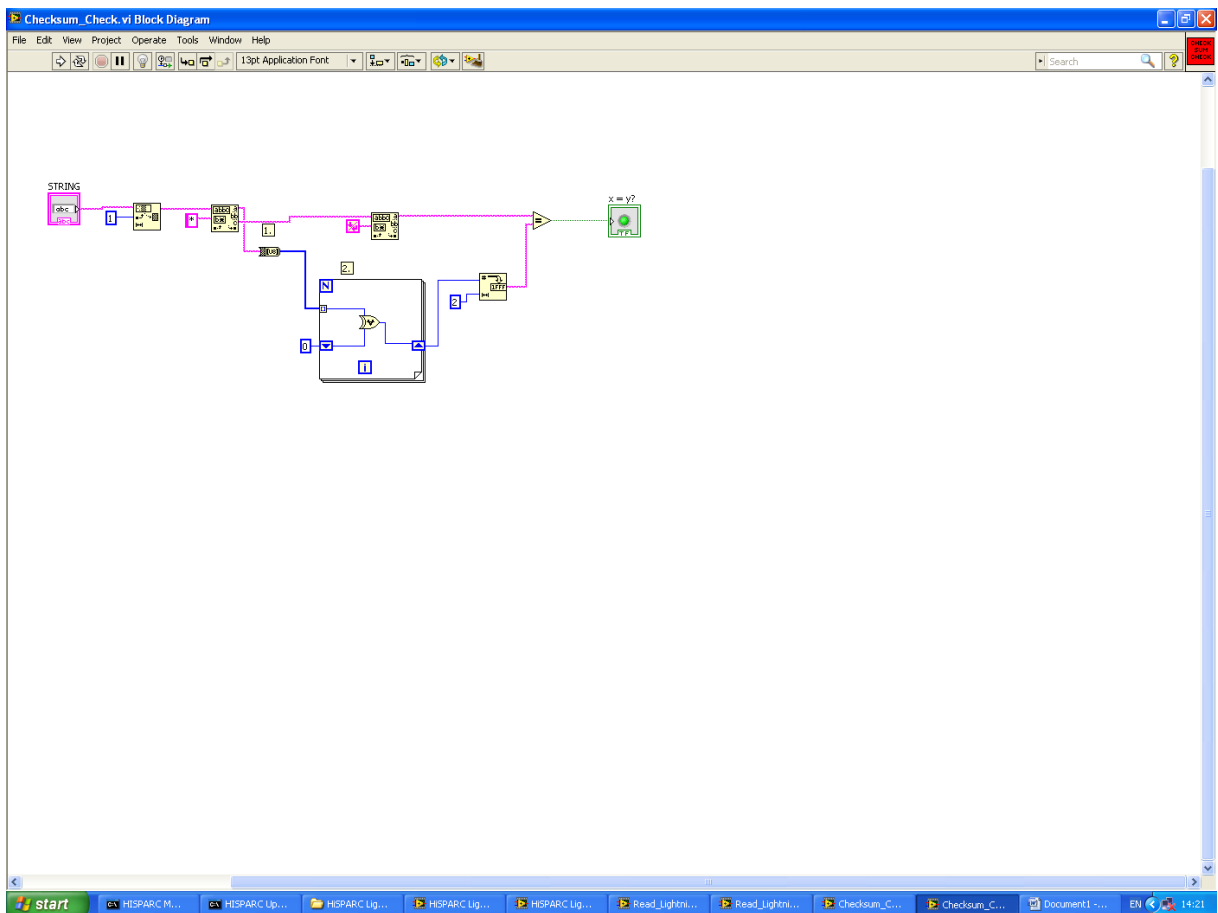
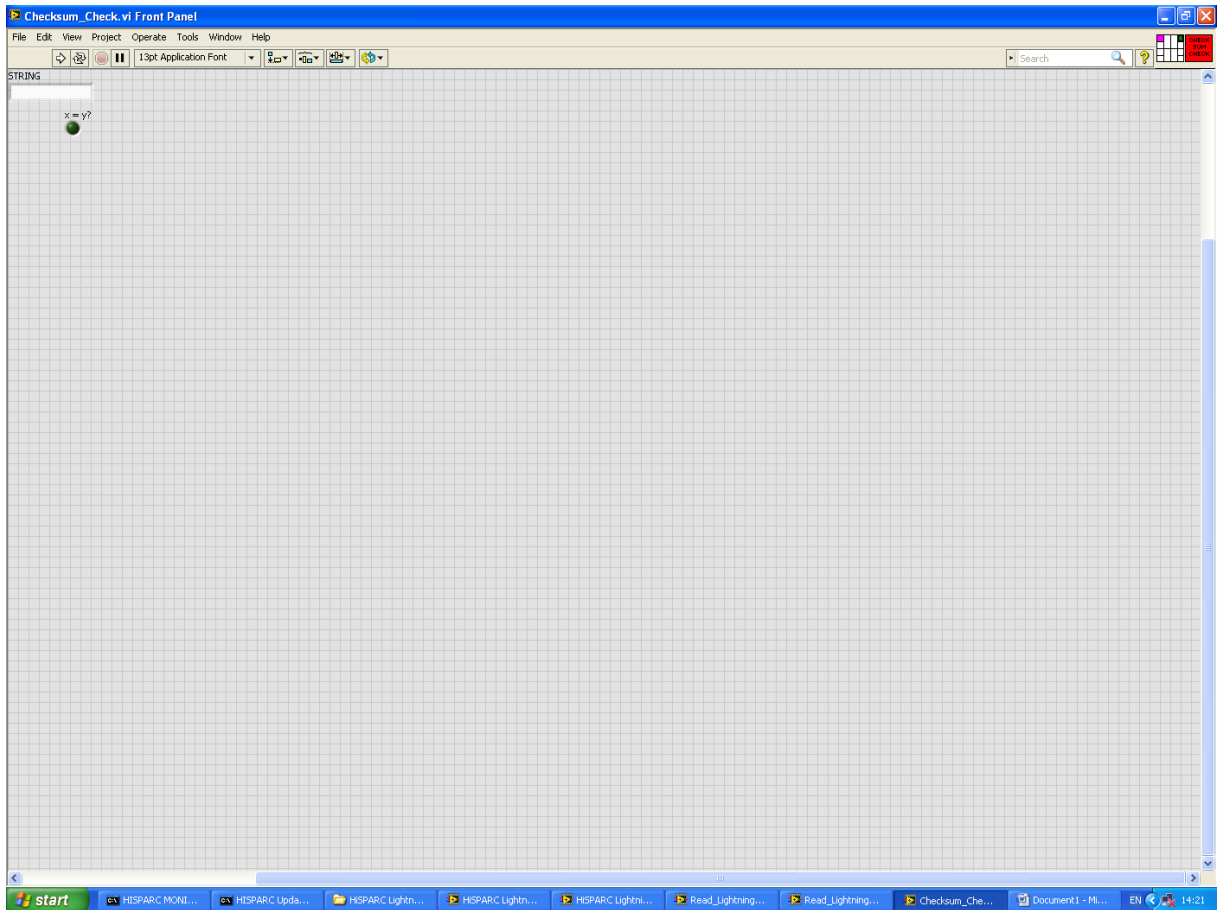
Step 5: Read lightning parameters



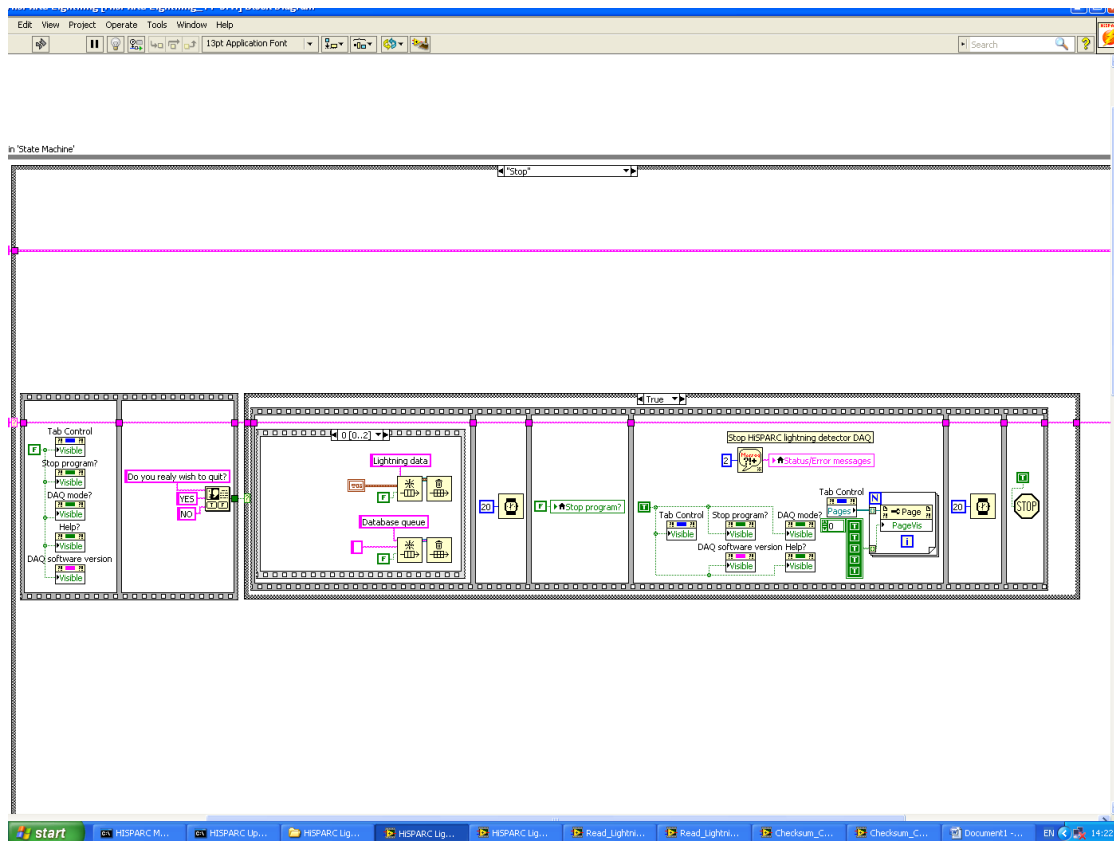




Step 6 Check checksum



Stap 7 Stop



3.5.1.2. Plaatsing van de detector

Gezien het grote bereik van de bliksem detector – meer dan 300 km – zijn drie stuks voldoende om de bliksem ontladingen in Nederland te registreren. Vooral nog is de planning om een detector bij een HiSPARC station te plaatsen in Amsterdam, Eindhoven en Groningen.

3.5.1.3. Status

Het LabVIEW programma werkt naar behoren, wat wil zeggen dat via een PC de detector aan te sturen is, data in de gewenste vorm kan worden binnengehaald en kan worden opgeslagen in de HiSPARC database.

Wat nog gedaan moet worden is een *stand-alone* versie van het programma te programmeren, zodat ze zonder installatie van LabVIEW op de gewenste HiSPARC PC's kunnen draaien.

3.5.2. Deel 2: Samen met het KNMI

3.5.2.1. KNMI

Het KNMI beschikt samen met de Koninklijke Luchtmacht over een bliksemdetectiesysteem, waarmee de ontladingen en inslagen in kaart worden gebracht. Momenteel doet het KNMI geen wetenschappelijk onderzoek aan bliksem: het KNMI meet alleen de frequentie, tijdstip, enkele parameters zoals de veldsterkte en de flux en de locatie van de ontladingen. Zet zo nodig zet het KNMI een onweerswaarschuwing uit.

Van 1995 tot in 2003 gebruikte het KNMI het SAFIR (Surveillance et Alerte Foudre par Interférométrie Radioélectrique) systeem, ontwikkeld door *Dimensions SA* in Frankrijk. Sinds 18 december 2003 gebruikt het KNMI het bliksemdetectie systeem FLITS. FLITS (Flash Localisation by Interferometry and

Time of arrival System) is een verbetering van SAFIR, zowel van de hardware als van de software. In het FLITS systeem kunnen de signalen die door de LF-antenne opgevangen worden ook gebruikt worden voor een extra plaatsbepaling op basis van aankomsttijd. Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België gebruikt ook SAFIR, alleen worden niet alleen tijdstip en locatie van de ontladingen bepaald, maar ook de stroomsterkte.

Het KNMI heeft 7 antennes op een hoogte van 20 meter, 4 in Nederland en 3 in België. De antennes opereren binnen VHF (100 MHz) en ze meten de locatie en de tijd door middel van kruispeiling met minimaal 2 stations. De antennes meten ook de kleinere ontladingen en ontladingen in de wolken. De output is in HDF formaat met de locatie (longitude en latitude), de tijd (in ms) en enkele parameters van de ontlading (veldsterkte, flux). Daarnaast gebruikt het KNMI detectoren die opereren in het laag frequentie gebied. Dit zijn open condensatoren die met de lucht reageren. Zij zijn minder nauwkeurig en werken alleen bij grote ontladingen.



Figuur 3.5 De bliksem detectie meetopstelling van het KNMI. Bron: KNMI

De gegevens komen binnen in computers in De Bilt en Ussel, waar een actueel overzicht wordt gemaakt van de geografische spreiding van de onweersactiviteit. Alle gegevens worden ook opgeslagen. Het KNMI heeft hun bliksem data sinds 2004 aan het HiSPARC project beschikbaar gesteld.

3.5.2.2. Aan de slag met de KNMI data

De grote hoeveelheid data die het KNMI beschikbaar heeft gesteld biedt de mogelijkheid om vanaf 2004 op zoek te gaan naar correlaties tussen bliksemontladingen en deeltjeslawines die in die periode door HiSPARC zijn gemeten. Om op zoek te gaan naar deze correlaties zijn de alleen de

locatie en tijd van de bliksemontlading van belang. Deze gegevens kunnen door een Python script met de door HiSPARC gemeten deeltjeslawines worden vergeleken.

3.5.2.3. Het script

Het script importeert de lengte- en breedtegraden en de tijdstempels van de bliksem ontladingen uit de KNMI gegevens. Ook wordt de HiSPARC data geladen. Het script begint dan met te analyseren welke HiSPARC stations binnen de aan te geven marge van de ontladingen bevinden. Als er één of meerdere stations binnen de aangegeven straal van de ontlading zijn, wordt gekeken of er door één van die stations een deeltjeslawine is gemeten met eenzelfde tijdstempel als de bliksemontlading. De bliksemontladingen worden door het KNMI gemeten in UTC tijd; die van HiSPARC in GPS tijd. De nauwkeurigheid van de KNMI tijdsmetingen is in microseconden en die van HiSPARC in nanoseconden.

```
import datetime

import hisparc_data
import knmi_lightning
import knmi_timestamps
import get_close_stations

def main():
    """Do the search for correlations between lightning strikes and events"""
    start = datetime.date(2011, 9, 10)
    stop = datetime.date(2011, 9, 10)
    station_ids = get_close_stations.get_station_ids(start)

    # This should be in the for loop and start should be date.
    # But for better performance, it is not yet..
    stations = get_close_stations.get_station_positions(station_ids, start)

    for date in daterange(start, stop):
        lgt_file = knmi_lightning.data_file(date)
        his_file = hisparc_data.data_file(date)

        discharges = knmi_lightning.discharges(lgt_file)
        for discharge in discharges:
            matches = []
            close_station_ids = get_close_stations.find_close_stations(discharge,
stations, radius=1500)
            for station_id in close_station_ids:
                events = hisparc_data.events_table(his_file, station_id)
                matched_events = hisparc_data.events_in_range(events,
discharge['timestamp'])
                matches.append([station_id, matched_events['ext_timestamp']])
            if len(close_station_ids) > 0:
                print "Discharge:", discharge
                print "Close stations: ", close_station_ids
                print "Matching events: ", matches

        lgt_file.close()
        his_file.close()

def daterange(start, stop):
    """Generator for date ranges

    This is a generator for date ranges. Based on a start and stop value,
    it generates one day intervals.

    :param start: a date instance
    :param stop: a date instance
```

```

:yield date: one day intervals between start and stop
"""
if start == stop:
    yield start
    return
else:
    yield start
    cur = start
    while cur < stop:
        cur += datetime.timedelta(days=1)
        yield cur
    return

if __name__=="__main__":
    main()
    print 'Done'

```

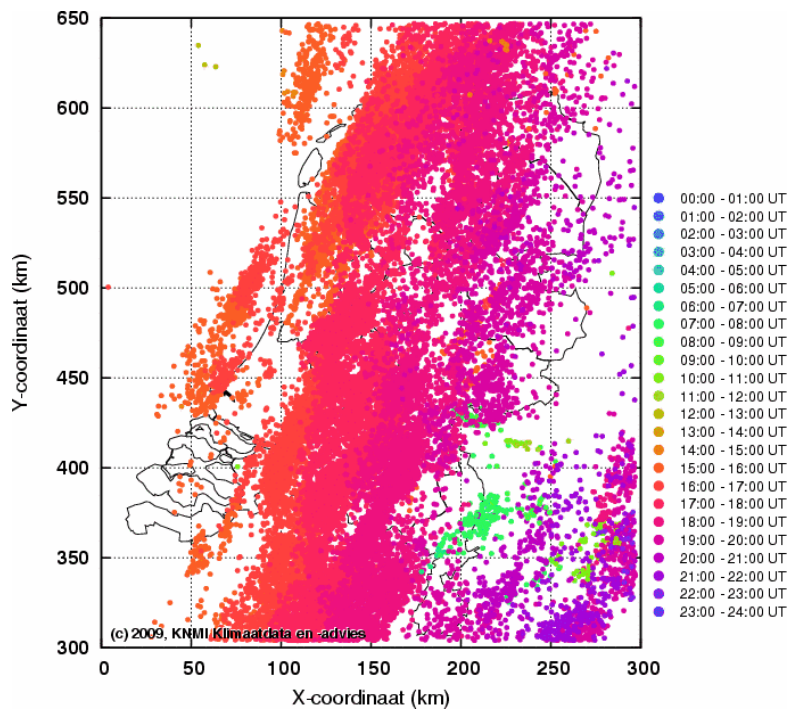
3.5.2.4. Voorbeeld van een meetresultaat: KNMI bliksemdata van 10 september 2011.

```

$ cd /Users/Matthijs/HiSPARC/Code/lightning/correlation;
$ ipython
> %run correlate.py

Discharge: {'latitude': 52.562099, 'timestamp': 1310907263, 'nanosecond':
487800000, 'longitude': 4.8839002}
Close stations: [101 102 103 301 304 401]
Matching events: [[101, [1310907263366387867]], [102, []], [103, []], [301, []],
[304, []], [401, []]]
Discharge: {'latitude': 52.584099, 'timestamp': 1310907564, 'nanosecond':
202300000, 'longitude': 4.9847999}
Close stations: [601]
Matching events: [[601, []]]
Discharge: {'latitude': 51.860401, 'timestamp': 1310916191, 'nanosecond': 86800000,
'longitude': 4.5490999}
Close stations: [3102]
Matching events: [[3102, []]]
Discharge: {'latitude': 52.155201, 'timestamp': 1310918537, 'nanosecond':
862200000, 'longitude': 4.8706999}
Close stations: [ 10 3301 3302 3303]
Matching events: [[10, []], [3301, [1310918537351685089]], [3302,
[1310918537802749914]], [3303, [1310918537226216681]]]

```



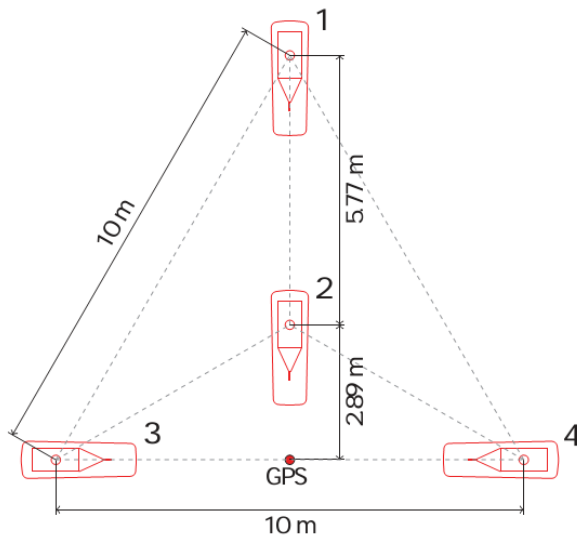
Figuur 3.6 Aantal bliksemontladingen op 20 augustus 2009 (Bron: KNMI)

4. Hoekreconstructie en de vorm van de gebruikte driehoek

Ricky Zonneveld

4.1. Detectie van deeltjeslawines door middel van een cluster met drie meetstations

Op het Sciencepark bevinden zich de meetstations met nummers 501 t/m 508. Elk station bestaat uit vier scintillatorplaten met vier fotoversterkerbuizen (PMT) en één GPS antenne. Ze staan opgesteld in een min of meer gelijkzijdige driehoek met zijden van ongeveer 10 m, zie figuur 4.1.



Figuur 4.1 Opstelling meetstation met vier scintillatorplaten

Wanneer een geladen deeltje (elektron of muon) met voldoende energie inslaat in de scintillatorplaat, ontstaat er een flits zichtbaar licht. De fotonen van de lichtflits worden getransporteerd naar de PMT en maken elektronen vrij in de kathode van de fotoversterkerbuis. Dit signaal veroorzaakt een spanningspuls. Deze puls wordt geregistreerd samen met de GPS tijd.

Als twee scintillatorplaten binnen een tijdverschil van $1,5 \mu\text{s}$ elk een deeltje detecteren, wordt dit een coïncidentie genoemd. Door het geringe tijdverschil mag men aannemen dat deze deeltjes tot dezelfde deeltjeslawine behoren.

Met behulp van de tijdverschillen tussen de metingen van drie meetstations kan de richting van de deeltjeslawine bepaald worden. In ieder afzonderlijk meetstation zijn dan deeltjes gedetecteerd in minimaal twee scintillatorplaten. De afstanden tussen de meetstations zijn dusdanig groot dat de afstand tussen een afzonderlijke scintillatorplaat en de GPS (3 - 9 m) verwaarloosd mag worden.

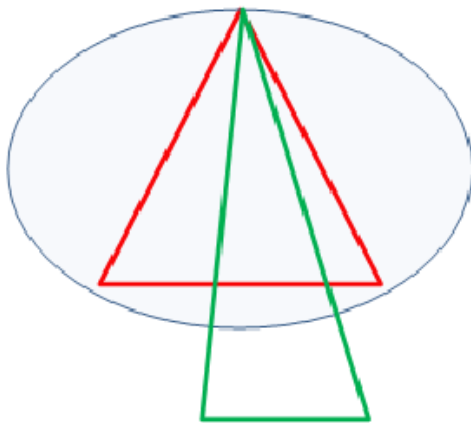
4.2. Vorm van de driehoek en detectie van deeltjes

Een coïncidentie wordt opgeslagen als het tijdverschil tussen de meetstations korter is dan een vooraf ingestelde waarde. Deze waarde is ingesteld op $2,00 \mu\text{s}$. De energierijke, geladen deeltjes in een deeltjeslawine bewegen zich voort met de lichtsnelheid en kunnen in $2,00 \mu\text{s}$ een afstand afleggen die vele malen groter is dan de afstanden tussen de verschillende meetstations (100 tot 406

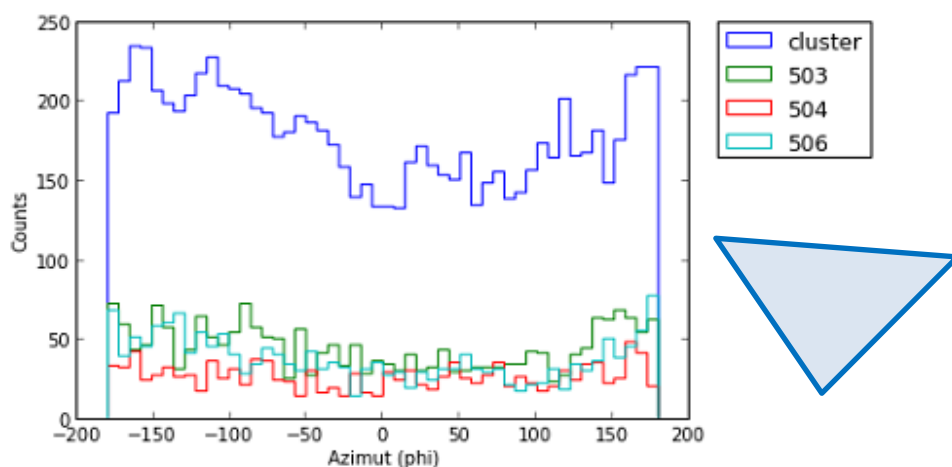
m. Er zijn heel weinig toevallige coincidenties, zodat we kunnen aannemen dat de waargenomen deeltjes binnen deze $2.00 \mu\text{s}$ tot dezelfde deeltjeslawine behoren.

Als het front van een deeltjeslawine vanuit een bepaalde richting op een cluster van stations valt, zijn er tijdverschillen tussen het detecteren van de deeltjes in de verschillende stations. Samen met de hoek en afstand waar de stations ten opzichte van elkaar staan, geeft dit de informatie om de richting waarvandaan de deeltjeslawine komt, te reconstrueren. Een gelijkzijdige driehoek zal vanuit alle richtingen ($0-360^\circ$) evenveel hoeken kunnen reconstrueren. De acceptatie is dan overal even groot.

Een afwijkende driehoek zal een voorkeur hebben om deeltjeslawines te detecteren die over de lange as bewegen, immers loodrecht daarop kan het zijn dat een van de buitenste stations de deeltjes uit de deeltjeslawine 'mist', zie figuur 4.2. Hier is te zien dat de groene driehoek de deeltjeslawine niet zal detecteren. Als de deeltjeslawine over de lange as valt, wordt deze wel waargenomen door de groene driehoek. De gelijkzijdige rode driehoek kan uit alle richtingen deze deeltjeslawine waarnemen.



Figuur 4.2 De vorm van de driehoek speelt een rol bij de acceptatie van de azimuthhoek reconstructie. In dit geval kan alleen de rode driehoek de richting van de deeltjeslawine reconstrueren. De deeltjeslawine heeft een ellipsvorm omdat deze niet loodrecht van boven komt. Hij maakt een hoek met de zenit groter dan 0° . Op de lijn die de omtrek van de ellips aangeeft is de deeltjesdichtheid overal gelijk



Figuur 4.3: de acceptatie van de azimuth hoek (ϕ) van de stations 503-504-506. Voor de zichtbaarheid is de azimuth in 51 bins opgedeeld, dit is $360/51 = 7^\circ$ per bin

Hierboven is een voorbeeld weergegeven van de acceptatie van de azimut hoek (ϕ) van de stations 503-504-506 (blauwe lijn). De azimut hoek is gereconstrueerd uit data van één maand (februari 2012). Elk station heeft deeltjes waargenomen op minimaal twee scintillatorplaten. De andere lijnen lager in het histogram geven de hoekreconstructie per station weer. Bij één enkel meetstation is het nodig dat de deeltjes gedetecteerd worden door de drie scintillatorplaten die op de punten van de gevormde driehoek liggen. Hierdoor is het aantal hoeken dat gereconstrueerd kan worden met data van één meetstation behoorlijk kleiner.

In deze histogrammen staat 0° voor Oost, 90° betekent Noord, -90° is Zuid, 180° / -180° West. Naast het histogram is de vorm van de driehoek weergegeven.

4.3. Clusteropstelling Sciencepark Amsterdam

In deze plattegrond is de ligging van de stations te zien. Station 508 is pas in juni 2013 in gebruik genomen, bij het afronden van dit onderzoek. Station 507 bevindt zich beneden in een gebouw en wordt als demonstratiemodel gebruikt. De andere stations liggen op de daken van de verschillende gebouwen.



Figuur 4.4 Ligging van de meetstations op het Sciencepark

4.4. Onderzoeksopdracht

De afgelopen jaren is er zowel een simulatie (Jos Steijger en Hans Montanus, 2012) als een script ontwikkeld (David Fokkema, Arne de Laat, Niels Bosboom, 2012) om een reconstructie van de richting van deeltjeslawines te maken. Deze hoekreconstructie is mogelijk door gebruik te maken van de data van drie meetstations die samen een driehoek vormen.

In dit onderzoek is zowel het simulatiemodel als het script gebruikt voor alle mogelijke driehoeken die gevormd kunnen worden door drie meetstations. Daarbij is gebruik gemaakt van de data van zes

actieve meetstations op het Sciencepark, 501 t/m 506. De clusters variëren van vrijwel gelijkzijdige driehoeken (bv. 502-505-506) tot driehoeken waarvan de 3 stations bijna op 1 lijn staan (bv. 502-501-503). Deze zes meetstations maken het mogelijk om met 20 verschillende driehoeken een hoekreconstructie van de azimut (ϕ) te maken.

Doel van dit onderzoek is te kijken hoe de acceptatie door een cluster van drie stations afhangt van de vorm van de driehoek. Met acceptatie wordt de kans bedoeld dat een deeltjeslawine wordt gedetecteerd. Hiervoor is het nodig om parameters te gebruiken die alleen iets zeggen over de vorm van de driehoek. Het verband tussen de gemeten intensiteit en de vorm van de driehoek wordt vergeleken met het verband tussen de simulatie en de vorm van de driehoek.

4.5. Karakteristieken van een driehoek

De vorm van een driehoek kan uitgedrukt worden in een parameter. In dit onderzoek is gebruikt gemaakt van de volgende parameters:

1 De verhouding tussen de omtrek en de oppervlakte van een driehoek

Van alle driehoeken zijn de zijdes bekend. Hiermee kan zowel de omtrek als de oppervlakte van elke driehoek berekend worden:

$$\text{Omtrek } p = a + b + c$$

$$\text{Oppervlakte } A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

A is de oppervlakte (m^2)

s is de halve omtrek (m),

a , b en c zijn de zijdes van de driehoek (m)

$\frac{\sqrt{A}}{p}$ is een dimensieloze parameter. Bij een gelijkzijdige driehoek is deze 0,219 en is onafhankelijk van de grootte van de driehoek.

Bijvoorbeeld:

een gelijkzijdige driehoek met zijdes van 10 m heeft een oppervlakte van 43 m^2 en een omtrek van 30 m.

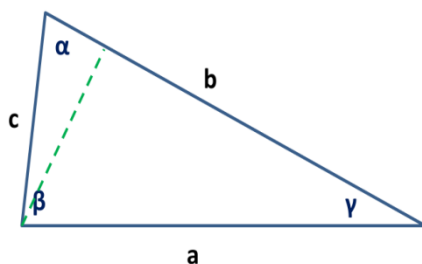
$$\frac{\sqrt{A}}{p} = \frac{\sqrt{43}}{30} = 0,219$$

een gelijkzijdige driehoek met zijdes van 30 m heeft een oppervlakte van 390 m^2 en

een omtrek van 90 m . $\frac{\sqrt{A}}{p} = \frac{\sqrt{390}}{90} = 0,219$

2 De verhouding tussen de loodlijn op de langste zijde en de langste zijde van een driehoek

De loodlijn op de langste zijde van een driehoek is een andere manier om de vorm van een driehoek in een parameter uit te drukken.



Figuur 4.5: Bepalen van de loodlijn op de langste zijde

De loodlijn is uit te rekenen met de cosinusregel:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\gamma)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{c^2 - a^2 - b^2}{-2ab}$$

$$\text{loodlijn} = \sin(\gamma) \cdot a$$

Loodlijn /langste zijde is de dimensieloze parameter en is niet afhankelijk van de grootte van de driehoek. Bij een gelijkzijdige driehoek is deze maximaal, namelijk $\frac{1}{2}\sqrt{3}$.

Bijvoorbeeld:

een gelijkzijdige driehoek met zijdes van 10 m en hoeken van 60°: $\text{loodlijn} = \sin(60) \cdot 10 = 8,66$

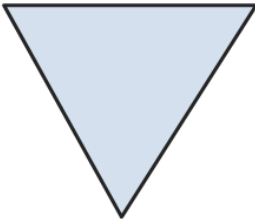

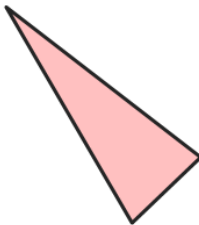
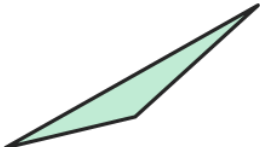
Loodlijn /langste is $8,66/10 = 0,866$

een gelijkzijdige driehoek met zijdes van 30 m en hoeken van 60°: $\text{loodlijn} = \sin(60) \cdot 30 = 25,98$

Loodlijn /langste is $25,98 / 30 = 0,866$.

4.6. Parameters van een paar gebruikte driehoeken

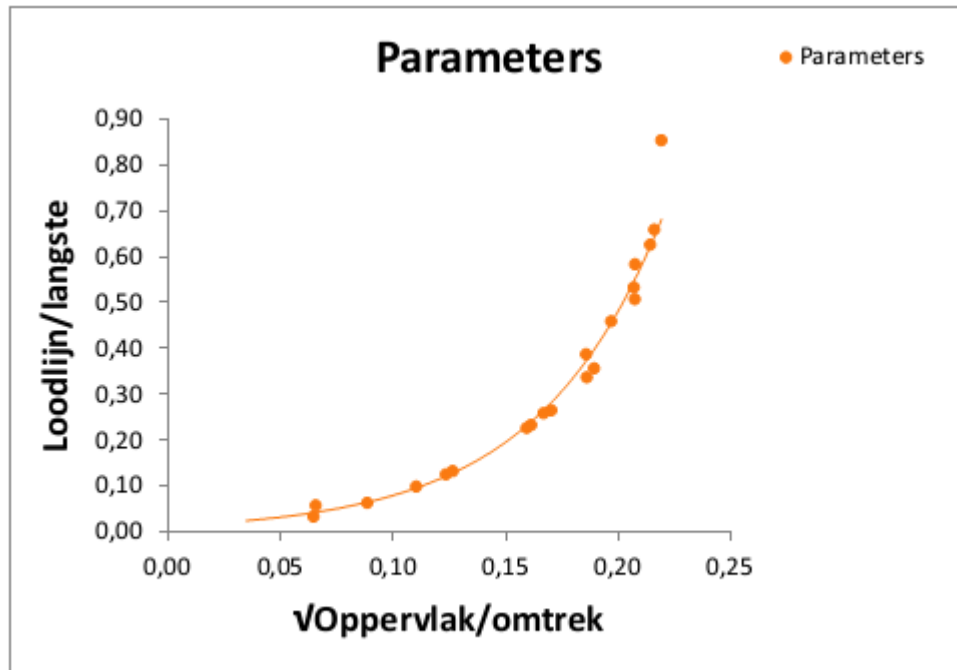
Om een idee te geven van de grootte van deze parameters, volgen hier de gegevens van een paar verschillende driehoeken die gebruikt zijn in dit onderzoek.

Vorm driehoek	Meetstations	Gegevens
	502-505-506	Oppervlakte = 26059 m ² Omtrek = 736 m Langste zijde = 247 m Loodlijn/langste = 0,854 $\frac{\sqrt{A}}{p} = 0,218$
	501-503-506	Oppervlakte = 7516 m ² Omtrek = 401 m Langste zijde = 151 m Loodlijn/langste = 0,659 $\frac{\sqrt{A}}{p} = 0,216$
	501-502-505	Oppervlakte = 11816 m ² Omtrek = 585 m Langste zijde = 247 m Loodlijn/langste = 0,387 $\frac{\sqrt{A}}{p} = 0,186$
	501-503-504	Oppervlakte = 4504 m ² Omtrek = 585 m Langste zijde = 261 m Loodlijn/langste = 0,132 $\frac{\sqrt{A}}{p} = 0,126$

Tabel 4.1 Gegevens van een aantal driehoeken

Bij het vergelijken van de twee parameters bij de verschillende driehoeken valt op dat de parameter loodlijn/langste een mooi, lineaire verloop heeft. Naarmate de driehoeken platter van vorm worden, neemt de waarde evenredig af. De parameter $\sqrt{\text{oppervlak/omtrek}}$ heeft dit niet (zie tabel 4.1).

Bij het uitzetten van de parameters tegen elkaar in een grafiek valt dit ook op (zie figuur 4.6)



Figuur 4.6 De parameters tegen elkaar uitgezet geven geen lineair verband

4.7. Hoekreconstructie uit data van de meetstations

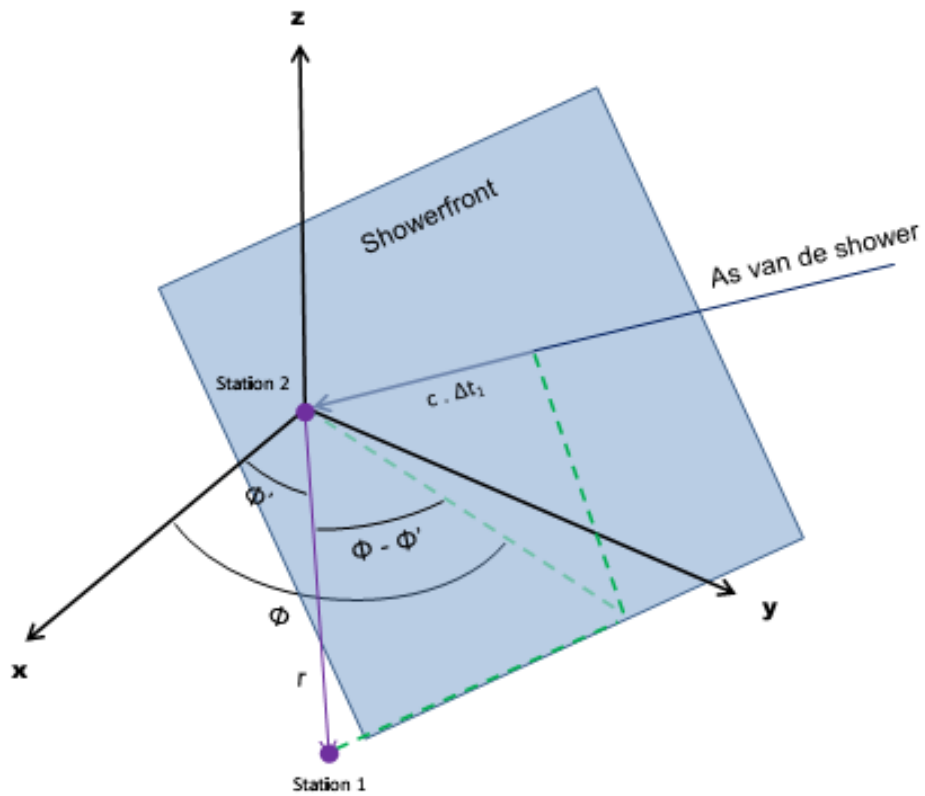
De energierijke deeltjes uit een deeltjeslawine worden door de meetstations van HiSPARC waargenomen. De lawine heeft een kern met een hoge deeltjesdichtheid. Van de kern af wordt de deeltjesdichtheid of intensiteit op groter wordende afstand (R) kleiner met ongeveer een factor $1/R^{0,75}$. Ver van de kern af zal de dichtheid zo klein zijn dat de deeltjes niet meer door een cluster van stations waargenomen kunnen worden. Uit de door mij gebruikte hoekreconstructie kan niet zichtbaar gemaakt worden hoe de spreiding van de deeltjesdichtheid is. Daarom is de exacte positie van de kern onbekend.

Om duidelijk te maken hoe de azimut (ϕ) berekend wordt uit de data, is in de schets hieronder het front van de deeltjeslawine getekend als een plat, vierkant vlak van gelijke, minimale dikte. Er zijn twee van de drie stations getekend. Het showerfront komt van rechtsboven en gaat het papier schuin in, in de richting station 2. Het front bevindt zich op de hoogte van station 1 en de deeltjes bewegen zicht voort langs de as van de shower met lichtsnelheid c . De afstand die afgelegd wordt tot aan station 2 is $c \cdot \Delta t_1$. Δt_1 wordt bepaald uit het verschil van de tijden die geregistreerd worden bij station 1 en 2.

De hoeken en de afstanden tussen de stations zijn bekend.

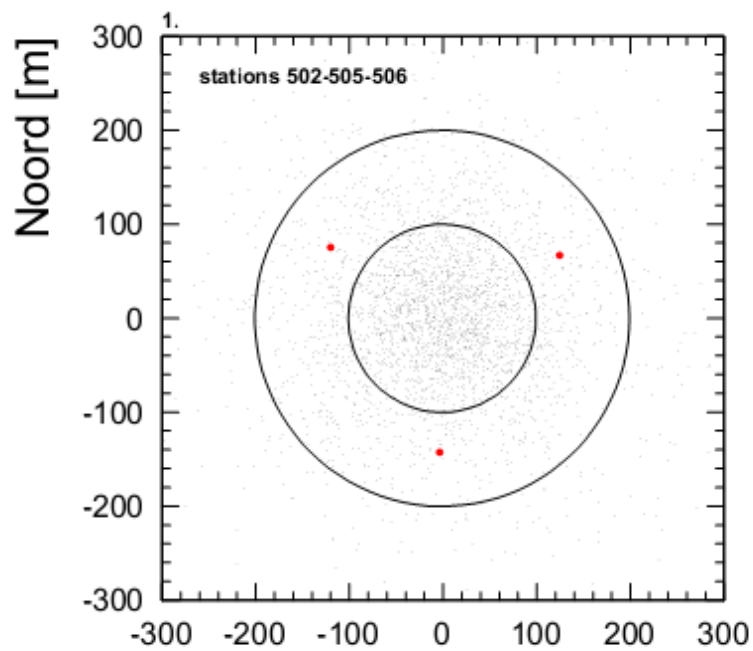
Met deze gegevens kan de azimut hoek (ϕ) berekend worden:

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



Figuur 4.7: Tijdverschillen tussen de meetstations bij het waarnemen van een front van een deeltjeslawine

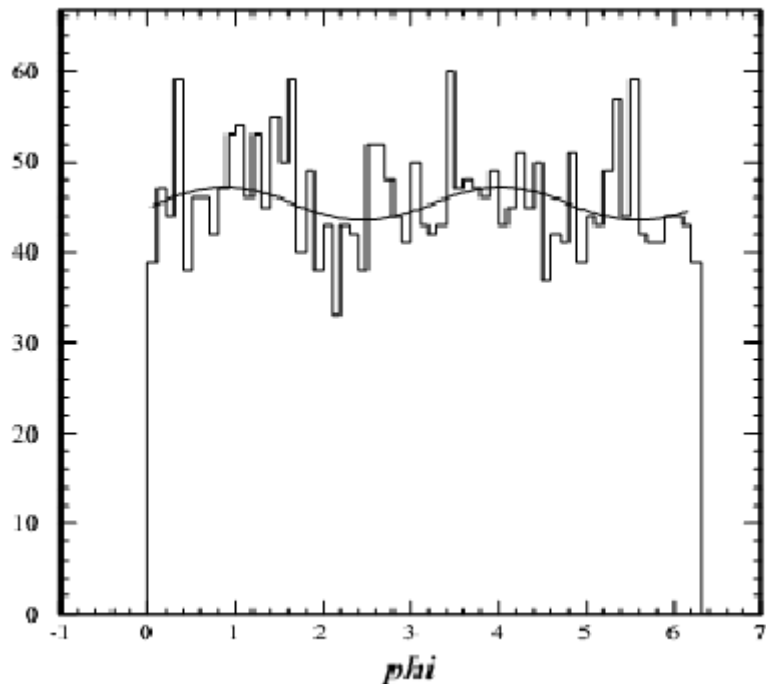
ϕ_1 is de hoek tussen station 1 en 2, ϕ_2 is de hoek tussen station 2 en 3.
 r_1 is de afstand tussen station 1 en 2, r_2 is de afstand tussen station 2 en 3
 Δt_2 is het tijdverschil tussen station 2 en station 3. (David Fokkema, 2012)



Figuur 8: een voorbeeld van deeltjeslawines in de simulatie. De rode punten geven drie meetstations aan. De zwarte punten geven de verdeling van de kernen van de deeltjeslawines aan. De cirkels hebben een straal van 200m en 300m.

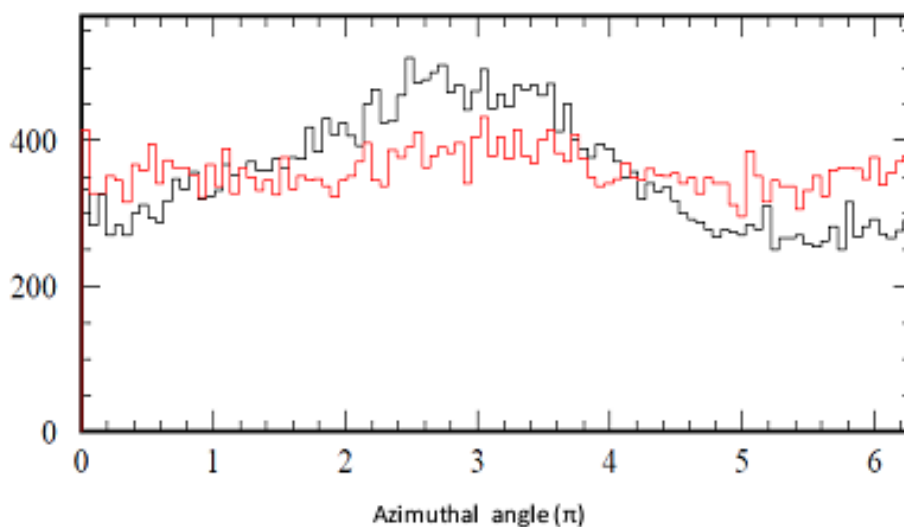
4.7.1. Simulatie van geaccepteerde azimut hoeken.

In de Monte Carlo simulatie (Jos Steijger en Hans Montanus, 2012) zijn de kernen van deeltjeslawines bekende parameters. Ze bestrijken een willekeurig gebied van 0 tot 2π (azimut) met daarom heen een cirkel met een afnemende deeltjesdichtheid die over alle drie de meetstations valt.



Figuur 4.9: Histogram van de azimut acceptatie van de stations 502-505-506 met behulp van de simulatie

Dit levert een acceptatie van de hoeken op die deels afhangt van de vorm van de driehoek. De fit van een sinusfunctie van een dubbele hoek aan de data zoals in figuur 4.9 resulteert in een fase en een



Figuur 4.10 De rode lijn is de acceptatie van de azimut inclusief de hoogteverschillen, de zwarte lijn heeft de meetstations op dezelfde hoogte staan. Op de y-as staat het aantal geaccepteerde hoeken, de x-as geeft de hoek in radialen weer van 0 tot 2π . Als er rekening wordt gehouden met de hoogteverschillen van de meetstations, wordt de amplitude kleiner.

amplitude. Als er rekening wordt gehouden met de hoogteverschillen van de meetstations zien de uitkomsten van de acceptatie van de azimut hoeken er behoorlijk anders uit, zie figuur 4.10.

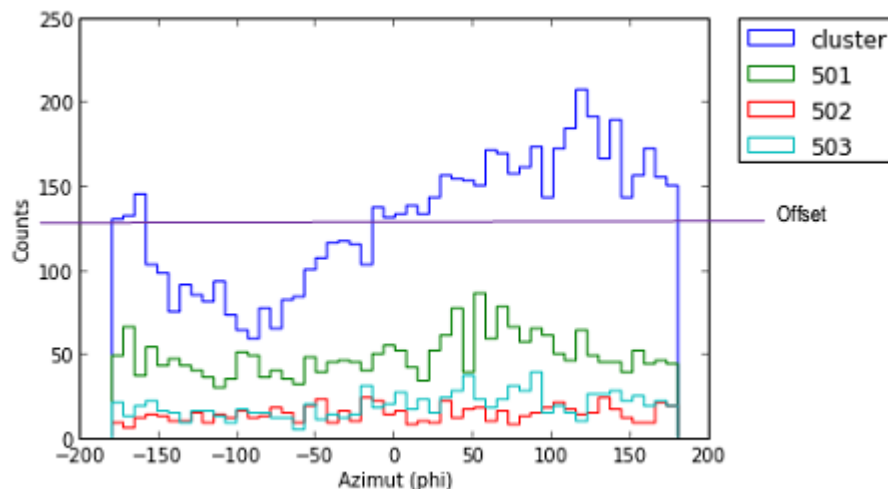
Hierboven staat een voorbeeld van de acceptatie van de azimut (phi) door middel van de simulatie (figuur 4.10). Bij het zoeken naar een correlatie tussen de vorm en de relatieve amplitude viel dit verschil weg. Het hoogteverschil is veel kleiner dan de afstanden tussen de meetstations welke de driehoek vormen en is voor de vorm van de driehoek te verwaarlozen.

4.8. Relatieve amplitudebepaling

De relatieve amplitude van de histogrammen (het aantal coïncidenties tegen de azimut) is een maat voor de regelmatigheid van de driehoek. Bij een ideale driehoek zou deze amplitude constant moeten zijn, terwijl bij een zeer onregelmatige driehoek de variatie in de amplitude zeer groot is omdat de gevoeligheid voor de richting van de deeltjeslawine over de lange as groot is.

De acceptatie van de azimut door een bepaalde driehoek wordt benaderd door een (onregelmatige) sinusfunctie met een periode van ongeveer 180° in een gebied van 360°. Immers, er zal een grotere acceptatie zijn van de twee (aan elkaar tegenstelde) richtingen over de lange as van de driehoek. Hetzelfde geldt voor de kleinere acceptatie van de twee richtingen op de korte as.

Om de relatieve amplitude van de acceptatie van de verschillende driehoeken te bepalen, heb ik gebruik gemaakt van het programma Python. Hiermee zijn ook de hoeken gereconstrueerd en de histogrammen gemaakt.



Figuur 4.11 Een platte driehoek geeft een grote amplitude

Het bepalen van de amplitude

$$\sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - \left(\frac{\sum x}{n}\right)^2} \cdot \sqrt{2}$$

Waarin:

x = waarde van een bin

n = het aantal bins (51)

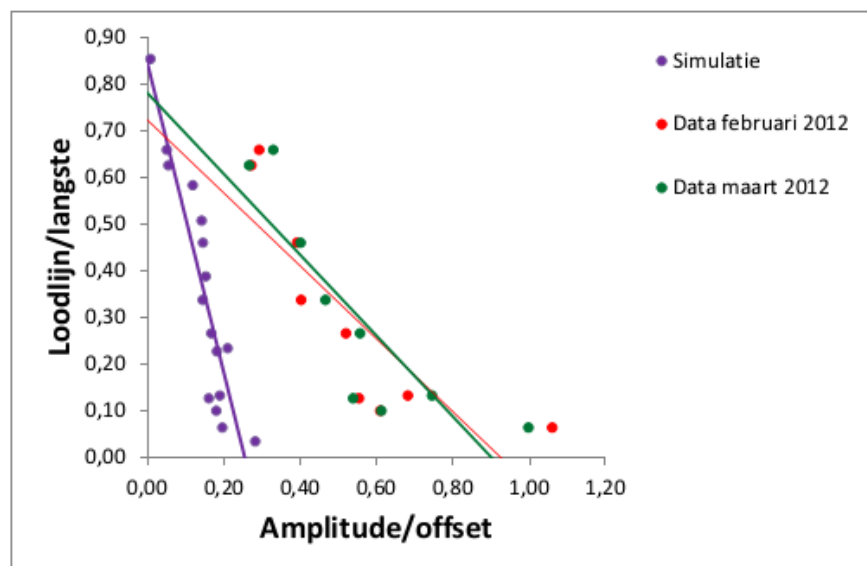
De amplitude moet in verhouding gezien worden met de offset, dit is de gemiddelde waarde van alle data. De relatieve amplitude is wordt dan amplitude/offset. In het voorbeeldhistogram van de stations 501-502-503 (figuur 4.11]) is te zien dat het om een vrij platte driehoek gaat. De amplitude in dit histogram is erg groot. Voor de duidelijkheid is naast het histogram de vorm en richting van de driehoek weergegeven. De amplitude van deze driehoek is erg groot.

4.9. Het verband tussen vorm van de driehoek en de hoekreconstructie

4.9.1. Werkwijze

Van alle driehoeken zijn hoekreconstructies zoals in figuur 4.11 gemaakt en zijn de relatieve amplitudes bepaald. Deze zijn uitgezet tegen de parameter loodlijn/langste (figuur 4.12) en tegen de parameter voppervlak/omtrek (figuur 4.13). Er is twee keer een maand data gebruikt. Deze zouden met elkaar overeen moeten komen en dat is ook het geval. De verschillen vallen binnen de onzekerheidsmarge. Daarnaast zijn amplitudes berekend uit de simulatie ook in de grafiek gezet.

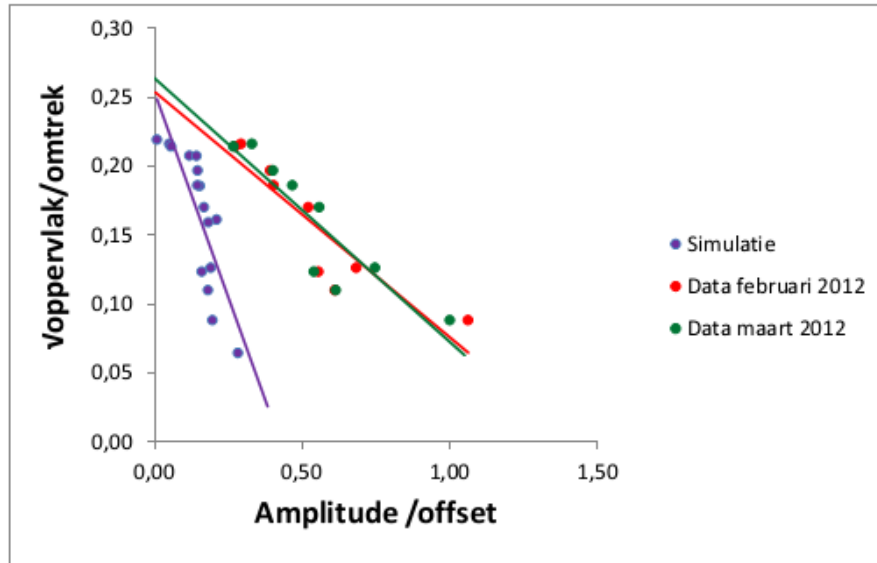
Een aantal clusters leverden een te kleine offset op. Deze gegevens zijn daarom niet meegenomen in de verdere analyse.



Figuur 4.12: Correlatie loodlijn/langste en relatieve amplitude. Elk punt stelt een cluster van meetstations voor. De plattere driehoeken bevinden zich laag op de y-as en ver op de x-as, oftewel een plattere driehoek heeft een grotere relatieve amplitude bij deze parameter. Het snijpunt met de y-as ligt vlak onder de verwachte waarde (0,866)

4.9.2. Opmerkingen

Vrij laat werd duidelijk dat de hoeveelheid data van de maand maart veel kleiner is (bij sommige clusters tot 40% minder) dan de data van de maand februari. Sinds mei 2013 is het mogelijk de activiteit van meetstations over een langere periode te bekijken. Pas toen kon geconstateerd worden dat de meetstations 502 en 505 in maart aantal dagen niet actief waren. Voor de uitkomst van de dataverwerking maakt dit niet veel uit (zie figuur 11 en 12). Daarom is besloten deze data te blijven gebruiken.



Figuur 4.13 Correlatie Voppervlak/omtrek en relatieve amplitude. Deze grafiek geeft aan dat plattere driehoeken een grotere relatieve amplitude hebben. Het valt op dat het snijpunt met de y-as beduidend hoger ligt dan verwacht (0,219)

De hellingshoek van de data is veel groter dan die van de simulatie. Het kan zijn dat dit te maken heeft met wijze waarop de amplitude bepaald is. In de simulatie wordt deze berekend uit de fit, een bekende sinusfunctie van de dubbele hoek. Bij de data is deze amplitude bepaald uit de gemiddelde waarden van het aantal bins. Daarnaast spelen meerder factoren mee die de acceptatie beïnvloeden. Eén van de factoren is bv. de hoekreconstructie. Deze is nog niet optimaal en levert een intensiteitsverdeling op die onterecht gezien wordt als acceptatie.

De clusters gevormd met de meetstations 504 en 505 vallen ver buiten de verwachte correlatie of hadden niet genoeg data. De afstand tussen deze meetstations is de grootste afstand (406 m). Het zou kunnen zijn dat op die afstand de deeltjesdichtheid dusdanig klein is dat het minder betrouwbare hoekreconstructies oplevert. Deze clusters zijn daarom niet meegenomen in de verwerking van de data.

4.10. Conclusie

De relatieve amplitude is niet alleen afhankelijk van de vorm van de driehoek, ook in de simulatie levert het geen rechte lijn op. Er spelen dus meer factoren een rol. De grafieken van figuur 4.11 en 4.12 tonen wel een correlatie tussen vorm en relatieve amplitude aan. Naarmate de driehoek een plattere vorm krijgt, neemt de relatieve amplitude toe.

Deze correlatie is te zien bij beide parameters. De parameter loodlijn/langste heeft een verloop dat redelijk lineair is in tegenstelling tot de parameter Voppervlak/omtrek en heeft daarom de voorkeur.

4.11. Dankwoord

Ik wil hier graag een aantal mensen bedanken voor hun hulp en bijdrage.

Jos Steijger voor zijn sturing en commentaar. Zonder Jos zou ik stuurloos rondgedobberd hebben en kant noch wal geraakt hebben.

Arne de Laat en David Fokkema voor hun onvermoeibare pogingen mij te helpen met Python.

Bob van Eijk en Jan-Willem van Holten omdat zij het mij mogelijk gemaakt hebben mee te kijken in de keuken van het Nikhef.

4.12. Referenties:

Proefschrift David B. R. A. Fokkema, 'The HiSPARC Experiment: data acquisition and reconstruction of shower direction', Universiteit Twente, 2012.

Niels Bosboom, 'Richting reconstructie van showers in de Science Park cluster', LiO jaarverslag, 2011

J.J.M Steijger en J.M.C Montanus, 'Direction reconstruction in HiSPARC: taking the station height in account', Nikhef, 2012

[i] <http://www.hisparc.nl/docent-student/de-fysica/achtergrond-informatie-wetenschappelijk>