

Detectie van zomerhagel met radar

Iwan Holleman, KNMI

In dit artikel zal de werking van een tweetal op-radar-gebaseerde detectiemethodes en de wijze waarop deze zijn geverifieerd worden toegelicht. Het blijkt dat door het combineren van reflectiedata van de neerslagradar met temperatuurinformatie uit het HiRLAM numeriek weervoorspellingsmodel op effectieve wijze zomerhagel kan worden gedetecteerd. Dit is aangetoond door een uitgebreide vergelijking te maken van een aantal detectiemethodes met grondwaarnemingen van KNMI synops- en neerslagwaarnemers en meldingen van hagelschade bij een aantal agrarische verzekeringsmaatschappijen.

Inleiding

Zomerhagel bij onweersbuien is een zeer lokaal verschijnsel en is ook vaak van zeer korte duur. Het wordt daardoor nogal eens gemist door het normale netwerk van 19 bemande synopswaanemstations. Gemiddeld heeft een willekeurige waarnemer in het zomerseizoen van 1999 slechts 1 keer hagel waargenomen, terwijl er toch zo'n 60 dagen met hagel ergens in Nederland waren. Op slechts 7 dagen is er in het zomerseizoen van 1999 ergens in Nederland een onweersbui gerapporteerd met hagelstenen groter dan 2 cm in diameter. Maar niet alleen deze hele grote hagelstenen veroorzaken overlast, er zijn in 1999 in totaal meer dan 2100 meldingen van hagelschade binnengekomen bij een drietal agrarische verzekeringsmaatschappijen, en 1999 was zeker geen extreem jaar wat hagel betreft.

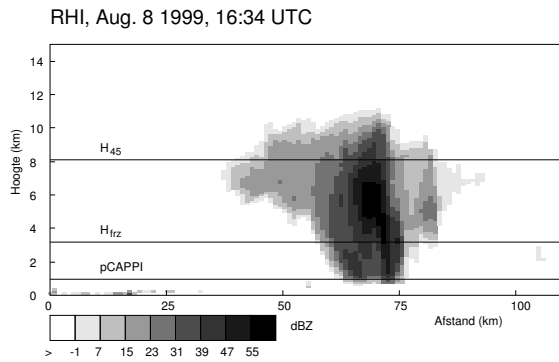
De neerslagradar is voor de operationele weersverwachting een onmisbaar instrument voor het monitoren van bijvoorbeeld de ontwikkeling van onweersbuien en het passeren van buienlijnen of fronten. Bovendien kunnen met behulp van de radar data gedetailleerde overzichten worden gemaakt van de verdeling van de neerslaghoeveelheid per dag boven Nederland. Deze neerslagoverzichten vormen belangrijke informatie voor bijvoorbeeld klimatologie en voor hydrologische toepassingen. In dit artikel wordt onderzoek met betrekking tot de detectie van zomerhagel met radar beschreven. Dit onderzoek is verricht in het kader van de ontwikkeling van een op-radar-gebaseerd gevaarlijkweerproduct waarmee uiteindelijk naast hagelbuien ook windstoten gedetecteerd zullen gaan worden. De methode voor hageldetectie kan naast het monitoren van onweersbuien en het maken van kortetermijnverwachtingen voor bijvoorbeeld lucht-

havens, ook gebruikt gaan worden voor het maken van dagcomposieten met een overzicht van de verdeling van hagelgebieden.

Onderscheid tussen regen en hagel

De eerste manier waarop onderscheid gemaakt kan worden tussen (zware) regenval en zomerhagel is op basis van de grootte van de radarreflectiviteit. Omdat de reflectiviteit sterk tot zeer sterk toeneemt met de diameter van de deeltjes waaraan gereflecteerd wordt (zie kader) en regendruppels nooit groter kunnen worden dan zo'n 6.5 mm in diameter, geven buien met zomerhagel van zo'n 10 mm of groter in principe aanleiding tot een sterke radarreflectiviteit. Een onweersbui met zomerhagel van 10 mm doorsnede bijvoorbeeld, kan, wanneer er een groot aantal van deze hagelstenen valt, aanleiding geven tot een reflectiviteit van 54 dBZ (Auer, 1994), wat overeen zou komen met een hoeveelheid vloeibare neerslag van 80 mm/h. Al in 1971 suggereerde Mason om onderscheid te maken tussen regen en zomerhagel op basis van de reflectiviteitssterkte en hij stelde voor om een drempelwaarde van 55 dBZ te gebruiken (Mason, 1971). Met deze methode is het natuurlijk onmogelijk om onderscheid te maken tussen een onweersbui met alleen kleine hagelstenen of weinig hagel én een zeer zware onweersbui zonder hagel.

Eind jaren zeventig ontwikkelden Waldvogel *et al.* een methode voor de detectie van hagel die naast radar data ook informatie over de temperatuurverdeling in de atmosfeer gebruikt (Waldvogel, 1979). In figuur 1 is een verticale dwarsdoorsnede door drie-dimensionale scandata van de ra-



Figuur 1: Verticale dwarsdoorsnede, ook wel Range Height Indicator (RHI) genoemd, door de scandata van de radar in De Bilt bij een vaste azimuth van 187 graden. De hoogtes zijn gecorrigeerd voor de kromming van het aardoppervlak. De maximale afstand tot waar gemeten wordt is 320 km, maar in de figuur is de afstand beperkt tot 110 km.

dar in De Bilt weergegeven, ook wel een Range Height Indicator (RHI) genoemd. De azimuth, waarbij deze verticale dwarsdoorsnede is genomen, is 187 graden zodat deze dwarsdoorsnede vanuit De Bilt over Noord-Brabant richting België loopt. Figuur 1 geeft een goed beeld van de verticale structuur van een onweersbui die zich op 8 augustus 1999 om 16:34h UTC boven Baarle-Nassau bevond. In de figuur zijn tevens een aantal niveaus aangegeven: de hoogte waarop de zogenaamde pCAPPI-doorsnede (zie kader) wordt gemaakt, de hoogte van het 0°C-niveau (H_{frz}) en de grootste hoogte waarop nog een reflectiviteit van 45 dBZ wordt waargenomen (H_{45}). Het is duidelijk dat een pCAPPI-doorsnede slechts zeer beperkte tot geen informatie over de verticale structuur van de onweersbui bevat. De hageldetectie methode van Waldvogel berust op de constatering dat de aanwezigheid van hoge radarreflectiviteiten en dus van veel vloeibare (en vaste) waterdeeltjes op grote hoogte in de atmosfeer een aanwijzing is voor een sterke opwaartse beweging. Op het moment dat er reflectiviteiten van 45 dBZ en hoger ver boven het 0°C-niveau worden waargenomen en er zich grote hoeveelheden onderkoeld of bevroren water hoog in de atmosfeer bevinden is de kans op de aanwezigheid van hagel groot. Uiteindelijk kwamen Waldvogel *et al.* tot de conclusie dat er een kans is op de aanwezigheid van hagel wanneer de radarreflectiviteit van 45 dBZ 1.4 km of meer boven het 0°C-niveau uitsteekt en dat deze kans groter

wordt naarmate die hoge reflectie verder boven het 0°C-niveau uitsteekt.

Vergelijking van de verschillende methodes

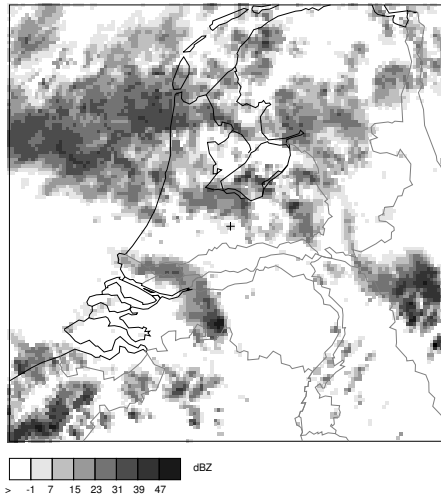
In figuur 2 is een afbeelding van het pCAPPI-product, het overbekende product van de neerslagradar, weergegeven voor een situatie op 8 augustus 1999. De ingezoomde afbeelding beslaat ruim 300 bij 300 km. Het kruisje in het midden van de afbeelding markeert de locatie van de radar (De Bilt). Van de onweersbui bij Baarle-Nassau is een Noord-Zuid dwarsdoorsnede afgebeeld in figuur 1. Wanneer de drempelwaarde van Mason voor de aanwezigheid van zomerhagel (55 dBZ) wordt toegepast, wordt er nergens hagel gedetecteerd. Daarentegen zou er met een drempelwaarde van 47 dBZ, de hoogste reflectiviteitswaarde die wordt weergegeven in het pCAPPI-product, op drie plaatsen hagel worden gedetecteerd, namelijk bij Baarle-Nassau, bij Düsseldorf en in West-Vlaanderen. Het is duidelijk dat de keuze van de drempelwaarde zeer veel invloed heeft op het detectiegedrag van de pCAPPI-methode.

Het resultaat van het hageldetectiealgoritme van Waldvogel is weergegeven in figuur 3. De hoogte van het 0°C-niveau is bepaald uit de meest recente analyse (15:00 UTC) van het HiRLAM, het numerieke weervoorspellingsmodel van het KNMI. Wanneer de drempelwaarde voor de aanwezigheid van zomerhagel op 2 km wordt gezet, wordt er op dit tijdstip met de methode van Waldvogel hagel gedetecteerd bij Baarle-Nassau en bij Dortmund. In Baarle-Nassau en omgeving werd als gevolg van deze onweersbui inderdaad hagel waargenomen en er zijn zelfs hagelstenen met een diameter van 3.5 cm gerapporteerd. Maar naast de overeenkomsten zijn er op het eerste gezicht ook duidelijke verschillen in het detectiegedrag van de pCAPPI-methode en de methode van Waldvogel.

Verificatie

Er is een systematische vergelijking uitgevoerd van de hagelwaarnemingen door de op-radar-gebaseerde detectiemethodes met hagelwaarnemingen aan het aardoppervlak. Hiervoor zijn de beschikbare radardata over de periode augustus tot en met oktober 1999 gebruikt. Het verzamelen van hagelwaarnemingen aan de grond over dezelfde periode

pCAPPI, Aug. 8 1999, 16:34 UTC

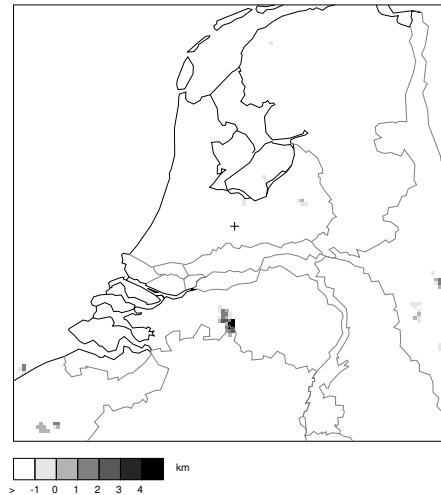


Figuur 2: Afbeelding van de radarreflectiviteit Z op constante hoogte boven het aardoppervlak, ook wel pseudo-Constant-Altitude Plan-Position Indicator (pCAPPI) genoemd. Dit is een horizontale dwarsdoorsnede door de scandata van de radar in De Bilt. De positie van de radar is aangegeven met een kruis en de afbeelding is een factor twee ingezoomd tot een afbeelding van 128 bij 128 pixels. De grootte van een pixel is ongeveer 2.4 bij 2.4 km. Bij Baarle-Nassau, bij Düsseldorf en in West-Vlaanderen wordt een reflectiviteit van 47 dBZ waargenomen.

was een groter probleem. Omdat zomerhagel over het algemeen een zeer lokaal verschijnsel is, wordt het bijna altijd gemist door het waarnemennetwerk van de 19 bemande synopsstations. In het zomerseizoen van 1999 is door dit netwerk in totaal slechts 14 keer hagel waargenomen. Om een betere landelijke dekking te krijgen zijn ook hagelwaarnemingen door de 321 vrijwillige neerslagwaarnemers van het KNMI meegenomen. Bovendien zijn meldingen van hagelschade in het zomerseizoen van 1999 bij drie grote agrarische verzekeringsmaatschappijen verzameld. De meldingen van hagelschade aan agrarisch goed zullen zeker niet homogeen over Nederland verdeeld zijn, maar deze inhomogeniteit kan in rekening worden gebracht door naar de verdeling van het bodemgebruik te kijken. Ondanks de uitgebreide zoektocht naar grondwaarnemingen van zomerhagel, zal de dataset met de grondwaarnemingen nog steeds niet helemaal compleet zijn.

Het detectiegedrag kan kwantitatief in kaart worden gebracht door de hageldetecties en grond-

Waldvogel, Aug. 8 1999, 16:34 UTC



Figuur 3: Afbeelding van het resultaat van de toepassing van het algoritme van Waldvogel op dezelfde radarscandata als die gebruikt is voor figuur 2. Voor ieder pixel is, indien mogelijk, het verschil tussen de maximale hoogte van de 45 dBZ-reflectie en de hoogte van het 0°C -niveau weergegeven. De positie van de radar is aangegeven met een kruis en de afbeelding is op dezelfde wijze ingezoomd als figuur 2. Bij Baarle-Nassau wordt een hoogteverschil van 4 km waargenomen.

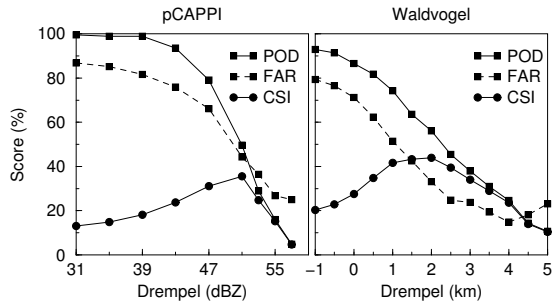
waarnemingen van hagel onder te brengen in een 2 bij 2 contingentietabel. De 4 klassen in deze contingentietabel staan voor het aantal detecties door de radar die zijn bevestigd door grondwaarnemingen (*Hit*), het aantal grondwaarnemingen dat niet door de radar is gedetecteerd (*Mis*), het aantal detecties door de radar die niet zijn bevestigd (*False*), en het aantal gevallen waar er geen hagel is gedetecteerd en waargenomen (*Nothing*). Met behulp van deze symbolen kunnen de Probability-Of-Detection (POD), de False-Alarm-Rate (FAR) en de Critical-Success-Index (CSI) als volgt worden gedefinieerd:

$$\text{POD} = \frac{H}{H + M} \quad (1)$$

$$\text{FAR} = \frac{F}{H + F} \quad (2)$$

$$\text{CSI} = \frac{H}{H + M + F} \quad (3)$$

De betekenis van zowel de POD (detectiewaarschijnlijkheid) als de FAR (kans op foutieve detecties) ligt voor de hand, maar voor de CSI is dat



Figuur 4: De scores, Probability-Of-Detection (POD), False-Alarm-Rate (FAR) en de Critical-Success-Index (CSI), van zowel de pCAPPI-methode als de methode van Waldvogel zoals gevonden in de verificatie tegen de grondwaarnemingen van de synopswaarnemers, neerslagwaarnemers en hagelshaded meldingen bij een drietal verzekeringsmaatschappijen. De scores zijn weergegeven als functie van de beslissingsdrempel, oftewel een waarde lager dan de drempel correspondeert met geen hagel en hoger met wel hagel.

wat minder duidelijk. Om het detectiegedrag van een methode te karakteriseren zijn zowel de POD als de FAR van belang. Een methode die nooit hagel detecteert bijvoorbeeld, zal een zeer lage FAR hebben, maar zeker geen goede detectiemethode zijn. De CSI is een handige combinatie van de POD en de FAR, en geeft in één getal de kracht van een detectiemethode weer. De waarden van de CSI, zoals bepaald op de hieronder beschreven manier, zijn gebruikt voor de onderlinge vergelijking van de verschillende methodes voor hageldetectie. De methode met de hoogste CSI verdient de voorkeur. Door het variëren van de drempelwaarde kan tenslotte de balans tussen de POD en de FAR geoptimaliseerd worden.

Omdat de meeste grondwaarnemingen van hagel alleen per dag beschikbaar zijn en vaak ook alleen per gemeente of postcodegebied, is er voor gekozen om per dag én per gemeente in Nederland (totaal 538 anno 1999) te gaan tellen. Door gebruik te maken van de grondwaarnemingen en van radardata die zijn samengevoegd tot dagcomposieten, is iedere gemeente in Nederland per dag geclassificeerd als een H , een M , een F of een N . Deze procedure is toegepast voor 15 dagen met onweersbuien in de zomer van 1999, en door samenvoeging van de resultaten zijn de uiteindelijke POD, FAR en CSI voor de verschillende methodes voor hageldetectie met radar bepaald. In

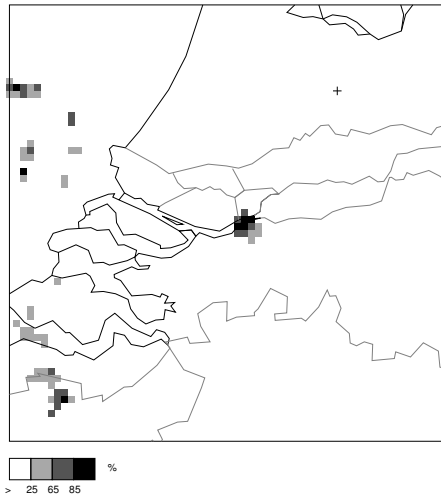
figuur 4 zijn de resulterende POD, FAR en CSI voor zowel de pCAPPI-methode als de methode van Waldvogel weergegeven als functie van de gekozen drempelwaarde. Doordat de set van grondwaarnemingen waarschijnlijk onvolledig is, kunnen de waarden van de FAR wat hoger zijn dan de werkelijke waarden. Er zijn grote verschillen zijn tussen het detectiegedrag van de pCAPPI-methode en die van de methode van Waldvogel. Op basis van de CSI scoort de methode van Waldvogel voor de meeste drempelwaarden beduidend beter dan de pCAPPI-methode, en bovendien is voor de methode van Waldvogel het verloop van de CSI als functie van de drempelwaarde veel vlakker. De pCAPPI-methode realiseert een hogere POD waarde dan de methode van Waldvogel, maar dit gaat gepaard met een erg hoge FAR. In het gebied waar de pCAPPI-methode het beste werkt (47-55dBZ) variëren zowel de POD als de FAR zeer sterk met de gekozen drempelwaarde, en dus varieert het detectiegedrag in dit gebied zeer sterk met deze waarde. Bij de methode van Waldvogel daarentegen, veranderen de POD en de FAR geleidelijk met de drempelwaarde. Dit maakt het mogelijk om met de keuze van een bepaalde drempelwaarde een goed gedefinieerd detectiegedrag te verwezenlijken.

De kans op de aanwezigheid van hagel bij overschreiding van een bepaalde drempelwaarde kan worden bepaald uit de FAR, want $1-FAR$ is namelijk de kans dat er daadwerkelijk hagel optreedt. In figuur 5 is deze kans op hagel weergegeven voor een situatie op 16 mei 2000. Er zijn 3 kansniveaus, namelijk 25%, 65% en 85%, weergegeven die corresponderen met drempelwaarden zoals bepaald uit figuur 4 via de FAR. Er is inderdaad hagel waargenomen rond het tijdstip waarop figuur 5 geldig is en wel ten zuiden van Dordrecht (2-4 cm) en in Hendrik-Ido-Ambacht (1 cm).

Conclusie

Het is mogelijk om met behulp van de neerslagradars van het KNMI en temperatuurinformatie uit het numeriek weervoorspellingsmodel HiR-LAM effectief zomerhagel te detecteren. Een detectie waarschijnlijkheid van bijna 60% gecombineerd met een kans op valse alarms van maximaal 30% is met de methode van Waldvogel te realiseren. De verificatieresultaten, zoals vermeld in de oorspronkelijke publicatie van Waldvogel *et al.*, komen neer op een CSI van 46%. Deze waarde

May 16 2000, 15:19 UTC: Kans op Hagel



Figuur 5: De kans op de aanwezigheid van hagel, zoals bepaald met de methode van Waldvogel, voor 16 mei 2000. Er is rond dit tijdstip inderdaad hagel waargenomen bij Dordrecht en Hendrik-Ido-Ambacht.

stemt goed overeen met de CSI-waarden die in deze studie voor de methode van Waldvogel bepaald zijn. Hageldetectie met de methode van Waldvogel is ten opzichte van die met de pCAPPI-methode, wat de huidige praktijk is, of die met een van de andere, hier niet behandelde methodes een zeer duidelijke verbetering.

Dankbetuiging

Ik ben de verzekeringsmaatschappijen Agriver, Hagelunie en Onderlinge Fruittelers Hagelverzekering (OFH) zeer erkentelijk voor het leveren van de meldingen met betrekking tot hagelschade in de zomer van 1999.

Tevens wil ik Herman Wessels, Jeanette Onvlee en Sylvia Barlag bedanken voor hun bijdrage aan dit project.

Literatuur

Auer Jr., 1994, Hail Recognition through the Combined Use of radar Reflectivity and Cloud-Top Temperatures, *Mon. Wea. Rev.* 122, 2218-2221.

Mason, 1971, *The Physics of Clouds*, Clarendon Press, Oxford UK.

Waldvogel, Federer en Grimm, 1979, Criteria for the Detection of Hail Cells, *J. Appl. Meteor.* 18, 1521-1525.

Principe van de neerslagradar:

Het KNMI heeft twee operationele Doppler radars, één in De Bilt en één in Den Helder, die worden gebruikt voor het meten van neerslag boven Nederland en omstreken. Deze C-band radars zenden en ontvangen radio-straling met een frequentie van ongeveer 6 GHz en een golflengte λ van rond de 5 cm. De Doppler radars kunnen op twee manieren gebruikt worden, namelijk als conventionele radar waarbij de intensiteit van de terugkomende, verstrooide radiofrequente straling wordt gemeten én als echte Doppler radar waarbij de snelheidsverdeling van de deeltjes, waaraan de radiogolven verstrooid zijn, gemeten wordt. Bij conventionele radarmetingen wordt het terugkomende, verstrooide signaal, na onder andere een calibratie en een afstandscorrectie, omgezet in een grootheid Z , de zogenaamde radarreflectiviteit. Er van uitgaande dat de diameters (D_i) van de neerslagdeeltjes waaraan verstrooid wordt (veel) kleiner zijn dan de golflengte van de radar, zodat het dominante proces Rayleigh-verstrooiing is, geldt voor de radarreflectiviteit:

$$Z = \sum_i n_i \cdot D_i^6 \quad (4)$$

Waarbij n_i staat voor het aantal deeltjes per volume-eenheid met diameter D_i . De radarreflectiviteit is dus de som over het product van het aantal deeltjes met de diameters tot de zesde-macht van alle (neerslag)deeltjes in een volume, en is daarmee uitermate gevoelig voor de diameter van de deeltjes. Wanneer de diameters van de neerslagdeeltjes groter of gelijk zijn aan de golflengte van de radar, is de radarreflectiviteit evenredig met het kwadraat van de diameters van de deeltjes. Door de grote spreiding in Z -waarden is een decibelschaal gebruikelijk:

$$Z \text{ [dBZ]} = 10^{10} \log(Z \text{ [mm}^6/\text{m}^3]) \quad (5)$$

Tabel 1: Het verband tussen de radarreflectiviteit Z in dBZ en de hoeveelheid neerslag R aan de grond (bij benadering).

Z [dBZ]	7	15	23	31	39	47
R [mm/h]	0.1	0.3	1	3	10	30

Onder de aanname van een diameter-distributie van neerslagdruppeltjes en een afhankelijkheid van de valsnelheid van druppeltjes met hun diameter, kan de radarreflectiviteit worden omgerekend naar een hoeveel neerslag per tijdseenheid (R). In tabel 1 is het verband weergegeven tussen de reflectiviteit en de neerslag per tijdseenheid zoals die redelijk algemeen geaccepteerd is. De reflectiviteit wordt tot op grote afstand van de radar (0-320 km) en op enige hoogte (0.8-3 km) boven het aardoppervlak gemeten, en daardoor kunnen er discrepanties optreden tussen de bepaling van de neerslag per tijdseenheid met de radar en die door de neerslagwaarnemers aan de grond. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door verdamping of vorming van neerslag vlak boven het aardoppervlak of door een vreemde propagatie van de radarbundel. Het is echter gebleken uit een interne studie dat de radars van het KNMI over het algemeen tot op een afstand van 150 km een goed kwantitatief beeld produceren van de neerslag boven Nederland.

Tijdens een scan maakt de antenne van de radar bij een aantal elevaties (kanteling ten opzichte van horizontaal) een volledige omwenteling om zijn verticale as (azimuth). Om preciezer te zijn, is de azimuth de hoek van de radarantenne met de wijzers van de klok mee ten opzichte van het noorden. Bij iedere stand van de antenne wordt de radarreflectiviteit als functie van de afstand opgemeten. Uiteindelijk levert dit een beeld op van de driedimensionale reflectiviteitsverdeling in de atmosfeer. De radars van het KNMI maken elke 5 minuten een kleine scan over 4 lage elevaties en elke 15 minuten een grote scan over in totaal 14 elevaties tot een maximum van 12 graden. De bekende radar neerslagplaatjes zijn niets anders als een horizontale doorsnede door de drie-dimensionale data van de kleine scan. Deze neerslagplaatjes worden ookwel pCAPPI's genoemd wat staat voor: pseudo-Constant-Altitude Plan-Position Indicator. De algoritmes voor de detectie van zomerhagel maken onder andere gebruik van de reflectiviteitsinformatie uit de grote radarscans.