



Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
Ministerie van Onderwijs, Cultuur en
Wetenschap

Nederlandse
Archeologische
Rapporten

080

Vanuit de lucht zie je meer

Remote sensing in de Nederlandse archeologie

**Redactie: E. Rensink, L. Theunissen en
H. Feiken**

Vanuit de lucht zie je meer

Remote sensing in de Nederlandse archeologie

Redactie: E. Rensink, L. Theunissen en H. Feiken

Colofon

Nederlandse Archeologische Rapporten 80

Vanuit de lucht zie je meer. Remote sensing in de Nederlandse archeologie

Redactie: E. Rensink, L. Theunissen en H. Feiken

Auteurs: E. Rensink, L. Theunissen, H. Feiken, J. Bourgeois, K. Deforce, J. van Doesburg, R. Emaus, M. van der Heiden, N. de Jong-Lambregts, N. Karagiannis, J.W. de Kort, E. Liagre, H. van Londen, E. Meylemans, J. Orbons, B. Stichelbaut, B. Terlouw, G.J.J.J. Timmermans, J. Waagen en W. van Zijverden

Autorisator: B. Groenewoudt (september 2022)

Technische redactie: E. Beukers tekst en productie

Vertaling samenvatting: A. Visser

Illustraties: Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed en M. Haars (BCL-Archaeological Support), tenzij anders vermeld

Foto omslag: Droneluchtfoto gemaakt van een maisperceel bij Diepenheim (provincie Overijssel) tijdens de zomer van 2022. Grachten, greppels en/of andere structuren van mogelijk een laat-middeleeuws kasteel tekenen zich als donkergroene verkleuringen (*crop marks*) in de mais af (foto: A. Speelman).

Opmaak en productie: Xerox/Osage

ISBN/EAN: 978-90-76046-80-8

© Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort, 2022

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed

Postbus 1600

3800 BP Amersfoort

www.cultureelerfgoed.nl

**Deze publicatie dragen wij op aan Cornelis von Frijtag Drabbe (†),
Ayolt Brongers (†) en Willy Metz, pioniers op het gebied van
archeologische luchtfotografie in Nederland.**

Voorwoord	9		
Samenvatting	11		
Summary	13		
Deel I – De basis	15		
1 Inleiding	17		
1.1 Inleiding	17		
1.2 Remote sensing en archeologische monumentenzorg	17		
1.3 Doel, kader, doelgroep en afbakening	19		
1.4 Werkwijze	20		
1.5 De casestudy's	21		
1.6 Leeswijzer	22		
1.7 Dankwoord	23		
2 Remote sensing: principes en technieken	25		
2.1 Inleiding	25		
2.2 Wat zijn de achterliggende principes?	25		
2.3 Wat zijn de technieken?	28		
2.3.1 Analoge luchtfotografie	28		
2.3.2 Digitale luchtfotografie	28		
2.3.3 Infraroodspectrometrie	29		
2.3.4 Radar	30		
2.3.5 Multi- en hyperspectrale opnames	31		
2.4 Met welke instrumenten worden data ingewonnen?	32		
2.4.1 Sensoren	32		
2.4.2 Meetstations	32		
Deel II – Archeologisch bureauonderzoek	35		
3 Analoge en digitale luchtfoto's en sensorbeelden als bron	37		
3.1 Inleiding	37		
3.2 Welke luchtfoto's en sensorbeelden zijn er?	37		
3.2.1 Inleiding	37		
3.2.2 Analoge luchtfoto's	38		
3.2.3 Digitale luchtfoto's	38		
3.2.4 Sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum	38		
3.3 Welke tekens verraden archeologische resten?	40		
3.3.1 Inleiding	40		
3.3.2 <i>Crop marks, soil marks, shadow marks en snow/frost marks</i>	40		
4 Analoge luchtfoto's	43		
4.1 Inleiding	43		
4.2 Korte historische terugblik	43		
4.3 Kwaliteitskenmerken	45		
4.3.1 Aantal en verspreiding van controlepunten	45		
4.3.2 Schaal van analoge luchtfoto's	46		
4.3.3 Verticale versus oblique luchtfoto's	46		
4.3.4 Bewaarcondities van analoge luchtfoto's	47		
4.4 Archeologische toepassingen	47		
4.4.1 Inleiding	47		
4.4.2 Analoge luchtfoto's uit archieven	47		
4.4.3 Analoge luchtfoto's gemaakt voor archeologische doeleinden	50		
4.5 Beeldoptimalisatie en interpretatie van analoge luchtfoto's	53		
4.5.1 Inleiding	53		
4.5.2 Intensiteit van kleuren	54		
4.5.3 Tint van kleuren	54		
4.5.4 Herkenning van patronen	54		
4.5.5 Interpretatie van analoge luchtfoto's	56		
4.6 Casestudy analoge luchtfoto's	58		
Hoogkarspel-Tolhuis. West-Friesland 2.0: luchtfoto's van Metz digitaal bekeken	58		
5 Digitale luchtfoto's en sensorbeelden	65		
5.1 Inleiding	65		
5.2 Korte historische terugblik	65		
5.3 Kwaliteitskenmerken	66		
5.4 Archeologische toepassingen	68		
5.4.1 Digitale luchtfoto's in het zichtbare spectrum	68		
5.4.2 Digitale satellietbeelden in het zichtbare spectrum	68		
5.4.3 Sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum	68		
5.5 Casestudy's luchtfoto's en sensorbeelden in het zichtbare spectrum	71		
Kloosterzande-Drogendijk. Cirkels in het Zeeuwse land	71		
Diepenheim-Den Haller. Mogelijke voorganger van het huidige kasteel van Diepenheim	74		
Maredsous-Biert. Vlekken in akkerland ten zuiden van Maredsous	78		
Ieper-Frezenberg. 'Het Westelijke Front' in België (1914-1918)	81		
5.6 Casestudy's sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum	84		
Groenlo-Friese Schans. Sporen van circumvallatielinie uit 1627	84		
Nordfriesland-Pellworm. Middeleeuwse nederzetting in Duitse Waddenzee	87		
6 LiDAR en het Actueel Hoogtebestand Nederland 93	93		
6.1 Inleiding	93		
6.2 Wat is LiDAR?	93		
6.3 Korte historische terugblik	95		
6.4 AHN-producten	96		
6.4.1 LAZ-puntenwolk	96		
6.4.2 Digitaal terreinbestand	96		
6.4.3 Digitaal hoogtebestand	96		
6.5 Kwaliteitskenmerken	97		

6.5.1	AHN1 (1997-2004)	97			
6.5.2	AHN2 (2007-2012) en AHN3 (2014-2019)	97			
6.5.3	AHN4 (2020-2022)	97			
6.6	Archeologische toepassingen	98			
6.6.1	Opsporen van vindplaatsen	98			
6.6.2	Landschapsreconstructie en -kenschets	101			
6.6.3	Archeologische monitoring	102			
6.6.4	<i>Citizen science</i>	102			
6.6.5	Overige toepassingen	103			
6.7	Visualisaties	103			
6.7.1	Kleurenraster	103			
6.7.2	Hillshade	104			
6.7.3	Slope	104			
6.7.4	Aspect	104			
6.7.5	Local relief model	104			
6.8	Casestudy's LiDAR	106			
	Hilversum-Hoorneboegse Heide. Prehistorische raatakkers en grafheuvels op bewerkte AHN-beelden	106			
	Leuven-Heverleebos. Herinventarisatie van prehistorische grafheuvels	110			
	Kanne-Caestert. Een oppidum uit de ijzertijd	112			
7	Remote sensing-beelden in combinatie met andere bronnen	115			
7.1	Inleiding	115			
7.2	Remote sensing-beelden en kaartbronnen	115			
7.2.1	Landschapskaarten	115			
7.2.2	Archeologische kaarten in Archis	116			
7.2.3	Historische topografische kaarten	116			
7.3	Het combineren van kaartbronnen in GIS	117			
7.3.1	Inleiding	117			
7.3.2	Kwaliteitsaspecten GIS	117			
7.3.3	Voorbeelden	119			
7.4	Casestudy's remote sensing in combinatie met andere bronnen	121			
	Alkmaar-Oudorpolder. Toegangsweg tot kasteel de Nieuwburg	121			
	Lichtenvoorde-Harreveld. Burgerparticipatie in de luchtfotografie	126			
	Gennep-Gennepershuis. Onderzoek van de Staats-Spaanse linie	130			
	Vught-De Gement. Vestingwerken van het Beleg van 's-Hertogenbosch in 1629	145			
	Siegerswoude-Middenwei. Thermisch infrarood remote sensing van een laat-middeleeuwse nederzetting	149			
9	Drone remote sensing en kennisontwikkeling: Hof van Maarland	153			
9.1	Inleiding	153			
9.1.1	Aanleiding	153			
9.1.2	Doelstelling	153			
9.1.3	Onderzoeksgebied Hof van Maarland	154			
9.2	Bureauonderzoek	155			
9.2.1	Inleiding	155			
9.2.2	Geomorfologie, bodem en reliëf	155			
9.2.3	Historie van de Hof van Maarland, een wandelend ontginningsdorp	155			
9.3	Informatie uit andere prospectiemethoden	157			
9.3.1	Inleiding	157			
9.3.2	Oppervlaktekartering	157			
9.3.3	Geofysisch onderzoek	158			
9.4	Drone remote sensing	161			
9.4.1	Inleiding	161			
9.4.2	Experimenteren met onderzoeksmethoden	162			
9.4.3	Vlieghoogte en resolutie	162			
9.4.4	Moment van vliegen	162			
9.4.5	Zonnestand	162			
9.5	Resultaten	164			
9.5.1	Inleiding	164			
9.5.2	Bodemverkleuringen	164			
9.5.3	Gewasverkleuringen	164			
9.6	Fototechnieken	166			
9.6.1	Inleiding	166			
9.6.2	Orthofoto's	166			
9.6.3	Oblique luchtfoto's	167			
9.6.4	Verticale versus oblique luchtfoto's	168			
9.6.5	Orthofotomozaïek	168			
9.6.6	Slagschaduw	170			
9.6.7	Camera-instellingen	170			
9.7	Conclusies en vervolgonderzoek	171			
9.7.1	Inleiding	171			
9.7.2	Hof van Maarland	171			
9.7.3	Kennisontwikkeling droneonderzoek	172			
9.7.4	Vervolgonderzoek	173			
	Deel III - Inventariserend veldonderzoek	135			
8	Drone remote sensing	137			
8.1	Inleiding	137			
8.2	Korte historische terugblik	137			
8.3	Kwaliteitskenmerken	139			
8.4	Archeologische toepassingen	140			
8.5	Casestudy's drone remote sensing	145			
	Deel IV – Synthese en blik op de toekomst	175			
10	Synthese, aanbevelingen en toekomst	177			
10.1	Inleiding	177			
10.2	Wat bepaalt de zichtbaarheid van archeologische vindplaatsen?	177			
10.2.1	Inleiding	177			

10.2.2	Natuurlijke factoren	177
10.2.3	Grondgebruik en gewas	178
10.2.4	Weersomstandigheden en seizoenen	178
10.2.5	Aard van de archeologische overblijfselen	179
10.3	Met een brede (terug)blik is vaak meer te zien	180
10.4	De waarde van de veldtoets	181
10.5	Praktische aanbevelingen	181
10.6	Doorzicht naar de toekomst	182
	Literatuur	185
	Verklarende woordenlijst	191

Waar ligt wat en wat is de waarde ervan voor de geschiedenis van Nederland? Dat zijn de primaire vragen waarmee de archeologische monumentenzorg begint. Want archeologisch erfgoed is een kwetsbare en eindige bron die – anders dan bij historische documenten – maar één keer kan worden gelezen, tijdens een archeologische opgraving. Daarna is de context verdwenen en wat niet is verzameld of gedocumenteerd, is voorgoed verloren. In ons kleine, dichtbevolkte land waar veel ingrepen in de bodem plaatsvinden voor onder andere woningbouw, infrastructuur en natuurontwikkeling, is een goede uitvoering van die beginfase van het proces van archeologische monumentenzorg cruciaal.

Deze zorg voor het archeologische archief is vooral gelegd bij gemeenten. Zij hebben de belangrijke taak ervoor te zorgen dat deze inventarisaties, waarderingsen en selecties worden uitgevoerd, niet alleen ten behoeve van de geschiedschrijving van hun eigen gemeente en inwoners, maar ook voor die van de regio, Nederland, en daarbuiten.

Door kennis over archeologie, geologie, geomorfologie en bodem in bijvoorbeeld kaarten te combineren, kan worden aangegeven waar we wat aan archeologie kunnen verwachten. De volgende stap is die verwachting door middel van veldwerk omzetten in concrete informatie: welke archeologische resten zijn nu echt aanwezig en wat zijn de inhoudelijke en fysieke kwaliteiten van die vindplaats. Boringen zetten, akkers op resten afspeuren of proefsleuven uitgraven zijn beproefde manieren om dit ‘prospecteren’ vanaf het maaiveld vorm te geven. Maar ook een blik vanuit de lucht kan hierbij helpen. De rond de Tweede Wereldoorlog door de Topografische Dienst en de Royal Air Force gemaakte luchtfoto’s van Nederland bleken bijvoorbeeld ook van nut om archeologische fenomenen op te sporen, zoals raatakkers

uit de ijzertijd en versterkingen uit de middeleeuwen. De afgelopen decennia is er een breed scala aan nieuwe of vernieuwde methoden en technieken van remote sensing – op afstand waarnemen – ontwikkeld dat voor archeologische prospectie gebruikt kan worden. Omdat deze non-destructieve technieken grotendeels van buiten de archeologie komen, is de bekendheid ervan en de kennis erover versnipperd en niet bij alle spelers in het archeologisch veld even goed bekend. De Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed probeert gemeenten en andere partijen met kennis en advies bij te staan in hun zorg voor de archeologie. Vanuit die gedachte is binnen het project ‘Prospectie’ van het programma ‘Kennis voor Archeologie’ een overzicht gemaakt van technieken van remote sensing en wat dit ‘zien vanuit de lucht’ voor toepassing in de archeologische praktijk kan betekenen. Dit bijeenbrengen is gedaan door een team van auteurs van de Rijksdienst, in samenwerking met Universiteit Gent, Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Agentschap Onroerend Erfgoed Brussel, BAAC Vlaanderen, ArcheoPro, gemeente Alkmaar, gemeente Vught, Hogeschool Saxion Deventer, vrijwilligers in de archeologie en Universiteit van Amsterdam.

Ik hoop dat u de hier bijeengebrachte informatie over dit onderwerp met plezier zult lezen en dat het van nut zal zijn en inspireert bij toekomstig bureauonderzoek en inventariserend veldonderzoek. Wij nodigen iedereen uit verder over dit belangrijke en veelbelovende onderwerp na te denken en met ons kennis en ervaringen uit te wisselen, zodat we de mogelijkheden van remote sensing kunnen benutten voor een nog betere archeologische monumentenzorg.

Roel Lauwerier
Programmaleider Kennis voor Archeologie

Nederland heeft een lange en rijke traditie op het gebied van archeologische prospectie. Onder prospectie wordt verstaan het opsporen en nader in kaart brengen van archeologische resten (vondsten en sporen) en de aardkundige of landschappelijke context van deze resten. Hiervoor gebruiken archeologen verschillende methoden van veldonderzoek, waaronder oppervlaktekartering en boor- en proefsleuvenonderzoek. Ze vormen al vele decennia het fundament van archeologisch veldwerk in Nederland en hebben geleid tot de ontdekking van vele vindplaatsen.

Remote sensing, letterlijk 'op afstand waarnemen', is voor de Nederlandse archeologie een relatief nieuw begrip. Het omvat een verzameling van technieken waarmee vanuit de lucht en vanaf een bepaalde hoogte gegevens over het aardoppervlak worden verzameld. Denk aan satellieten en vliegtuigen die zijn uitgerust met hoogwaardige meetinstrumenten (sensoren) en die daarmee het oppervlak aftasten. Dat levert luchtfoto's en sensorbeelden op die een actueel en gedetailleerd overzicht bieden van het aardoppervlak. Analoge en digitale luchtfoto's in het zichtbare spectrum kunnen inmiddels in grote aantallen worden geraadpleegd via websites van aanbieders als Google Maps, Google Earth of Publieke Dienstverlening Op de Kaart (PDOK). Met het blote oog zijn op deze beelden verkleuringen (anomalieën) te zien die wijzen op archeologische vindplaatsen in de ondiepe ondergrond. Goede voorbeelden zijn verkleuringen van het gewas (*crop marks*) en schaduwverkleuringen (*shadow marks*) met een onnatuurlijke vorm, bijvoorbeeld perfecte cirkels, kaarsrechte lijnen, zigzagvormen of herhaalde patronen. Dit wijst op sporen van activiteiten die door mensen in het verleden zijn uitgevoerd. Luchtfoto's en satellietbeelden uit de droge en hete zomers van 2018, 2019 en 2020 hebben een schat aan nieuwe meldingen van gewasverkleuringen opgeleverd. Tal van greppelpatronen zijn herkend die te relateren zijn aan bijvoorbeeld circumvallatielinies, verkavelingsystemen, wegen, mottekastelen en loopgraven. Een belangrijk product van laseraltimetrie (hoogtemetingen met behulp van laserstralen) is het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Voor archeologen is het AHN een zeer waardevolle informatiebron, bijvoorbeeld voor het opsporen van laat-prehistorische grafheuvels en raatakkercomplexen. Het gaat om archeologi-

sche verschijnselen die door vaak kleine reliëfverschillen afwijken van de natuurlijke omgeving en daarom zichtbaar zijn op het AHN.

Hoewel analoge luchtfoto's al bijna een eeuw worden benut als bron voor archeologische informatie, is het gebruik van remote sensing-beelden bij archeologisch bureauonderzoek een vrij recente ontwikkeling. Luchtfoto's en satellietbeelden in het zichtbare spectrum en het AHN worden inmiddels standaard gebruikt als bron en voor het sluitstuk van dergelijke onderzoeken: het opstellen van de gespecificeerde archeologische verwachting. De archeologische potentie van sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum, bijvoorbeeld radar-, infrarood- en spectrale beelden, is minder goed bekend. Gebruik van deze sensorbeelden bevindt zich nog in een experimentele fase, al zijn de eerste resultaten veelbelovend. De casus Siegerswoude-Middenwei, waar remote sensing met behulp van een drone is toegepast, laat zien dat het in beeld brengen van thermische infraroodstraling een kansrijke techniek is om archeologische resten op te sporen. De afgelopen jaren zijn in Nederland de eerste ervaringen opgedaan met de inzet van drone remote sensing voor archeologische doeleinden. Deze nieuwe methode blijkt veelbelovend. Terugkijkend op bijna een eeuw van archeologische remote sensing in Nederland kunnen in het kader van de Archeologische Monumentenzorg (AMZ) grofweg zes doelen worden onderscheiden:

1. ontdekking van nieuwe vindplaatsen;
2. documentatie (nader in kaart brengen) van bekende vindplaatsen;
3. monitoren van de fysieke staat van bekende vindplaatsen;
4. documentatie van de landschappelijke context van vindplaatsen en historisch-geografische elementen en structuren;
5. vastleggen van verdwijnende archeologische landschappen;
6. visualisatie van de sociale waarde van archeologisch erfgoed voor een breder publiek.

De doelen 1, 2 en 3 spelen zich af op het schaalniveau van de vindplaats. Aan de hand van remote sensing-beelden kunnen 'nieuwe' vindplaatsen worden ontdekt en de eigenschappen van al bekende vindplaatsen nader worden onderzocht en gedocumenteerd. Ook het monitoren van de fysieke staat van archeologi-

sche rijksmonumenten is in de regel een op vindplaatsen gerichte activiteit. De doelen 4 en 5 zijn toepassingen op de schaal van het landschap. Deze toepassingen richten zich onder andere op het verzamelen van aardkundige informatie over de vroegere en huidige landschappelijke context van vindplaatsen. Denk daarbij aan het gebruik van luchtfoto's en satellietbeelden voor het karteren van fossiele geulsystemen, dekzandruggen, donken en essen in die verschillende landschappen. Vanzelfsprekend spelen remote sensing-beelden ook een belangrijke rol in het onderzoek en het ruimtelijk vastleggen van elementen en structuren die deel uitmaken van het historische cultuurlandschap (wegen, dijken, perceelbegrenzingsen, etc.). Het maken van een digitale kopie van een landschap en de hiermee verbonden archeologische en cultuurhistorische elementen en structuren behoort eveneens tot de mogelijkheden. Deze toepassing kan zinvol zijn, vooral voor plangebieden van grote omvang waar aardkundige en historisch-geografische waarden zullen worden aangetast of zelfs volledig verdwijnen als gevolg van een ruimtelijke ontwikkeling, bijvoorbeeld de aanleg van een woonwijk of het uitgraven van een nevengeul. Het karteren en begrenzen van (paleo)landschappelijke of geomorfologische eenheden als uitgangspunt voor een gespecificeerd archeologisch verwachtingsmodel vindt eveneens op de schaal van het landschap plaats. Ten slotte omvat doel 6 meer actuele toepassingen waarin aandacht is voor de maatschappelijke betekenis en sociale waarde van erfgoed. Met behulp van remote sensing-beelden kunnen op vindplaats- en landschapsniveau visualisaties worden gegenereerd die aansprekend zijn voor het grote publiek. Daardoor krijgt

vaak onbekend erfgoed een sociale waarde en betekenis. Bovendien kunnen geïnteresseerden daar zelf een bijdrage aan leveren door te participeren in allerlei projecten (burgerwetenschap). Deze publicatie is samengesteld om de principes, producten, betekenis en meerwaarde van archeologische remote sensing goed voor het voetlicht te brengen. We gaan daarbij in op specifieke producten met als doel dat deze structureel en beter benut zullen worden tijdens archeologisch bureauonderzoek en inventariserend veldonderzoek in Nederland. We richten ons expliciet op data die met behulp van camera's of sensoren vanuit de lucht zijn gegenereerd en die voor archeologische doeleinden hun bruikbaarheid hebben bewezen. Daarbij komen allerlei voorbeelden uit bovengenoemde doelen en schaalniveaus (vindplaats, landschap) ter sprake, maar we richten ons vooral op de doelen 1 en 2. De reden hiervan is dat deze publicatie zich vooral op archeologische prospectie richt. Verder heeft dit rapport uitsluitend betrekking op het opsporen en nader onderzoeken van archeologische resten in *landbodems*. Het gebruik van innovatieve sensortechnologie voor het onderzoek van verdrinken landschappen en archeologische resten in waterbodems wordt in dit rapport buiten beschouwing gelaten. Ten slotte willen we benadrukken dat het gaat om de toegevoegde waarde van remote sensing voor archeologische prospectie, dus niet om remote sensing als vervanging van 'traditionele' methoden van inventariserend veldonderzoek (oppervlaktekartering, boor- en proefsleuvenonderzoek), maar als zeer welkome aanvulling daarop.

The Netherlands has a long and rich tradition when it comes to archaeological prospection. Prospection is the identification and documentation of archaeological remains (finds and features) and their geological or landscape context. Prospecting archaeologists use a range of field research methods, including surface mapping, borehole surveys and trial trenching. These have underpinned archaeological fieldwork in the Netherlands for many decades and have led to the discovery of many sites. Remote sensing is a relatively new concept in Dutch archaeology. It covers a variety of techniques for the aerial collection of data about the Earth's surface. This includes the use of satellites and aircraft equipped with high-tech instruments (sensors) to scan the surface. The result is aerial photographs and sensor images that give a detailed and up-to-date overview. Large numbers of analogue and digital aerial photos in the visible spectrum are now available on the websites of providers such as Google Maps, Google Earth or Public Services on the Map (PDOK). Viewed with the naked eye, these images regularly show anomalies that indicate archaeological findspots in the shallow subsurface. Good examples are crop marks and shadow marks of an unnatural shape, such as perfect circles, straight lines, zigzag shapes or repeated patterns, all of which point to traces of past human activity. Aerial photos and satellite images from the hot, dry summers of 2018, 2019 and 2020 have yielded a treasure trove of new crop mark reports. Many ditch patterns have been identified that can be linked to features such as lines of circumvallation, land parcelling systems, roads, motte and bailey castles, and trenches. Another invaluable source of information for archaeologists is the Digital Elevation Model of the Netherlands (AHN), an important product of laser altimetry (measuring heights using laser scanning). It can be used, for example, to detect late prehistoric burial mounds and Celtic field complexes. Archaeological phenomena like these are visible in the AHN because of – often small – differences in relief, which make them stand out from their natural surroundings. Although analogue aerial photos have served as a source of archaeological information for almost a century, the use of remote sensing images in archaeological desk research is a fairly recent development. Aerial photos and satellite images in the visible spectrum and the AHN have

now become a standard source and represent the final step in desk research: preparing a predictive archaeological model. The archaeological potential of sensor imagery in the non-visible spectrum, such as radar, infrared and spectral images, is less well known. The use of these sensor images is still in the experimental phase, although the initial results are encouraging. The Siegerswoude-Middenwei case study, involving remote sensing with the aid of a drone, shows that thermal infrared imaging is a promising technique for the detection of archaeological remains. Recent years have seen the first experiences in the Netherlands with drone remote sensing for archaeological purposes. This new method shows a good deal of promise.

Looking back on almost a century of archaeological remote sensing in the Netherlands, we can broadly identify six objectives in the context of archaeological heritage management (AMZ):

1. to discover new findspots
2. to document known sites
3. to monitor the physical state of known sites
4. to document the landscape context of sites and historical geographical elements and structures
5. to record archaeological landscapes that are disappearing
6. to visualise the social value of archaeological heritage for a wider audience.

Objectives 1, 2 and 3 relate to the site level.

Remote sensing images can be used to discover 'new' findspots and to further investigate and document the characteristics of known sites.

Monitoring the physical state of national archaeological heritage is generally also a site-based activity.

Objectives 4 and 5 relate to the level of landscape. Here, the main focus is on gathering geological information about the past and present landscape context of sites. This includes using aerial photos and satellite images to map fossil ditch systems, coversand ridges, river dunes (*donken*) and anthropogenic soils (*essen*) in the different landscapes. Of course, remote sensing imagery also plays an important role in researching and spatially documenting elements and structures that are part of the historical cultural landscape (such as roads, dykes and plot boundaries). Another possible application is creating a digital copy of a landscape and its associated archaeological and

cultural historical elements and structures. This may be useful, especially for large planning areas where geological and historical geographical values will have been eroded, or have even disappeared entirely, as a result of spatial planning developments involving the construction of residential areas or the digging of high-water channels. Mapping and delineating palaeolandscapes or geomorphological units as the foundation for a predictive archaeological map also relates to the landscape level. Finally, objective 6 involves more current applications that take into account the value and social significance of heritage. Remote sensing images can be used to generate visualisations at the site and landscape level that appeal to the general public. Unknown heritage can often acquire a social value and meaning in this way. And interested parties can make their own contribution by engaging in a variety of projects (citizen science). This publication has been compiled to highlight the principles, products, meaning and added value of archaeological remote sensing.

We discuss specific products with a view to ensuring their regular and more effective use in archaeological desk research and inventory field research in the Netherlands. We focus explicitly on data generated from the air using cameras or sensors and with proven worth for archaeological purposes. Although we discuss a wide variety of examples for each of the above objectives and levels (site, landscape), our main focus is on objectives 1 and 2. That is because archaeological prospection is our chief concern. This publication deals solely with the identification and further investigation of archaeological remains in the soil. It does not discuss the use of innovative sensor technology to investigate drowned landscapes and submerged archaeological remains. Finally, our aim is to emphasise the added value of remote sensing for archaeological prospection. We do not regard it as a replacement for 'traditional' methods of inventory field research (surface mapping, borehole surveys and trial trenching) but as a very welcome addition.

Deel I – De basis

Het belang van remote sensing voor de archeologische monumentenzorg

Remote sensing betekent letterlijk ‘op afstand waarnemen’. In de ruimste zin van het woord gaat het om een verzameling van technieken waarmee vanaf een bepaalde hoogte data over het aardoppervlak worden verzameld. De dataverzameling wordt uitgevoerd met instrumenten (camera’s, sensoren) die zijn bevestigd aan meetstations, zoals satellieten, vliegtuigen, helikopters, drones en luchtballonnen, en het aardoppervlak als het ware aftasten. Zeker digitale vormen van remote sensing zijn ruimtelijk nauwkeurig en geven een beeld van de actuele situatie. Door bewerking van de data (de gemeten signalen) en het genereren van beelden (luchtfoto’s, sensorbeelden) is het mogelijk om afwijkingen in bijvoorbeeld de gezondheid van de vegetatie te herkennen en te interpreteren.

Die afwijkingen (anomalieën) kunnen wijzen op archeologische vindplaatsen in de ondergrond. Een voor archeologen belangrijk product van laseraltimetrie (hoogtemetingen met behulp van laserstralen) is het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Dit bestand is zeer goed bruikbaar voor het opsporen van bepaalde typen vindplaatsen op basis van vaak subtiele reliëfverschillen.

Bovengenoemde producten van remote sensing (luchtfoto’s, sensorbeelden en AHN) zijn voor archeologen van grote betekenis, bijvoorbeeld voor het opsporen, begrenzen en nader in kaart brengen van ‘nieuwe’ vindplaatsen. Maar ook zijn ze geschikt voor het visualiseren en monitoren van de fysieke staat van bekende vindplaatsen, waaronder de archeologische rijksmonumenten, en het landschap waarvan deze vindplaatsen deel uitmaken.

1.1 Inleiding

Nederland heeft een lange en rijke traditie op het gebied van archeologische prospectie.¹ Al decennialang wordt het maaiveld en wat daar aan archeologische relicten onder ligt, onderzocht. Met oppervlaktekarteringen, het zetten van boringen of het graven van proefsleuven – er zijn allerlei verschillende manieren om vindplaatsen op te sporen en in kaart te brengen. Remote sensing, letterlijk ‘op afstand waarnemen’, is een wat jongere loot van de archeologische prospectie, hoewel het bestuderen van analoge luchtfoto’s al vanaf de jaren dertig van de vorige eeuw werd gedaan. Het waarnemen vanaf een zekere hoogte boven het aardoppervlak levert duidelijke voordelen op, omdat dit vogelvluchtperspectief letterlijk een andere kijk biedt. Archeologische relicten die vanaf het maaiveld niet zichtbaar zijn, komen nu wel in beeld.

De afgelopen twintig jaar hebben grote technologische veranderingen gezorgd voor een omwenteling in de wereld van remote sensing. Niet alleen zijn er vliegtuigen, satellieten en meer recentelijk ook drones met steeds geavanceerdere meetinstrumenten en camera’s het

luchtruim ingegaan, ook zijn sensoren kleiner en goedkoper geworden, computers sneller en de software geavanceerder. Bovendien is er een sterke toename in de beschikbaarheid, hoeveelheid en kwaliteit van luchtfoto’s, satellietbeelden en andere sensorbeelden op het internet. Die bredere beschikbaarheid heeft er toe geleid dat steeds meer mensen geïnteresseerd zijn in remote sensing-beelden en wat erop te zien is. Ondanks deze grotere toegankelijkheid van beelden – het opsporen van archeologie van achter het eigen beeldscherm is nog nooit zo makkelijk geweest – was er geen helder, actueel overzicht van wat remote sensing-beelden zijn, welke archeologische toepassingen er zijn en welke betekenis ze (kunnen) hebben voor de archeologische monumentenzorg.

1.2 Remote sensing en archeologische monumentenzorg

Remote sensing is tegenwoordig niet meer weg te denken uit de hedendaagse maatschappij en wetenschap. Voortdurend wordt het aardoppervlak voor allerlei, zeer uiteenlopende, doeleinden met hoogwaardige technologie vanuit de lucht geobserveerd en de ingewonnen

¹ Kattenberg *et al.* 2008.

data worden in tal van domeinen gebruikt, zoals defensie, landbouw, natuurbeheer, bosbouw, watermanagement, weerkunde, klimaatwetenschap en seismologie, om een paar concrete toepassingsgebieden te noemen. Denk bijvoorbeeld aan precisielandbouw, waarbij Land- en Tuinbouworganisatie Nederland (LTO) met drones en satellieten gewasopbrengsten en -schade monitort. Rijkswaterstaat, Wageningen University & Research, Universiteit Utrecht en Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) zijn voorbeelden van andere Nederlandse organisaties die remote sensing standaard toepassen in hun onderzoek, onderwijs en advisering. Ook voor thema's als milieu, klimaat, gezondheid en veiligheid levert remote sensing informatie van onschatbare waarde op.

In deze rapportage wordt het begrip archeologische remote sensing gebruikt als verzamelnaam voor technieken waarmee archeologische waarden vanuit de lucht, dat wil zeggen zonder ingreep in de bodem, kunnen worden opgespoord en nader onderzocht. Wereldwijd zijn er talrijke archeologische toepassingen van remote sensing met belangrijke, betrouwbare en aansprekende resultaten.² Ook in het licht van de archeologische monumentenzorg (AMZ), met als belangrijke doelstellingen het opsporen, nader in kaart brengen, waarden en veiligstellen van archeologisch erfgoed, is het palet aan internationale studies en praktijkvoorbeelden enorm breed.³

In het kader van de AMZ in Nederland kunnen grofweg zes doelen worden onderscheiden:

1. ontdekking van nieuwe vindplaatsen;
2. documentatie (nader in kaart brengen) van bekende vindplaatsen;
3. monitoren van de fysieke staat van bekende vindplaatsen;
4. documentatie van de landschappelijke context van vindplaatsen;
5. vastleggen van verdwijnende archeologische landschappen;
6. visualisatie van de sociale waarde van archeologisch erfgoed voor een breder publiek.

De doelen 1, 2 en 3 spelen zich af op het schaalniveau van de vindplaats. Met remote sensing-beelden kunnen nieuwe vindplaatsen worden ontdekt en bekende vindplaatsen nader worden onderzocht en gedocumenteerd. Denk daarbij ook aan het monitoren voor behoud in situ en

het corrigeren van de locatie, begrenzing en omvang van archeologische rijksmonumenten. De doelen 4 en 5 zijn toepassingen van remote sensing-beelden op de schaal van het landschap. Deze toepassingen richten zich op het verzamelen van aardkundige informatie over de vroegere en huidige landschappelijke context van vindplaatsen. Denk daarbij aan het gebruik van luchtfoto's en satellietbeelden voor het karteren van fossiele geulsystemen, dekzandruggen, donken en essen en de visualisatie van vindplaatsen in die verschillende landschappen. Het maken van een digitale kopie van een landschap en de hiermee verbonden archeologische en cultuurhistorische elementen en structuren behoort eveneens tot de mogelijkheden. Deze toepassing kan zinvol zijn, vooral voor plangebieden van grote omvang waar aardkundige en historisch-geografische waarden zullen worden aangetast of zelfs volledig verdwijnen als gevolg van een ruimtelijke ontwikkeling, bijvoorbeeld de aanleg van een woonwijk of het uitgraven van een nevengeul. Ook kan worden gewezen op het karteren en begrenzen van (paleo)landschappelijke zones of geomorfologische eenheden als uitgangspunt voor een gespecificeerd archeologisch verwachtingsmodel. Doel 6 omvat meer actuele toepassingen gericht op de maatschappelijke betekenis en sociale waarde van erfgoed. Met behulp van remote sensing-beelden kunnen visualisaties van archeologisch waardevolle landschappen en vindplaatsen worden gegenereerd die aansprekend zijn voor het grote publiek. Daardoor krijgt vaak onbekend erfgoed een sociale waarde en betekenis. Bovendien kunnen geïnteresseerden daar zelf een bijdrage aan leveren door te participeren in allerlei projecten (burgerwetenschap). In deze publicatie komen allerlei voorbeelden uit beide schaalniveaus (vindplaats, landschap) en de maatschappelijke betekenis ter sprake, maar we richten ons vooral op de doelen 1 en 2. De reden hiervan is dat de focus ligt op archeologische prospectie en het opsporen en het nader documenteren van vindplaatsen als onderdeel van bureauonderzoek en inventariserend veldonderzoek (IVO).⁴ We willen benadrukken dat het gaat om de toegevoegde waarde van remote sensing voor archeologische prospectie, dus niet om remote sensing als vervanging van 'traditionele' methoden van inventariserend veldonderzoek (oppervlaktekartering, boor- en proefsleuvenonderzoek), maar als zeer welkome aanvulling daarop.

² Parcak 2017 biedt een uitgebreid overzicht aan referenties; zie ook bijvoorbeeld Crawford 1921; Bewley 1993; Silver *et al.* 2019; Song, Leidorf & Heller 2019.

³ Cowley 2011.

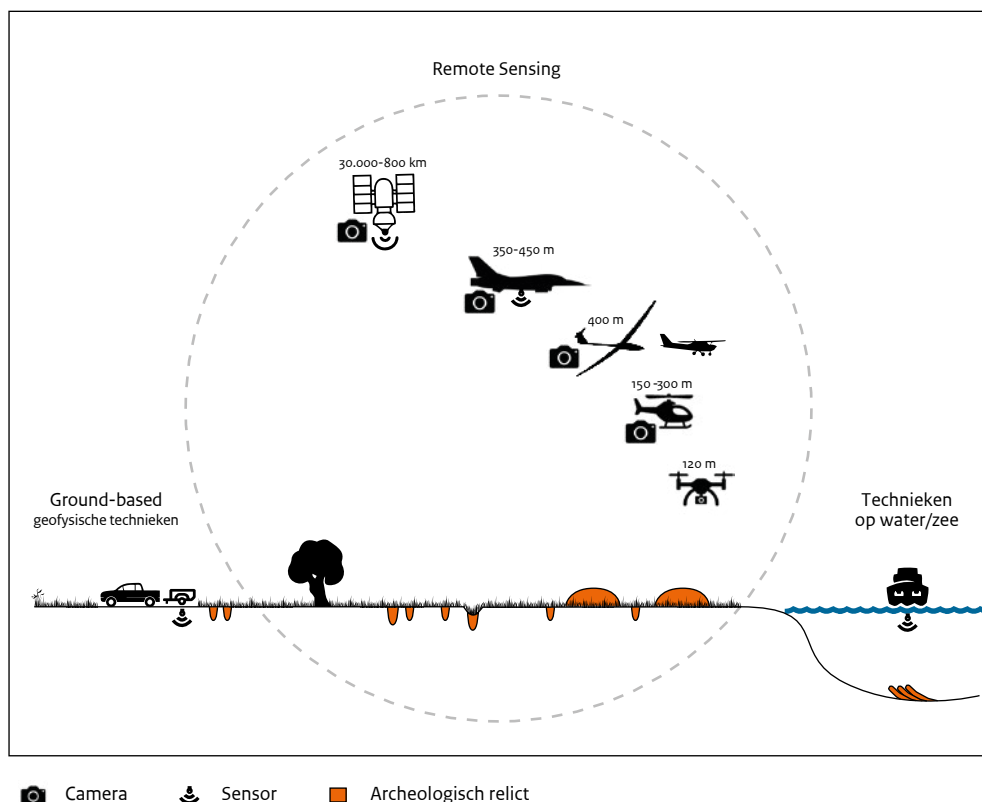
⁴ SIKB 2018.

1.3 Doel, kader, doelgroep en afbakening

Deze publicatie is opgesteld in het kader van het project Prospectie, onderdeel van het programma Kennis voor Archeologie (2018-2021) van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE). Het doel van het rapport is de lezer (nog) meer bewust te maken van de toegevoegde waarde en betekenis van remote sensing voor archeologisch bureauonderzoek en inventariserend veldonderzoek in Nederland. Mede door het presenteren van archeologische praktijkvoorbeelden, in vijftien casestudy's, hopen we het gebruik ervan te stimuleren en te bevorderen. We richten ons primair op professionele archeologen die, conform de kwaliteitseisen van de Kwaliteitsnorm Nederlandse Archeologie (KNA), bureauonderzoek en inventariserend veldonderzoek uitvoeren.⁵ Daarnaast kunnen ook andere groepen van deze publicatie

gebruikmaken. We denken dan aan vrijwilligers in de archeologie, studenten archeologie, liefhebbers van de eigen streekgeschiedenis, historisch-geografen en landschapsonderzoekers. Ten aanzien van de inhoud van dit rapport is de volgende afbakening gehanteerd (afb.1.1):

1. In de literatuur wordt geofysisch onderzoek ook dikwijls tot remote sensing gerekend. Omdat het gaat om *ground-based* technieken die in het veld (met apparatuur 'op de grond') worden toegepast, vallen geofysische technieken buiten de definitie van remote sensing die in het project Prospectie is gehanteerd. Ze worden in dit rapport buiten beschouwing gelaten.⁶
2. Dit rapport heeft uitsluitend betrekking op landbodems. Gebruik en innovatie van methoden en technieken voor het onderzoek van verdrinken landschappen en archeologische resten in waterbodems is integraal onderdeel van activiteiten in het kader van maritieme erfgoedzorg door de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Het gebruik van



Afb. 1.1 Visualisatie van het onderwerp van deze publicatie: remote sensing in dienst van archeologische prospectie, met afbakening van de verschillende toepassingen vanuit de lucht, op het aardoppervlak en op water/zee. In de afbeelding is onderscheid gemaakt tussen camera en sensor. Omdat een camera feitelijk een (passieve beeld)sensor is, is dit onderscheid strikt genomen niet correct.

⁵ Respectievelijk protocol 4002 en protocol 4003 van de Kwaliteitsnorm Nederlandse Archeologie versie 4.1.

⁶ Een publicatie over geofysisch onderzoek van archeologische resten in landbodems is in 2021 verschenen (Ielsma & Verschoof-van der Vaart 2021).

geofysische technieken speelt daarbij een grote rol.⁷ In dit rapport worden ze buiten beschouwing gelaten.

3. Het onderwerp van deze publicatie is de betekenis en het gebruik van opnames van remote sensing voor archeologische doeleinden. We richten ons daarbij in eerste instantie op voor andere doeleinden gecreëerde producten van remote sensing die (ook) voor archeologische prospectiedoel-einden relevant zijn. Maar ook besteden we aandacht aan drone remote sensing als nieuwe techniek voor inventariserend veld-onderzoek (IVO). Achter deze producten en technieken gaat een wereld van hoogwaardige en complexe technologie schuil, inclusief de achterliggende principes van remote sensing en de werking van de technieken waarmee data worden ingewonnen. Bovendien vereisen ze een grondige kwaliteitsanalyse (denk aan vegetatie, sampling-methoden bij LiDAR, opnameseizoenen, radiometrische resolutie, eigenschappen van de bodem, etc.) alvorens een adequate inschatting kan worden gemaakt van de bruikbaarheid van de sensordata voor specifieke doeleinden. Mede vanwege de hoeveelheid en complexiteit van de informatie beoogde dit project niet gedetailleerd inzicht te bieden in deze achterliggende principes, technieken en kwaliteitsanalyses.

1.4 Werkwijze

Ter voorbereiding van het schrijven van dit rapport zijn verschillende werkzaamheden uitgevoerd. Ze zijn onderverdeeld in twee fasen.

Fase 1 Inventarisatie

- het maken van een algemeen overzicht van technieken van remote sensing en actuele ontwikkelingen;
- het voeren van gesprekken met externe specialisten op het gebied van remote sensing;
- het inventariseren van publicaties over toepassingen van remote sensing in de Nederlandse archeologie in heden en verleden;
- het maken van een overzicht van remote sensing-beelden (landelijk, regionaal) die van betekenis (kunnen) zijn voor archeologische prospectie.

Fase 2 Analyse en beoordeling

- het bepalen en analyseren van kwaliteitsaspecten van remote sensing-beelden met het oog op geschiktheid voor archeologisch bureauonderzoek;
- het bepalen en analyseren van archeologische factoren en natuurlijke omstandigheden die de zichtbaarheid van archeologische complex-typen bepalen;
- het bepalen van (de mate van) zichtbaarheid van archeologische complextypen op remote sensing-beelden;
- het verzamelen van praktijkvoorbeelden (casestudy's).

Voor informatie over archeologische remote sensing in Nederland vormde RAAP-rapport 1261 *Remote sensing voor archeologische prospectie en monitoring* uit 2006 een uitstekend startpunt.⁸ De proefschriften over archeologische remote sensing van J.A. Brongers en W.H. de Vries-Metz vermelden relevante Nederlandse toepassingen en publicaties op het gebied van archeologie en luchtfoto-interpretatie respectievelijk tot 1971 en tot in het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw.⁹ Voor ons rapport hebben we tevens gebruikgemaakt van de Nationale Onderzoeksagenda Archeologie, hoofdstuk 6 over archeologische prospectie.¹⁰ Meer actuele gegevens over archeologische toepassingen van remote sensing zijn ontleend aan archeologische rapporten, artikelen in tijdschriften en informatie van websites op internet, waaronder de websites van de archeologische instituten van de Universiteit Leiden en de Universiteit van Amsterdam. Ook is dankbaar gebruikgemaakt van de grote hoeveelheid, door de Nederlandse overheid en commerciële bedrijven en organisaties online beschikbaar gestelde beelden en bijbehorende informatie. Ten slotte is gebruikgemaakt van wetenschappelijke artikelen in Engelstalige vakbladen over remote sensing. Een belangrijk resultaat van fase 1 zijn drie deelrapporten die in het kader van het project Prospectie zijn geschreven. Hierin staat het archeologische gebruik van drie typen van opnames van remote sensing centraal:

1. analoge en digitale luchtfoto's in het zichtbare deel van het spectrum;¹¹
2. sensorbeelden in het niet-zichtbare deel van het spectrum;¹²

⁷ Houkes *et al.* 2017.

⁸ Sueur 2006.

⁹ Brongers 1976; De Vries-Metz 1993.

¹⁰ NOaA 1.0; Kattenberg *et al.* 2008.

¹¹ Rensink & Theunissen 2020.

¹² Feiken & Van der Heiden 2020.

3. het Actueel Hoogtebestand Nederland.¹³

Teksten en afbeeldingen uit de betreffende deelrapporten zijn (deels in aangepaste vorm) samengebracht in deze publicatie.

Als onderdeel van fase 1 (inventarisatie) zijn eind 2019 en begin 2020 gesprekken gevoerd met de volgende personen:

- W.H. Metz, voormalig medewerker van de Universiteit van Amsterdam; Metz is een van de pioniers op het gebied van archeologische kartering door middel van luchtfotografie in Nederland;
- H. van Londen en J. Waagen van de Universiteit van Amsterdam (UvA); beiden zijn archeologen die samenwerken op het gebied van landschapsarcheologie en innovatieve sensortechnologie (onder andere met behulp van drones);
- S. de Jong van de Universiteit Utrecht; De Jong is een expert op het gebied van remote sensing, met name op het gebied van het inwinnen van thermische data door middel van drones;
- J. Bourgeois, B. Stichelbaut en W. Gheyle van de Universiteit Gent; zij voeren uit en begeleiden vanuit het Centrum Historische & Archeologische Luchtfotografie (CHAL) verschillende luchtfotografische projecten.

De werkzaamheden van fase 2 (analyse en beoordeling) omvatten onder meer het opstellen van een matrix 'remote sensing en zichtbaarheid archeologische complextypen (landbodems)'. Deze matrix maakt inzichtelijk welke typen van vindplaatsen (complextypen conform het Archeologisch Basisregister) wel, niet en mogelijk zichtbaar zijn op het AHN, analoge en digitale luchtfoto's en sensorbeelden.¹⁴ Het gaat hierbij om de zichtbaarheid en herkenbaarheid van complextypen met het blote oog, dat wil zeggen een macroscopische beoordeling, eventueel met behulp van een loep of stereoscoop, maar zonder toepassing van visualisatie- of andere digitale bewerkingstechnieken.¹⁵

Een ander product van het project Prospectie is de webviewer 'Remote sensing voor archeologische prospectie' die in 2021 op de website van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed is gepubliceerd.¹⁶ In de viewer kan de gebruiker een kleine, maar vanuit archeologisch oogpunt relevante set van luchtfoto's en satellietbeelden direct raadplegen. Ook zijn er verwijzingen opgenomen naar handige websites waar lucht-

foto's en sensorbeelden kunnen worden bekeken en gedownload. AHN3 maakt eveneens deel uit van de viewer.

Tot slot hebben we op 21 oktober 2021 een goed bezocht digitaal Archeologieplatform rond het thema 'Remote sensing in de archeologie' georganiseerd, waarbij vier sprekers ingingen op hun eigen praktijkvoorbeelden. B. Stichelbaut van de Vakgroep Archeologie Universiteit Gent ging in op sporen van oorlog die op historische luchtfoto's van West-Vlaanderen zichtbaar zijn. N. de Jong-Lambregts (gemeente Alkmaar) nam de toehoorders mee naar de Oudorperpolder, waar een kastelenlandschap aan het licht is gekomen. M. Loos van het Netherlands Space Office lichtte het Satellietdataportaal toe en schetste waar innoveren toe kan leiden. J. Waagen (UvA), ten slotte, bracht de potentie van drone remote sensing naar voren en wat die kan betekenen voor de Nederlandse archeologie. Tijdens de afsluiting is ingegaan op de digitale publicatie, een voorloper van dit boekwerk, met de oproep aan de deelnemers om mee te denken en aan te vullen.¹⁷ Dat heeft uiteindelijk geresulteerd in de uitbreiding van sommige paragrafen en in meer casestudy's.

1.5 De casestudy's

In het kader van dit project zijn we op zoek gegaan naar verschillende aansprekende praktijkvoorbeelden die laten zien wat remote sensing voor de archeologie kan opleveren. Daarbij is samengewerkt met diverse experts uit Nederland en Vlaanderen. Dat heeft geresulteerd in vijftien casestudy's, waarvan tien uit Nederland, vier uit België en één uit het Noord-Duitse Waddenzeegebied (afb. 1.2).

De helft van de casussen betreffen recente ontdekkingen, van slechts enkele jaren geleden. Ze zijn onder meer te danken aan de droge zomers. Vaak neemt een overheid of onderwijsinstelling het initiatief een gemelde ontdekking op te pakken en verder onderzoek te doen, maar soms zijn het archeologische vrijwilligers die – geïntrigeerd door verkleuringen aan het maaiveld – op zoek gaan naar verklaringen.

¹³ De Kort & Van Doesburg 2020.

¹⁴ Voor een overzicht van complextypen in het ABR, zie De Wit & Sloos 2008.

¹⁵ De achtergronden, werkwijze en gebruikte bronnen voor het maken van de matrix worden beschreven in een intern document van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (Feiken 2021) en in het digitale rapport over archeologische remote sensing (Rensink, Theunissen & Feiken 2021).

¹⁶ www.cultureelerfgoed.nl/onderwerpen/bronnen-en-kaarten/overzicht/remotesensing

¹⁷ Rensink, Theunissen & Feiken 2021.



- Casestudy's Actueel Hoogtebestand Nederland en Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen
- Casestudy's Luchtfoto's, zichtbare deel van het spectrum
- Casestudy's Sensorbeelden, niet-zichtbare deel van het spectrum

Afb. 1.2 Ligging van de archeologische vindplaatsen in Nederland, België en de Duitse Waddenzee die in de casestudy's worden behandeld.

1.6 Leeswijzer

Deze publicatie bestaat uit vier delen. Deel I omvat dit inleidende hoofdstuk en hoofdstuk 2, waarin we beknopt toelichten wat de achterliggende principes en technieken van remote sensing zijn.

In deel II staat remote sensing in dienst van archeologisch bureauonderzoek centraal. Hoofdstuk 3 vormt de inleiding van deel II en gaat in op de vraag welke luchtfoto's en sensorbeelden er zijn en welke verkleuringen of tekens die op deze foto's en beelden zichtbaar zijn, archeologische resten (kunnen) verraden. In de

twee daaropvolgende hoofdstukken worden kwaliteitskenmerken en archeologische toepassingen besproken, respectievelijk van analoge luchtfoto's (hoofdstuk 4) en van digitale luchtfoto's (RGB-beelden) en sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum (hoofdstuk 5). Hoofdstuk 6 is volledig gewijd aan laseraltimetrie (LiDAR) en het belangrijkste product hiervan voor de Nederlandse archeologie: het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Deel II sluit af met hoofdstuk 7, waarin de aandacht uitgaat naar het gecombineerde gebruik van remote sensing-beelden en andere kaartbronnen, waaronder historische topografische kaarten. In deel III verschuiven we de aandacht van bureauonderzoek naar inventariserend veldon-

derzoek, met als rode draad: drone remote sensing. In hoofdstuk 8 presenteren we kwaliteitskenmerken en toepassingen van deze nieuwe en veelbelovende techniek van inventariserend veldonderzoek. Hoofdstuk 9 staat in het teken van methode- en kennisontwikkeling op het gebied van drone remote sensing aan de hand van een uniek praktijkvoorbeeld (Hof van Maarland) uit Zuid-Limburg.

Het vierde en laatste deel van het rapport vormt de synthese met een bespreking van leermomenten en aandachtspunten (hoofdstuk 10). Ook zijn in dit hoofdstuk aanbevelingen opgenomen voor archeologische remote sensing in de toekomst in Nederland.

Een belangrijk onderdeel van deel II en deel III zijn casestudy's. Dit zijn vijftien voorbeelden van verschillende archeologische locaties in Nederland, België en Duitsland waar het bestuderen van remote sensing-beelden sporen uit het verleden heeft opgeleverd. Ten slotte zijn verspreid in de hoofdstukken 1 tot en met 9 in totaal vijftien kaderteksten opgenomen waarin de hoofdzaak van de inhoud (synopsis) en een aantal specifieke onderwerpen kort zijn verwoord. Zo is de hoofdlijn van het inhoudelijk betoog makkelijk te volgen.

1.7 Dankwoord

Aan de totstandkoming van dit rapport hebben vele personen hun medewerking verricht. In de eerste plaats willen wij een aantal personen bedanken voor het aanleveren van de casestudy's, inclusief bijbehorend beeldmateriaal: Jean Bourgeois (Universiteit Gent), Koen Deforce (Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen en Universiteit Gent), Jan van Doesburg (RCE), Roeland Emaus (Saxion Deventer), Menno van der Heiden (RCE), Nancy de Jong-Lambregts (gemeente Alkmaar), Nikander Karagiannis (Saxion Deventer), Jan Willem de Kort (RCE), Elle Liagre (BAAC Vlaanderen), Heleen van Londen (Universiteit van Amsterdam), Erwin Meylemans (agentschap Onroerend Erfgoed, Brussel), Joep Orbons (ArcheoPro), Birger Stichelbaut (Universiteit Gent), Bert Terlouw (amateurhistoricus en

-archeoloog), Gijs Timmermans (gemeente Vught), Jitte Waagen (Universiteit van Amsterdam) en Wilko van Zijverden (Saxion Deventer). Voorafgaande aan het schrijven van dit rapport zijn interviews gehouden met Willy Metz (Huizen), Jean Bourgeois, Birger Stichelbaut, Wouter Gheyle, Steven de Jong (Universiteit Utrecht), Heleen van Londen en Jitte Waagen. Deze gesprekken hebben we als zeer prettig en informatief ervaren.

In dit rapport zijn diverse digitale luchtfoto's en sensorbeelden opgenomen die, mede ten behoeve van de casestudy's, beschikbaar zijn gesteld door externe personen. Voor het maken en/of verlenen van toestemming voor publicatie van deze foto's en beelden willen we zeer hartelijk bedanken: Aarnout Bakker, AGEL Adviseurs en Alfadrone, Jan van Dalen (Jan van Dalen fotografie), Joseph Dufey, Ecoflight, Martin Gade (Universität Hamburg), Martin Grevers, Adrie de Kraker, Harry Massop (Wageningen University & Research), Willy Metz, Wouter Roessingh (ADC ArcheoProjecten), Kees de Rooij (AWN), Albert Speelman, Jos Stöver (RCE), Wouter Waldus (RCE) en het Waterschap Aa en Maas. Nico Willemse (RAAP) stelde afbeelding 6.1 over het principe van laseraltimetrie beschikbaar voor publicatie in dit rapport. Onze collega Dian Jansen leverde een belangrijke bijdrage aan de inventarisatie van aanbieders van beelden van remote sensing op het internet en aan de totstandkoming van de webviewer 'Remote sensing voor archeologische prospectie.' Roel Lauwerier, leider van het programma Kennis voor Archeologie van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, waarvan het project Prospectie deel uitmaakte, schreef het voorwoord en voorzag het eerste concept van het manuscript van tekstueel en inhoudelijk commentaar. Menne Kosian leverde afbeeldingen en waardevolle aanvullingen op hoofdstuk 7 over het gecombineerd gebruik van kaartbronnen in een GIS. Voor een deskundige, inhoudelijke toets van het complete manuscript zijn we Willy Metz, Heleen van Londen en Jitte Waagen zeer erkentelijk. *Last but not least* gaat onze dank uit naar collega Bert Groenewoudt voor het autoriseren van deze publicatie en voor zijn waardevolle opmerkingen en suggesties.

2 Remote sensing: principes en technieken

Remote sensing: hoogwaardige sensortechnologie in dienst van de archeologie

Deze publicatie gaat over de betekenis en gebruiksmogelijkheden van remote sensing-beelden voor archeologische doeleinden. Achter deze beelden gaat een wereld van hoogwaardige en complexe technologie schuil. Voorbeelden zijn analoge en digitale luchtfotografie en infraroodspectrometrie. Ze hebben gemeen dat de informatiedrager ervan elektromagnetische straling (EM-straling) is: met behulp van sensoren meten ze de (gereflecteerde) EM-straling van de zon. Er zijn passieve en actieve sensoren. Passieve sensoren meten de reflectie of emissie van (natuurlijke) stralingsbronnen, meestal de zon, aan het oppervlak. Het meest voorkomende voorbeeld is de fotocamera. Twee specifieke sensoren, radar en LiDAR,

treden zelf op als stralingsbron. Deze actieve sensoren zenden zelf vanuit een meetstation een EM-stralingsbundel naar het aardoppervlak en meten de mate van reflectie aan het aardoppervlak om vervolgens daaruit een beeld te construeren. Het voor archeologen belangrijkste product van LiDAR of laseraltimetrie, het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), is een dusdanig omvangrijk onderwerp dat het apart wordt behandeld in hoofdstuk 6. Sensoren en camera's kunnen aan verschillende typen meetstations worden bevestigd. In het geval van satellieten wordt gesproken van *spacial* of *spaceborne* remote sensing. Bij *aerial* of *airborne* remote sensing worden met behulp van (zweef)vliegtuigen, helikopters, luchtballonnen en drones sensordata van het aardoppervlak ingewonnen.

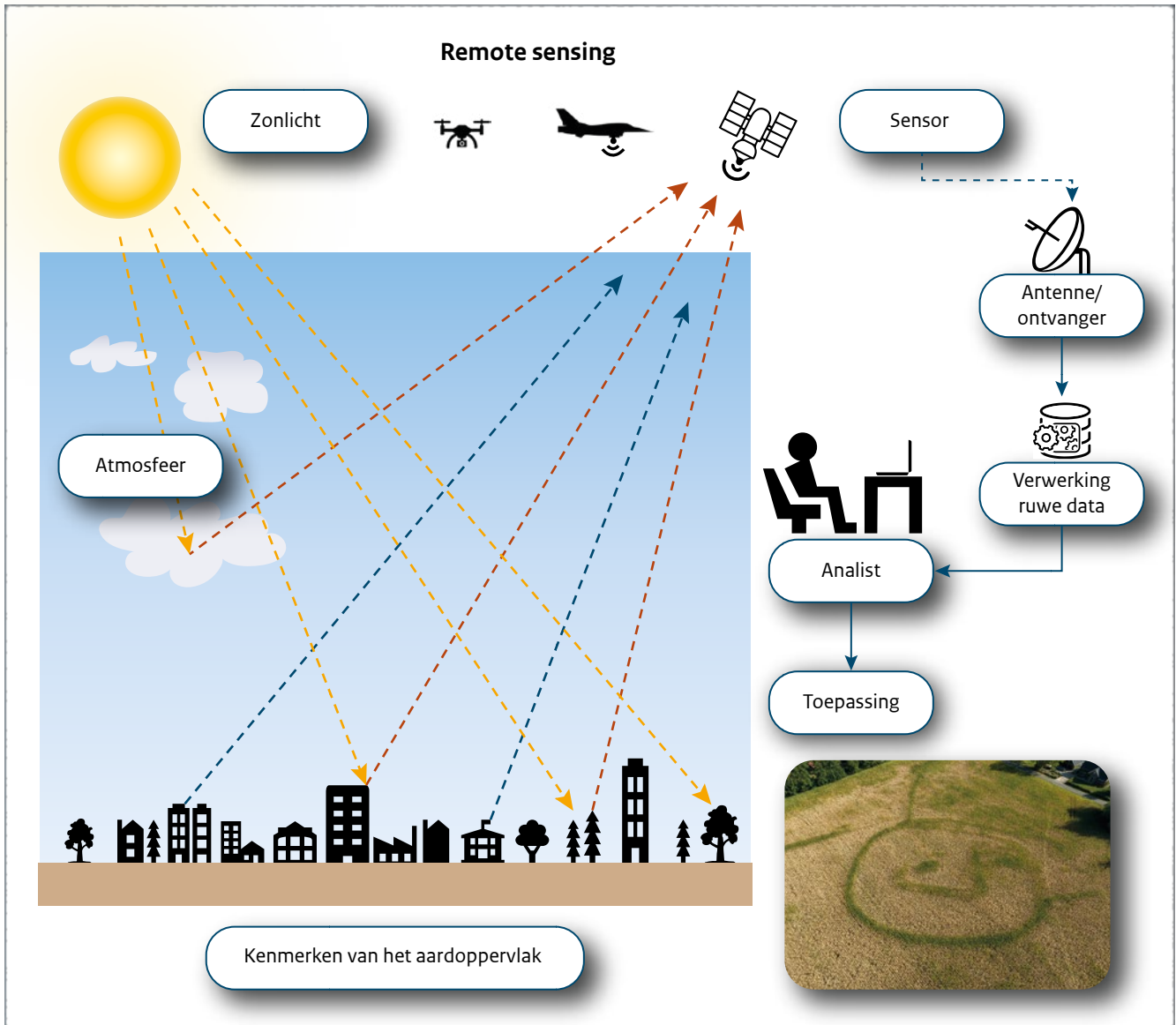
2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat over de achterliggende principes en technieken van remote sensing. We beginnen met een korte inleiding over het principe van remote sensing en lichten het onderscheid tussen opnames (beelden) in het zichtbare en het niet-zichtbare deel van het spectrum toe. Er zijn verschillende technieken van remote sensing. In dit hoofdstuk komen technieken aan de orde die belangrijk zijn voor archeologische prospectie, waaronder analoge en digitale luchtfotografie en infraroodspectrometrie. Genoemde technieken hebben gemeen dat de informatiedrager ervan elektromagnetische straling is: ze meten de (gereflecteerde) elektromagnetische straling van de zon. Het principe van laseraltimetrie (LiDAR), waarbij met behulp van actieve sensoren laserafstandmetingen worden verricht, wijkt hiervan af. Om deze reden hebben we ervoor gekozen deze techniek toe te lichten in hoofdstuk 6 over het belangrijkste product van laseraltimetrie voor de Nederlandse archeologie: het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN).

2.2 Wat zijn de achterliggende principes?

Remote sensing richt zich op het verzamelen van gegevens over het aardoppervlak (zowel land als water) en processen die zich daarop afspelen.¹⁸ De analyse van deze gegevens levert informatie op, niet alleen over het aardoppervlak zelf, of de bedekking van dit oppervlak, maar ook over de aard en toestand van bijvoorbeeld geologische en hydrologische processen en de fase waarin zij zich bevinden. Deze informatie wordt afgeleid uit de wijze waarop door het aardoppervlak en objecten aan het aardoppervlak elektromagnetische straling (EM-straling) wordt gereflecteerd en/of wordt uitgezonden. De EM-straling is daarmee de drager van de informatie. De EM-straling die gebruikt wordt bij passieve remote sensing is over het algemeen afkomstig van de zon (afb. 2.1). Alle objecten op of dicht onder het aardoppervlak reflecteren, absorberen of laten EM-straling in verschillende golflengtes door. De intensiteit van deze straling kan per golflengte worden vastgelegd in een opname. De eigenschappen van de EM-straling die voor remote sensing het meest van belang zijn, zijn de golflengte ('kleur') en de amplitude ('signaalsterkte' of 'intensiteit'). De gemeten hoeveelheid straling, golflengte en amplitude verschaft

¹⁸ Zie bijvoorbeeld Curran 1985.



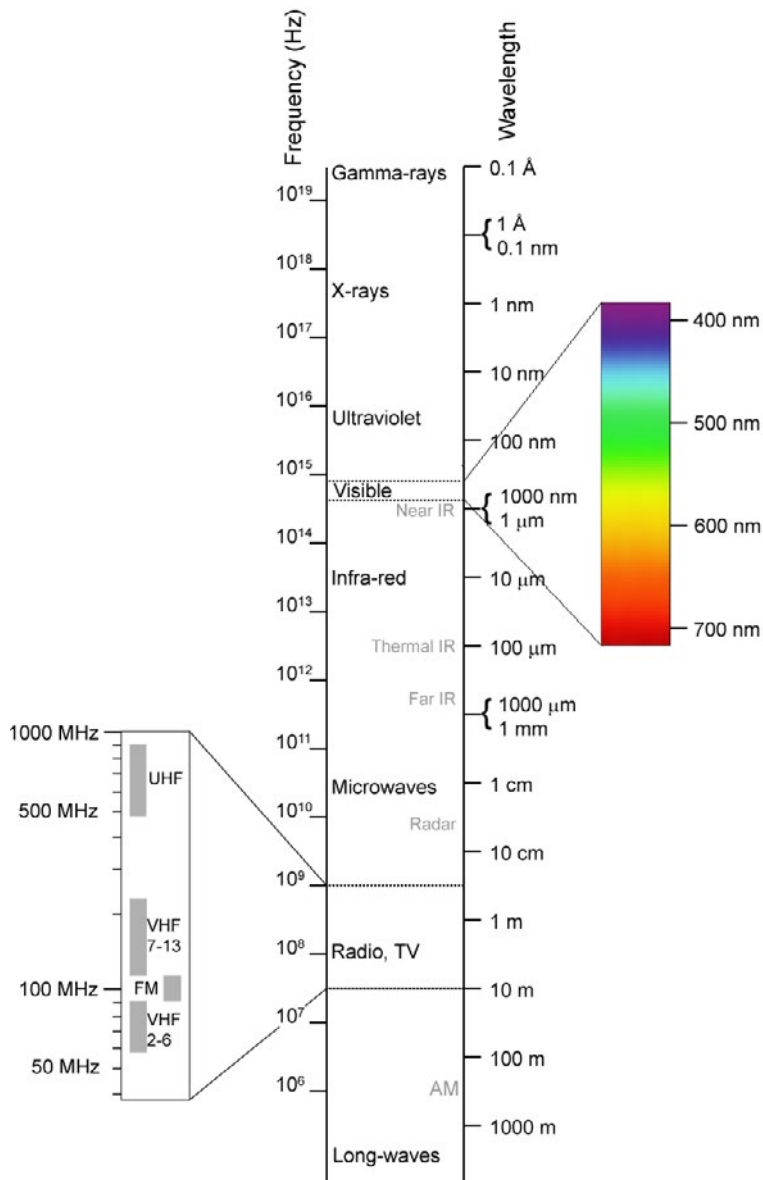
Afb. 2.1 Schematische weergave van het principe (de werking) van remote sensing. Een bron (zoals de zon) straalt elektromagnetische straling uit. Deze straling gaat door de atmosfeer, waar straling wordt geabsorbeerd. De mate van absorptie is golflengteafhankelijk. Als de elektromagnetische straling het object (bijvoorbeeld het aardoppervlak) raakt, dan kan deze straling worden doorgelaten, geabsorbeerd of gereflecteerd. Dit is afhankelijk van de eigenschappen van het materiaal van het object. De gereflecteerde elektromagnetische straling kunnen we meten als een golflengte. Dit wordt ook wel spectrale reflectie genoemd.

informatie over de materie-eigenschappen van het waargenomen object en de toestand waarin het zich bevindt. Voor elk object is deze combinatie van golflengte en reflectiecoëfficiënt uniek.¹⁹ Dit wordt de spectrale signatuur van een object genoemd. Binnen bepaalde intervallen van het spectrum wordt de EM-straling geheel geabsorbeerd door de atmosfeer en kan de aarde die dus ook niet weerkaatsen. Deze golflengtes zijn daarom niet vast te leggen. Niet

alleen kan teruggekaatste straling worden gemeten: een deel van de EM-straling wordt door water en land geabsorbeerd en komt, voor een deel, in een later stadium weer vrij in de vorm van warmte (thermische infraroodstraling). Het licht dat de mens met het oog en zonder verdere bewerking kan waarnemen, bestaat uit EM-straling met een golflengte tussen 0,4 en 0,7 micrometer (μm).²⁰ Foto's gemaakt met een camera (inclusief gewone foto's in het veld)

¹⁹ Reflectiecoëfficiënt is de mate waarin licht wordt gereflecteerd. Deze mate heeft invloed op de intensiteit van straling die wordt gemeten.

²⁰ De tekst van deze paragraaf is grotendeels ontleend aan Sueur 2006, 14-16.



Afb. 2.2 Een overzicht van golflengtes in het zichtbare spectrum en het niet-zichtbare elektromagnetische spectrum (bron: Wikimedia Commons).

maken gebruik van dit zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum.

Buiten deze zichtbare range is EM-straling aanwezig met golflengtes van minder dan 0,000.000.1 m (0,1 μm) tot meer dan 100 m (onder andere gammagolven, röntgen, ultraviolet (UV), nabij-infrarood, midden-infrarood, thermisch infrarood, microgolf en radiogolf, afb. 2.2).²¹ Deze golflengtes kan het menselijk oog niet 'zien'. Met behulp van speciale sensoren kunnen deze 'onzichtbare' golflengtes worden vastgelegd en kunnen ze, na bewerking, voor het menselijke oog zichtbaar worden

gemaakt. Hiermee wordt het 'zichtveld' van de mens met een factor miljoen verbreed.

Een overzicht van verschillende golflengtes met een globale beschrijving van toepassingen van remote sensing is opgenomen als tabel 2.1. De golflengtes zijn gebundeld in bereiken met min of meer dezelfde fysieke karakteristieken: dit worden spectrale banden genoemd. De bandbreedte wordt bepaald door het verschil tussen de hoogste en laagste golflengte binnen de band. Voor de begrenzing van de verschillende kleurenbanden bestaat geen eenduidige gebruiksdefinitie.

²¹ Een micrometer ($=\mu\text{m}$) is gelijk aan 10^{-6} m oftewel 0,000.001 m, een miljoenste deel van een meter.

Tabel 2.1 Spectrale banden, golflengtes en eigenschappen

Spectrale band	Golflengte	Eigenschap
Rood, groen en blauw (RGB) (zichtbaar)	0,4-0,7 μm	natuurgetrouw beeld van de werkelijkheid.
	0,4-0,5 μm	blauw: informatie over bodem en vegetatietypen, gebouwen, wegen, kust en water.
	0,5-0,6 μm	groen: begrenzing tussen vegetatie en wegen of gebouwen.
	0,6-0,7 μm	rood: sterke absorptie door planten, weerkaatsing bij objecten als wegen en gebouwen.
Laser	0,25-10 μm	nauwkeurige afstandsmeting en hoogtemeting.
Nabij-infrarood	0,7-1,3 μm	reflectie in het nabije infrarood is zeer hoog voor vegetatie, hoger dan in het zichtbare groen. Metingen in het infrarode gebied geven inzicht in de (afwijking van de) bodemstructuur, biomassa, vegetatiestress en typen van vegetatie. Grote mate van absorptie bij water, geeft goed contrast nat-droog. Stresssituaties, zoals droogte, ziekte maar ook afwijkingen in de bodemstructuur ten gevolge van archeologische relicten veroorzaken een verandering van de gemiddelde biomassa en dus van de reflectie van infrarood.
Midden-infrarood	1,3-3 μm	de principes zijn gelijk aan die voor het nabije infrarood. De combinatie van metingen in nabij infrarood en midden infrarood verhoogt de kwaliteit van de biomassabepaling. De hoeveelheid bodemvocht kan echter beter worden bepaald dan met nabij infrarood. Onderscheidt ook verschillende gesteentesoorten.
Thermisch infrarood	3,0-14,0 μm	verschillen in warmte-emissie van vegetatie en bodem zijn te relateren aan verschillen in bodemsamenstelling (al dan niet antropogeen), archeologische materialen in de bodem, materialen aan de oppervlakte, topografische verschillen, en vegetatiestress.
Microwave (radar)	1 mm-1 m	ongevoelig voor weersinvloeden; dag en nacht inzetbaar; gevoeligheid voor vochtverschillen in de bodem; gevoeligheid voor textuurverschillen in bodem en vegetatie; kan door vegetatie heen de bodem waarnemen. Reageert in zeer droge gebieden sterk op water (absorbeert radargolven) en gesteenten in ondergrond. Ook menselijke structuren in dergelijke bodems kunnen zichtbaar worden gemaakt.

Bronnen: NASA, Lillesand, Kiefer & Chipman 2008, Sueur 2006, 16: tabel 1, met aanvullingen

2.3 Wat zijn de technieken?

2.3.1 Analoge luchtfotografie

Bij analoge ('klassieke') fototoestellen wordt de beeldinformatie, die als licht de lens passeert, opgeslagen op een lichtgevoelige film. Deze film moet eerst worden ontwikkeld (chemisch bewerkt), waarna de foto's via een nieuwe stap, weer met een chemisch proces, kunnen worden afgedrukt.²²

²² https://nl.wikipedia.org/wiki/Digitale_fotografie.

²³ https://nl.wikipedia.org/wiki/Digitale_fotografie.

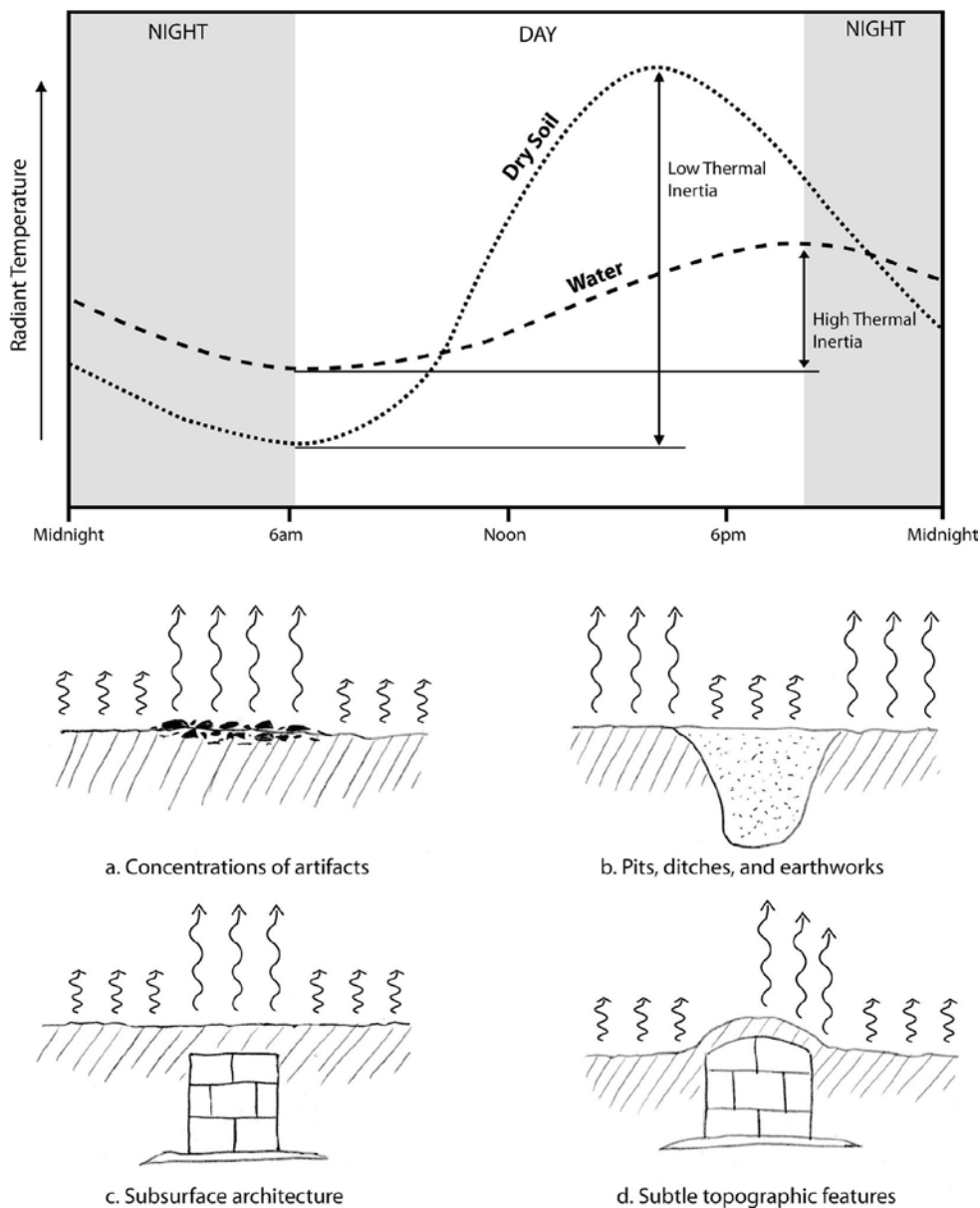
2.3.2 Digitale luchtfotografie

Digitale camera's gebruiken geen lichtgevoelige film. Het aftasten van het beeld gebeurt door een lichtgevoelige elektronische sensorchip. Het bewaren van de foto's gebeurt niet op de sensor, maar in het geheugen van de camera, waarna de afbeelding kan worden opgeslagen op een geheugenkaart of een andere gegevensdrager. Daarna kunnen de foto's worden afgedrukt.²³

2.3.3 Infraroodspectrometrie

Infraroodspectrometrie is een passieve techniek en richt zich op het verzamelen van data en het genereren van beelden in het niet-zichtbare spectrum. Infraroodstraling heeft een frequentie tussen 0,7 en 14 μm en wordt meestal onderverdeeld in de volgende spectrale banden: nabij-

infrarood (NIR, 0,7-1,3 μm), midden-infrarood (MIR, 1,3-3 μm) en thermisch infrarood (TIR, 3-14 μm). Infraroodsensoren registreren de verschillen in warmtestraling (reflectie en emissie) op een perceel. Materialen (zand, klei, steen, water) die in het betreffende perceel aanwezig zijn, hebben verschillende thermische eigenschappen, die de emissie van warmte beïnvloeden. Onder invloed van temperatuurveranderingen kunnen deze verschillen duidelijk



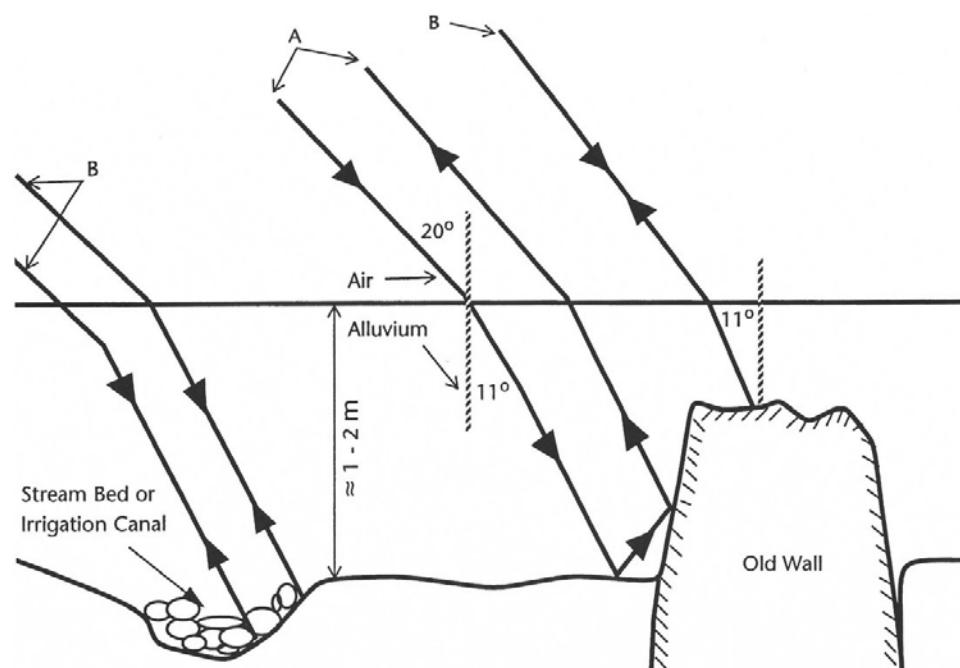
Afb. 2.3 De werking van infraroodsensoren voor het opsporen van archeologische resten en structuren (bron: Casana *et al.* 2017, 312). Het onderste deel van de afbeelding laat archeologische fenomenen zien en de verschillen in *radiant temperature* tussen de natuurlijke ondergrond en deze fenomenen (waardoor ze dus zichtbaar worden op de beelden).

zichtbaar zijn. In thermogrammen verschijnen de verschillen als anomalieën. Ze kunnen duiden op de aanwezigheid van archeologische resten en structuren in de ondiepe ondergrond (afb. 2.3).²⁴ Thermisch-infraroodbeelden kunnen daarom interessant zijn voor archeologische doeleinden.²⁵

2.3.4 Radar

Radar (*radio detection and ranging*) is een actieve techniek. Dat wil zeggen dat de radarapparatuur zelf energie uitzendt (en weer ontvangt) en niet alleen energie ontvangt, zoals bij infraroodspectrometrie. Hierdoor kunnen ook 's nachts metingen worden gedaan. Een antenne zendt zijwaarts radarpulsen (korte pulsen van elektromagnetische energie) uit en dezelfde antenne ontvangt de retourpulsen van het terrein. Vergelijk de verzonden en teruggekaatste lijnen in afb. 2.4. De reflectie door de verschillende objecten (sterker of zwakker) produceert een afbeelding met verschillende grijsinten.²⁶

Synthetic aperture radar (SAR) is een radartechniek die golflengtes meet op de microwaveschaal (1 mm tot 1 m).²⁷ De atmosferische absorptie van deze straling is laag, waardoor bijvoorbeeld wolken de metingen niet in de weg staan. Met de metingen kan een digitaal hoogtemodel worden gecreëerd. Een meer nauwkeurige techniek is die van *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR), waarbij met behulp van minstens twee radaropnames een digitaal hoogtemodel wordt gemaakt. In principe kunnen hiermee hoogteverschillen in kaart worden gebracht die tot op de millimeter nauwkeurig zijn. Een probleem van deze techniek is echter de grote onnauwkeurigheid in locatiebepaling. Om dit te verbeteren worden de gegevens ook wel gekoppeld aan nauwkeurige hoogtemetingen (in Nederland bijvoorbeeld aan het AHN).²⁸ Radar wordt in Nederland onder andere gebruikt voor deformatiemetingen van gebieden, voornamelijk verzakkingen en bodemdaling.²⁹ Met radar kunnen met sediment of dichte begroeiing afgedekte (natuurlijke of antropogene) fenomenen zichtbaar worden gemaakt.³⁰



Afb. 2.4 De werking van radar voor het opsporen van archeologische en natuurlijke structuren. Deze afbeelding laat zien hoe radar wordt gebruikt in een gebied met (droog) zand afgezet door een rivier (*alluvium*) van 1-2 m dik. Door de reflectie van radarpulsen kunnen oude, afgedekte rivierlopen of irrigatiekanalen (*stream bed or irrigation canal*) en muurresten (*old wall*) zichtbaar worden gemaakt (bron: Holcomb & Shingiray 2007, 32).

²⁴ Sueur 2006, 76.

²⁵ Mondelinge mededeling S. de Jong (UU) op 22 januari 2020. De archeologische toepassing van thermisch infrarood was het onderwerp van de onlinepresentatie 'Drone thermography for archaeological applications' door J. Waagen op *Joint Chapter Meeting of CAA Netherlands/Flanders and CAA Germany*, 3 december 2020.

²⁶ De Jong, Addink & Heuff 2015, 37.

²⁷ Chen, Lasaponara & Masini 2017.

²⁸ Van Natijne 2018.

²⁹ Onder andere Muntendam-Bos et al. 2009; McCormack, Thomas & Solomon 2011; Swart 2013.

³⁰ Parcak 2009, 73. 'The penetrating capacity of radar enables it to obtain information on subsurface features when low soil density and low soil moisture conditions permit' (citaat uit: De Jong, Addink & Heuff 2015, 37).

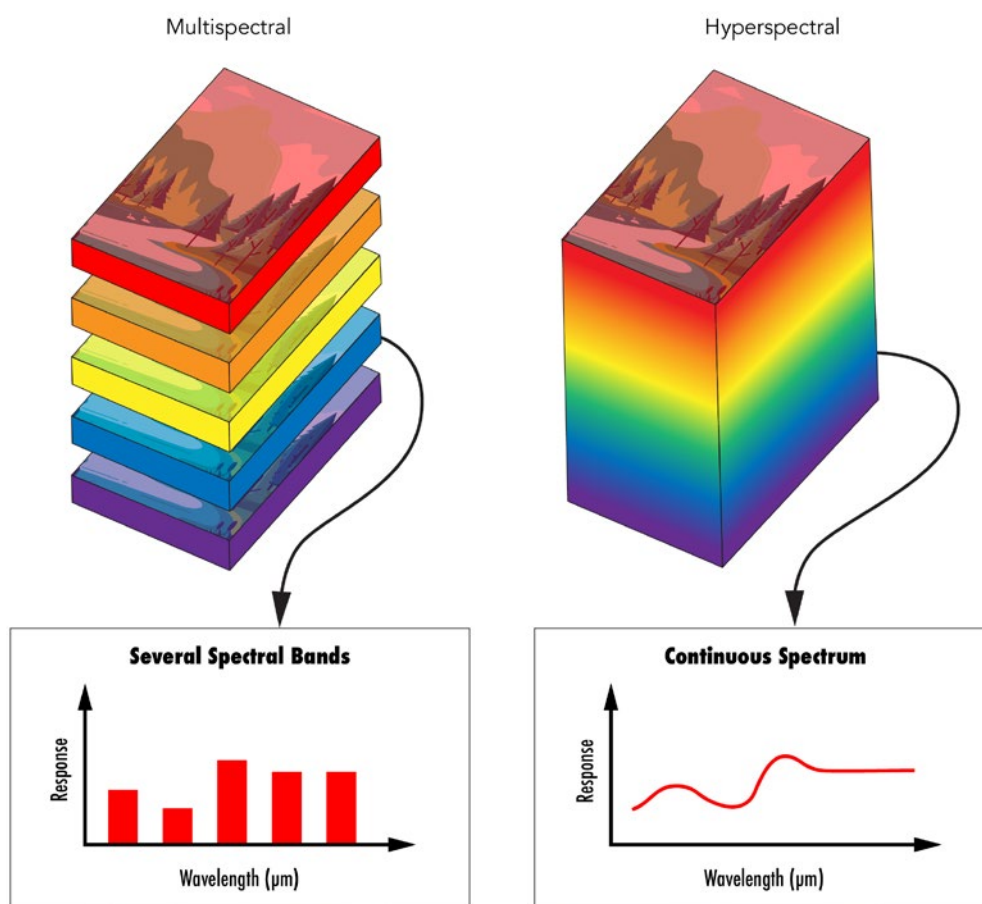
2.3.5 Multi- en hyperspectrale opnames

Spectrale gegevens zijn gegevens van opnames vanuit satellieten, vliegtuigen en drones die meerdere spectrale banden tegelijkertijd vastleggen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen multi- en hyperspectrale opnames.³¹ Het gaat om passieve technieken die uitgaan van hetzelfde principe, namelijk gelijktijdige opnames in meerdere spectrale banden. Het verschil tussen

de technieken is de breedte van de banden en het aantal banden (afb. 2.5).

Bij multispectrale opnames worden drie tot vijftien banden tegelijkertijd vastgelegd. De banden hebben een relatief vrij groot bereik (0,1-0,3 μm) en bestaan vaak uit rood, groen, blauw en bijna-infrarood. Hyperspectrale opnames leggen wel honderden tot duizenden verschillende spectrale banden vast. Deze banden hebben een veel kleiner bereik (0,01 tot 0,02 μm). De zeggingskracht is hierdoor veel groter dan bij multispectrale opnames.

³¹ Sueur 2006; Verhoeven 2018.



Afb. 2.5 Het verschil tussen multispectrale en hyperspectrale opnames. Bij een multispectrale opname (links) wordt een beperkte reeks lichtbanden vastgelegd. Een hyperspectrale opname (rechts) bestaat uit honderden of duizenden lichtbanden en levert vaak meer detail op (bron: edmundoptics.eu).

Infraroodspectrometrie en vegetatiestress: het onzichtbare zichtbaar maken

Nieuwe technologieën van remote sensing hebben een revolutie in het gebruik ervan teweeggebracht. Met behulp van infraroodspectrometrie kan inzicht worden verkregen in de gezondheidstoestand van de vegetatie in een gebied. Een kenmerk van infraroodstraling van de zon is dat het weerkaatst wordt door onder andere het bladgroen (chlorofyl) in planten. Omdat infraroodstraling met het blote menselijke oog niet zichtbaar is, worden speciale sensoren of camera's gebruikt om het vast te leggen. In infraroodluchtfoto's is de mate van weerkaatsing van infrarood te herkennen aan de rode kleur. Hoe meer bladgroen er in een plant aanwezig is, hoe intenser de rode kleur is. De intensiteit van de rode kleur verschaft dus informatie over de gezondheid van een plant en het type vegetatie.

Met behulp van multispectrale of hyperspec-

trale sensoren wordt de door de vegetatie weerkaatste elektromagnetische straling niet alleen in infrarood, maar ook in de kleuren rood, groen, blauw separaat digitaal vastgelegd. Planten reflecteren straling; elk type vegetatie heeft zijn eigen karakteristieke golflengtecurve van de reflectie.

De door sensoren gemeten reflectiewaarden geeft informatie over de groeikracht, stress en behoefte aan voedingsstoffen van vegetatie op een perceel. Op basis van de opnames kunnen akker- en tuinbouwers, fruitteilers en teelt- en bemestingsadviseurs de input van voedingsstoffen aanpassen. Ook kan actie worden ondernomen in het geval van ziektes. Het met behulp van remote sensing in beeld brengen van vegetatiestress is ook voor archeologische prospectie van belang. Vegetatiestress (of juist een zeer vitale vegetatie) kan een indicatie zijn voor de aanwezigheid van archeologische fenomenen in de ondiepe ondergrond.

2.4 Met welke instrumenten worden data ingewonnen?

2.4.1 Sensoren

Voor het meten van EM-straling wordt gebruikgemaakt van sensoren. Sensoren zijn zeer gevoelige waarnemingsinstrumenten voor het opmeten van deze energie en kunnen worden opgedeeld in twee groepen: passieve en actieve sensoren. De meeste sensoren werken volgens het passieve principe, waarbij de reflectie of emissie van (natuurlijke) stralingsbronnen, meestal de zon, aan het oppervlak wordt gemeten (passieve sensor). Het meest voorkomende voorbeeld is de fotocamera.³² Twee specifieke sensoren, radar en LiDAR (laser), treden zelf op als stralingsbron. Zij zenden zelf een elektromagnetische stralingsbundel naar het aardoppervlak en meten de mate van reflectie aan het aardoppervlak om vervolgens daaruit een beeld te construeren. Deze sensoren worden actieve sensoren genoemd.

2.4.2 Meetstations

Sensoren en camera's kunnen aan verschillende typen meetstations worden bevestigd. In het geval van satellieten wordt gesproken van *spacial* of *spaceborne* remote sensing. Bij *aerial* of *airborne* remote sensing worden met behulp van (zweef) vliegtuigen, helikopters, luchtballonnen en drones sensordata van het aardoppervlak ingewonnen.

Satellieten

Satellieten die worden ingezet voor remote sensing, worden observatiesatellieten genoemd. Iedere satelliet heeft zijn eigen baan om de aarde, bezoekfrequentie en resolutie. Er zijn publieke en commerciële satellieten. Satellieten spelen in toenemende mate een rol bij het opnemen van beelden van het aardoppervlak. Inmiddels zijn er talrijke satellieten die wereldwijd dagelijks enorme hoeveelheden data met behulp van remote sensing verzamelen. Tabel 2.2 biedt een (incompleet) overzicht van sensoren die meten in het zichtbare en niet-zichtbare deel van het elektromagnetische spectrum. De meeste sensoren zijn multispectraal (RGB en NIR); hiervan zijn alleen sensoren

³² Een ander voorbeeld van een passieve sensor is een multispectrale camera.

met een ruimtelijke resolutie van hooguit enkele meters opgenomen. Sensoren die volledig gericht zijn op (thermisch) infrarood en radar komen veel minder voor. Deze zijn zoveel mogelijk opgenomen in tabel 2.2. Voorbeelden van satellieten waarvan beeldmateriaal online via het internet worden aangeboden, zijn Superview en Triplesat.

Vliegtuigen, helikopters en luchtballonnen

Voor het maken van luchtfoto's worden camera's en sensoren van oudsher bevestigd aan vliegtuigen of luchtballonnen. In Nederland worden vanuit vliegtuigen minimaal twee keer per jaar landsdekkende luchtfoto's gemaakt, één

keer met een grondresolutie van 25 cm en één keer met een grondresolutie van 10 cm of hoger. De resolutie van luchtfoto's uit vliegtuigen in Nederland is daarmee 25 cm of hoger. Luchtfoto's met een kleinere resolutie dan 3 cm worden in de praktijk niet gemaakt. Verticale luchtfoto's (recht van boven) die grotere gebieden en soms zelfs heel Nederland beslaan, worden in stereo gemaakt. Deze stereofoto's bestaan uit twee of meer losse luchtfoto's die elkaar sterk overlappen. Dankzij deze werkwijze staat elk punt van Nederland op minimaal twee verschillende, elkaar overlappende foto's of sensorbeelden.

Tabel 2.2 Incompleet overzicht van sensoren die meten in het zichtbare en niet-zichtbare deel van het spectrum

Sensor	Platform	RGB	NIR	MID-IR	TIR	SW-IR	Radar	Ruimtelijke resolutie (m)
ACE-FTS	satelliet		x	X	x	x		1
ALOS	satelliet	x	x					2,5-10
ASTER	satelliet		x		x	x		15-90
ATM	vliegtuig	x	x					0,3
ERS1-2	satelliet				x	x	X	30
EROS	satelliet	x	x					1,8
FORMOSAT-2	satelliet	x	x					0,7
IKONOS	satelliet	x	x					1-3,2
Landsat 8	satelliet	x		X	x			15-120
Leica ADS40	vliegtuig	x	x					0,05
MODIS	satelliet	x	x	X	x			250-1000
Pleiades-1	satelliet	x	x					0,5-2
PRISM	satelliet						X	2,5
Quickbird	satelliet	x	X					0,6-2,4
PHARUS	vliegtuig						X	4
RADARSAT	satelliet						X	10-100
SENTINEL	satelliet	x	x			x	X	10-60
SMAP	satelliet						X	35.000-50.000
SPOT	satelliet	x	x	X		x		0,8-20
Vexcel UltraCAM	vliegtuig	x	x					0,018
Worldview	satelliet	x	x					0,5-1,8
X5	satelliet	x				x		20
Z/I imaging DMC	vliegtuig	x	x					0,04
Zenit	satelliet							1,5-2

Samengesteld met behulp van Hadjimitsis *et al.* 2013, 62; Sueur 2006; Parcak 2009, 42; Orlando & Villa 2011, 151 en US Army Corps of Engineers 2003, appendix D. Sensoren die meten in het zichtbare spectrum vallen onder RGB (rood, groen, blauw). Sensoren die meten in het niet-zichtbare spectrum zijn NIR (*near infrared*), MID-IR (*mid infrared*), TIR (*thermal infrared*) en SW-IR (*short wave infrared*).

Drones

Een drone is een onbemand luchtvaartuig, in het Engels *unmanned aerial vehicle* (UAV).³³ Drones worden op afstand bestuurd door een piloot die handmatig of in *flight modes* de drone bestuurt. Ook kan hij of zij gebruikmaken van apps waarmee van te voren bepaalde vluchtroutes of grids kunnen worden gedefinieerd. Door de drone uit te rusten met een of meer sensoren (bijvoorbeeld een camera of thermische sensor) kan men vanaf een bepaalde hoogte gedetailleerde metingen verrichten.

Voor het verkrijgen van hogeresolutiebeelden van specifieke locaties wordt vaak gebruikgemaakt van multirotdrones. Deze drones zijn licht, compact, flexibel, wendbaar en eenvoudig te besturen; bovendien kan de piloot de drone boven elke gewenste locatie stil laten hangen. Feitelijk zijn het flexibele, vliegende sensoren ('het vliegende laboratorium').³⁴ Een handicap is dat drones minder geschikt zijn voor het maken van luchtfoto's of sensorbeelden die grote gebieden dekken. Een reden daarvan is dat boven veel gebieden niet met een drone gevlogen mag worden (*restricted areas*), waaronder snelwegen, vliegvelden en natuurgebieden van Staatsbosbeheer.³⁵ Ook zijn er regels voor de maximale vlieghoogte en vaak neemt het vragen van toestemming voor het maken van droneopnames enige tijd in beslag. In het geval van opnames met een grote dekking moet er vanaf verschillende locaties met de drone worden gevlogen. Dit heeft te maken met de maximale afstand van de drone tot de dronepiloot, ongeacht de dekking van de sensor.³⁶ In dat geval is het verzamelen en bewerken van data een zeer tijdrovende klus. Dat maakt dat dronebeelden met grote dekking ook hoge kosten met

zich meebrengen, die alleen maar hoger worden als de frequentie toeneemt.

De grootste beperking van dit type meetstation is dat een drone afhankelijk is van stroom.

Batterijen moeten voldoende capaciteit hebben om alles werkend te houden, maar de capaciteit mag ook weer niet te groot zijn, omdat de drone dan te zwaar wordt. Verder kennen drones een beperkte vliegduur van ca. 20-30 minuten. De vliegtijd is afhankelijk van de accucapaciteit, het gewicht van de camera en de weersomstandigheden (windsnelheid). Dankzij de toename van het laadvermogen kan wel met steeds zwaardere sensoren worden gevlogen.

Een belangrijk voordeel is dat de piloot op elk zelf te bepalen moment kan vliegen. Bovendien kan hij de drone naar dezelfde plek laten terugkeren voor het uitvoeren van herhaalmetingen (longitudinaal onderzoek). Daarbij kan droneonderzoek op elke plek beginnen, onafhankelijk van de bestaande infrastructuur voor vliegverkeer. Wel moet rekening worden gehouden met de vigerende wet- en regelgeving (maximale vlieghoogte, afstand tot gebouwen, privacyregels, etc.). Ten slotte kunnen drones onder bijna alle weersomstandigheden vliegen, met uitzondering van sterke wind, zware mist en hevige neerslag.

Drones zijn vooral geschikt voor het inwinnen van data op specifieke locaties, bijvoorbeeld als onderdeel van vindplaatsgericht waarderend archeologisch onderzoek. Gezien het toenemende belang van drone remote sensing in de Nederlandse archeologie, hebben we in dit rapport een apart hoofdstuk gewijd aan deze nieuwe methode van inventariserend veldonderzoek (hoofdstuk 8).

³³ De term die in Nederland wettelijk wordt gebruikt voor een drone is RPA (*remotely piloted aircraft*) of RPAS (*remotely piloted aircraft system*).

³⁴ Lezing van J. Waagen op 21 oktober 2021, 'De potentie van drone remote sensing in de Nederlandse archeologie', tijdens het Archeologie Platform Vanuit de lucht zie je meer van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

³⁵ Voor 90% van de *restricted areas* is ontheffing aan te vragen. Een ontheffing wordt bijvoorbeeld niet verleend voor een vliegveld met luchtverkeerstoren. Voor een overzicht van de *restricted areas* zie de interactieve kaart op GoDrone.nl.

³⁶ Zo heeft een fixedwingdrone een veel groter bereik dan een multicopter en kan die dus meer oppervlak dekken met dezelfde sensor.

Deel II – Archeologisch bureauonderzoek

3 Analoge en digitale luchtfoto's en sensorbeelden als bron

Waar moet een archeoloog op letten bij het gebruiken van remote sensing-beelden?

In dit hoofdstuk onderscheiden we drie typen remote sensing-beelden: analoge luchtfoto's, digitale luchtfoto's in het zichtbare spectrum (RGB-beelden) en sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum (infrarood-, radar- en multi- en hyperspectrale beelden). Ze zijn vanaf een bepaalde (vlieg)hoogte verkregen en verschaffen een actueel en vaak gedetailleerd beeld van het Nederlandse aardoppervlak. Aan de hand van verticale opnames zijn verschijnselen aan het aardoppervlak en ruimtelijke variaties daarin goed waarneembaar. En daarbij kan het ook gaan om archeologische sporen en structuren. Luchtfoto's in vogelvluchtperspectief ('oblique') bieden vaak minder overzicht, maar ook op deze foto's kunnen dergelijke sporen zichtbaar zijn. Niet alle beelden zijn van dezelfde kwaliteit of hebben dezelfde ruimtelijke resolutie. Dat hangt samen met de precisie waarmee data

zijn ingewonnen. Een grove vuistregel is dat hoe groter de afstand van het meetstation tot het aardoppervlak, hoe lager de resolutie. Met deze kwaliteitskenmerken in het achterhoofd worden de beelden vanuit archeologisch oogpunt beoordeeld. Wat zijn de tekens die archeologische resten verraden? In de regel gaat het om opmerkelijke, onnatuurlijke afwijkingen die op analoge en digitale luchtfoto's met het blote oog, een loep of een stereoscoop zijn te zien, zoals verschillen in de kleur van gewassen en verkleuringen in aangeploegde akkers. Die anomalieën hebben gemeen dat ze een aanwijzing kunnen zijn voor archeologische resten in de ondiepe ondergrond. Deze resten hebben specifieke eigenschappen van de natuurlijke bodem, vegetatie en/of topografie beïnvloed. Hierdoor zijn er sporen in de vorm van *crop marks*, *soil marks* of *shadow marks* ontstaan, die vanuit de lucht zijn waar te nemen.

3.1 Inleiding

In dit eerste hoofdstuk van deel II over remote sensing-beelden als bron voor archeologisch bureauonderzoek besteden we aandacht aan analoge luchtfoto's, digitale luchtfoto's in het zichtbare spectrum (RGB-beelden) en sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum (infrarood-, radar- en multi- en hyperspectrale beelden). Via het internet zijn van geheel Nederland digitale luchtfoto's en infraroodbeelden beschikbaar. Ze kunnen dienen als bron van archeologisch bureauonderzoek. Om welke foto's en beelden gaat het en ook: waar moet je op letten? Hoe tekenen archeologische relictten zich af op dit soort foto's en beelden? In deze publicatie wordt het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) apart behandeld (hoofdstuk 6), gezien de afwijkende technologie (LiDAR ofwel laseraltimetrie met behulp van actieve sensoren) en het grote belang ervan voor archeologisch bureauonderzoek.

3.2 Welke luchtfoto's en sensorbeelden zijn er?

3.2.1 Inleiding

Er zijn twee belangrijke categorieën beelden van remote sensing:³⁷

- Beelden van remote sensing in het zichtbare spectrum. Dit zijn analoge en digitale luchtfoto's die een weergave zijn van EM-straling met golflengtes tussen 0,4 en 0,7 μm . Deze golflengtes vallen in de spectrale band rood, groen, blauw (RGB) en zijn zonder verdere bewerking zichtbaar voor het menselijke oog.
- Beelden van remote sensing in het niet-zichtbare spectrum. Deze sensorbeelden zijn een weergave van de EM-straling met golflengtes groter dan 0,7 μm . Deze golflengtes zijn niet zichtbaar voor het menselijk oog en worden gerekend tot de spectrale banden nabij-infrarood, midden-infrarood, thermisch infrarood en microwave (radar). Tot deze categorie zijn infraroodbeelden, radarbeelden en multi- en hyperspectrale beelden gerekend.

³⁷ Er zijn ook andere indelingen mogelijk, bijvoorbeeld indelingen die zijn gebaseerd op eigenschappen van de toegepaste technieken, zoals passief versus actief, imaging versus non-imaging, etc.

3.2.2 Analoge luchtfoto's

Analogue luchtfoto's zijn de oudste producten van remote sensing. Ze worden sinds het begin van de twintigste eeuw voor archeologische doeleinden gebruikt. Onder analoge (of: conventionele) luchtfoto's worden in dit rapport remote sensing-beelden verstaan die zijn opgenomen in het zichtbare spectrum van het licht (eerst zwartwit, later rood, groen, blauw, afgekort als RGB) door middel van een fotoestel. Afhankelijk van de hoek waarin het aardoppervlak wordt gefotografeerd, worden oblique (in vogelvluchtperspectief) en verticale luchtfoto's onderscheiden.

3.2.3 Digitale luchtfoto's

Een digitale luchtfoto of RGB-beeld is de weergave van de meting van de straling in het zichtbare spectrum, met een frequentie tussen 0,4 en 0,7 μm . Een andere benaming is true-colorfoto, ofwel een foto in de kleuren die het

menselijk oog zou zien (zie kadertekst 'Opnames in true color of false color').³⁸ Evenals bij analoge luchtfoto's kan een onderscheid worden gemaakt tussen oblique en verticale luchtfoto's (afb. 3.1). Nadere toepassingen of afgeleide producten van verticale, digitale luchtfoto's zijn stereofoto's, orthofoto's en orthofotomozaïeken (zie de verklarende woordenlijst).

3.2.4 Sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum

Infraroodbeelden

Een infraroodbeeld is de weergave van de meting van EM-straling met een frequentie tussen 0,7 en 15 μm , dat wil zeggen in het niet-zichtbare spectrum. Er zijn beelden van de volgende spectrale banden: nabij-infrarood (NIR, 0,7-1,0 μm), midden-infrarood (MIR, 1,0-3 μm) en thermisch infrarood (TIR, 3-15 μm). Voor vegetatiemonitoring worden vaak infraroodbeelden gebruikt; deze worden ook wel false-colorfoto's genoemd, letterlijk 'foto's in onechte of valse kleuren'. Deze opnames zijn gevoeliger

³⁸ Koomen et al. 2007.



Afb. 3.1 Digitale, oblique luchtfoto (RGB-beeld) van een proefsleuvenonderzoek in het Friese Siegerswoude. De foto is genomen vanuit een drone. Aanleiding voor het archeologische onderzoek was de ontdekking van een grote, rechthoekige structuur die zichtbaar was op zowel luchtfoto's van de droge zomer van 2018 als op het Actueel Hoogtebestand Nederland.

Opnames in true color of false color

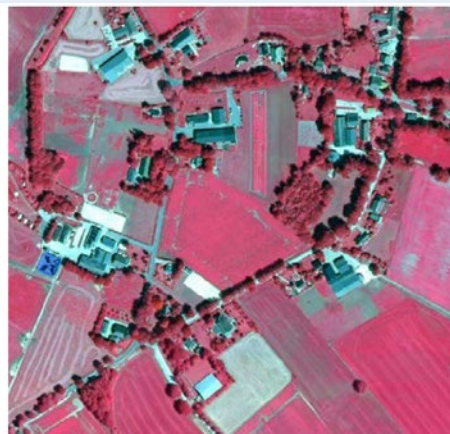
In 2006 zijn vanuit een vliegtuig opnames van heel Nederland gemaakt met een digitale fotocamera. Daarbij is de reflectie van het zonlicht (elektromagnetische straling) in de spectrale banden rood, groen, blauw (RGB) en nabij-infrarood gemeten. Het resultaat is een landsdekkende digitale luchtfoto met een resolutie van 50 cm. Als de informatie in de spectrale banden RGB wordt getoond, ziet de opname eruit als een normale kleurenfoto (afb. 3.2, links). De nabij-infrarode spectrale band maakt een *false color*-weergave van de foto mogelijk (afb. 3.2, rechts).

In vergelijking met de kleurenfoto is de *false color*-weergave meer geschikt voor het herkennen van vegetatiestress. Met

gevoelige nabij-infraroodsensoren kunnen kleine variaties in de hoeveelheid gereflecteerd nabij-infraroodlicht worden geregistreerd. Daarmee wordt informatie verkregen over de gezondheidstoestand (vitaliteit) van de vegetatie: hoe meer vegetatiestress, hoe minder nabij-infraroodlicht wordt gereflecteerd. Infraroodbeelden kunnen ook voor archeologische prospectie een belangrijke informatiebron zijn. Vegetatiestress kan het resultaat zijn van plaatselijke verdroging of vernatting, vervuilingen of lokale verschillen in bodemsamenstelling. Deze eigenschappen van de bodem kunnen op hun beurt verband houden met de aanwezigheid van archeologische resten in de ondergrond.



Gewone kleurenfoto



False-color opname

Afb. 3.2 Digitale luchtfoto weergegeven als gewone RGB-kleurenfoto (links) en *false color*-weergave (rechts) (bron: Koomen *et al.* 2007).

voor variatie in de vegetatie. Een voorbeeld van een falsecolorfoto is een *color infrared photo* (CIR).

Radarbeelden

Een radarbeeld is een weergave van de reflectie van verzonden radarpulsen (korte puls van elektromagnetische energie met golflengtes van 1 mm tot 1 m). Een antenne zendt deze pulsen zijwaarts uit en dezelfde antenne ontvangt de retourpulsen van het terrein.

Spectrale beelden

Een spectraal beeld bestaat uit een weergave van meerdere spectrale banden die tegelijkertijd zijn vastgelegd. In dit rapport over archeologi-

sche prospectie beperken we ons tot multi- en hyperspectrale opnames. Het verschil tussen de technieken is de breedte van en het aantal banden. Bij multispectrale opnames worden drie tot vijftien banden tegelijkertijd vastgelegd. De banden hebben een relatief vrij groot bereik (0,1-0,3 μm) en bestaan vaak uit rood, groen, blauw en bijna-infrarood. Hyperspectrale opnames leggen wel honderden tot duizenden verschillende aaneengesloten spectrale banden vast. Ze hebben een veel kleiner bereik van slechts 0,01 tot 0,02 μm . Hierdoor is de hoeveelheid informatie die in de data besloten ligt groter, maar de analyse van die data is veel complexer dan bij multispectrale opnames.

3.3 Welke tekens verraden archeologische resten?

3.3.1 Inleiding

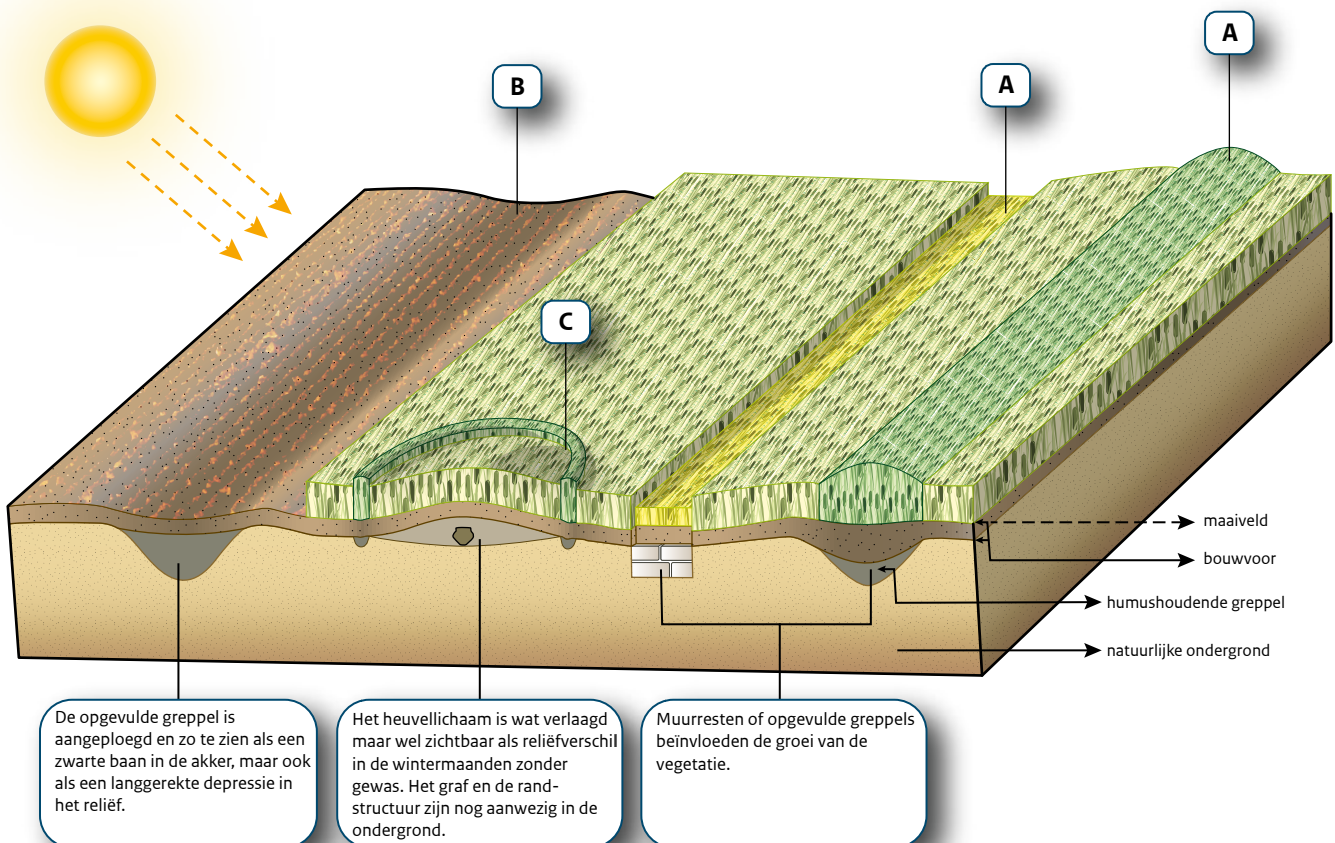
Een groot voordeel van het gebruik van remote sensing-beelden voor archeologische prospectie is dat ze een ander perspectief bieden. Dat geldt zowel voor analoge en digitale luchtfoto's als voor sensorbeelden. Vanaf grote hoogte is het mogelijk archeologische vindplaatsen te zien die in het veld niet of nauwelijks zichtbaar zijn. Maar wat maakt dat vindplaatsen zichtbaar zijn? Wat zijn de tekens in het landschap die archeologische resten kunnen verraden? In feite gaat het om afwijkingen in de sensormetingen die – na bewerking – in foto's en beelden van remote sensing zichtbaar zijn, zoals verschillen in de kleur van gewassen en verkleuringen in geploegde akkers. Die anomalieën hebben

gemeen dat ze een aanwijzing kunnen zijn voor archeologische resten in de ondergrond. Deze overblijfselen hebben de eigenschappen van de bodem, vegetatie en/of de topografie beïnvloed, waardoor er sporen zijn ontstaan die vanuit een bepaalde hoogte waarneembaar zijn.

3.3.2 Crop marks, soil marks, shadow marks en snow/frost marks

De Britten hebben vanwege hun lange traditie in luchtfotoanalyse voor deze sporen verschillende begrippen bedacht (afb. 3.3). Het kernwoord daarvan is *mark*, in het Nederlands 'teken', aangevuld met een woord verwijzend naar de context waarin de verschillen zichtbaar zijn. De drie meest gangbare typen tekens of verkleuringen zijn: *crop of vegetation marks* (gewas- of vegetatieverkleuringen), *soil marks* (bodemverkleuringen) en *shadow marks* (schaduwverkleuringen).³⁹ Bij *shadow marks* gaat het om

³⁹ Zie bijvoorbeeld Riley 1979; Edis, Macleod & Bewley 1989.



Afb. 3.3 Britse archeologen onderscheiden drie typen verkleuringen: A gewas-/vegetatieverkleuringen, B bodemverkleuringen en C schaduwverkleuringen.

verschillen in maaiveldhoogte en dat maakt dat dit begrip ook van toepassing is op beelden van het Actueel Hoogtebestand Nederland, zeker wanneer voor de visualisatie *hillshade* of *shaded relief* wordt gekozen (hoofdstuk 6). Ten slotte kunnen ook in sneeuw of na een vorstperiode verkleuringen aan het maaiveld zichtbaar zijn. Die worden *snow* of *frost marks* (sneeuw- of vorstsporen) genoemd. Gewas- of vegetatieverkleuringen (*crop or*

vegetation marks) zijn groeiverschillen in gewassen of natuurlijke vegetatie, in kleur en/of hoogte. Deze groeiverschillen houden verband met wat er ondergronds aanwezig is en dat beïnvloedt de vochthuishouding of samenstelling van de bodem. Zo zal gewas boven ondergrondse muurresten minder goed groeien ('negatieve' *crop marks*) dan gewas boven opgevulde greppels ('positieve' *crop marks*). In het eerste geval onttrekken de muurresten al het



Afb. 3.4 Gewasverkleuringen in een maisperceel bij Diepenveen. Op de digitale luchtfoto tekenen zich greppels en andere structuren van mogelijk een middeleeuws kasteel af als donkergroene banen en verkleuringen (*crop marks*) tussen de dorre, geel gekleurde mais. De foto is genomen vanuit een drone in de zomer van 2022 na een periode van langdurige droogte (foto: A. Speelman).



Afb. 3.5 De droogte in de zomer van 2018 bracht zigzagstructuren parallel aan de IJssel bij de Westervoortse Brug ten zuiden van Arnhem aan het licht. Het zijn *crop marks* van Duitse loopgraven, gegraven in december 1944 (foto: J. van Dalen Fotografie).

beschikbare water aan de bodem. Bovendien vormen deze resten een obstakel voor planten om diep te wortelen en zo aan de nodige voedingsstoffen te komen. Als gevolg hiervan zal de vitaliteit van de vegetatie minder groot zijn. Door vegetatiestress zullen de planten sneller verkleuren bij (langdurige) droogte. In het geval van een opgevlude greppel houdt de vulling ervan water langer vast dan de omliggende, natuurlijke bodem. Dit komt de vitaliteit van de vegetatie juist ten goede: met name in periodes van droogte kunnen gewassen langer over het nodige water (en eventueel voedingsstoffen) beschikken. Het zichtbare resultaat hiervan is dat de vegetatie langer groen blijft in vergelijking met de omliggende planten, die (eerder) geel zullen verkleuren (afb. 3.4 en 3.5).⁴⁰

Gewas- of vegetatieverkleuringen van archeologische betekenis zijn alom bekend in het Nederlandse landschap. Voorbeelden van casestudy's waarin archeologische sporen aan de hand van *crop marks* zijn herkend, zijn Kloosterzande-Drogendijk en Ieper-Frezenberg (B) (paragraaf 5.5) en Vught-De Gement (paragraaf 8.5).

Bodemverkleuringen (*soil marks*) zijn kleurverschillen in een aangeploegde of afgegraven ondergrond. De afwijkende kleur van opgeploegde muurresten of spoorvullingen tekent zich af tegen de natuurlijke ondergrond. Goede voorbeelden zijn de vanuit vliegtuigen gefotografeerde greppels en kuilen van boerenerven uit de bronstijd in West-Friesland op aangeploegde akkers (afb. 3.6). Casestudy Hoogkarspel-Tolhuis is hiervan een goed voorbeeld (paragraaf 4.6). Een ander voorbeeld betreft casestudy Maredsous-Biert in België (paragraaf 5.5).

Schaduwverkleuringen (*shadow marks*) zijn verschillen in schaduwwerking als gevolg van hoogteverschillen van het aardoppervlak. Laagstaand zonlicht in de wintermaanden, bij voorkeur in de vroege morgen of late namiddag, zorgt voor een subtiele aftekening van het reliëf – zeker als er ook een dun laagje sneeuw ligt. In open landschappen kunnen de lage wallen van een prehistorisch raatakkercomplex zorgen voor schaduwwerking die vanuit de lucht is waar te nemen.



Afb. 3.6 In de aangeploegde akkers van het West-Friese Broekerhaven tekenen zich duidelijk boerenerven uit de midden- en late bronstijd af als bodemverkleuringen (foto W.H. Metz).

⁴⁰ Zie ook Verhoeven 2013, 17-18.

Een eeuw analoge luchtfotografie

Voor het opsporen en vastleggen van kenmerken van archeologische vindplaatsen worden analoge luchtfoto's in Nederland al bijna een eeuw toegepast, maar wel met de nodige tussenpauzen. Pioniers zijn Von Freitag Drabbe vlak na de Tweede Wereldoorlog en Brongers in de jaren zeventig van de vorige eeuw. Zij maakten gebruik van analoge zwart-witfoto's genomen voor militaire en topografische doeleinden. In de jaren negentig maakte De Vries-Metz vanuit een vliegtuig zelf oblique luchtfoto's van in akkers gelegen en aangeploegde bronstijdvindplaatsen in West-Friesland. De proefschriften van Brongers en De Vries-Metz tonen de grote meerwaarde van analoge luchtfoto's voor archeologische prospectie en nader wetenschappelijk onderzoek onmiskenbaar aan. Met uitzondering van de collectie foto's van De Vries-Metz zijn er vrijwel geen andere analoge luchtfoto's die specifiek voor archeologische prospectiedoeleinden zijn genomen. Hierin onderscheidt ons land zich van andere landen en met name het Verenigd Koninkrijk. In dat land heeft luchtfotografie een lange

traditie en is het een volwaardig onderdeel van archeologische prospectie. Het raadplegen van analoge luchtfoto's maakt vandaag de dag deel uit van archeologisch bureauonderzoek. Vooral verticale luchtfoto's die zijn gemaakt voor topografische doeleinden, zijn voor archeologen een belangrijke en informatieve bron. Ze kunnen inzicht geven in de (mogelijke) aanwezigheid, aard, datering en landschappelijke context van archeologische fenomenen in een tegenwoordig volledig overbouwd en voor veldonderzoek niet meer toegankelijk gebied. Ook de grote hoeveelheid oblique RAF-luchtfoto's, genomen voor militaire doeleinden, dient in dit verband te worden genoemd. In tegenstelling tot de verticale foto's van de topografische dienst zijn deze foto's via internet in groten getale gratis beschikbaar gesteld en online te raadplegen. Wel dient er rekening mee te worden gehouden dat alleen grotere archeologische sporen en structuren tot uiting komen in gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverschillen en zodoende aan de hand van bovengenoemde analoge luchtfoto's kunnen worden opgespoord.

4.1 Inleiding

Analoge luchtfoto's vormen de oudste en gedurende vrijwel de gehele twintigste eeuw de enige beschikbare beeldbron van archeologische remote sensing. Het zijn opnames in het voor het menselijke oog zichtbare bereik, eerst in zwart-wit en later ook in kleur (RGB). Ondanks het feit dat opnames van het aardoppervlak van ons land in vrijwel alle gevallen niet specifiek voor archeologische toepassing zijn gemaakt, zijn archeologen zich al lange tijd bewust van de grote waarde ervan als bron van bureauonderzoek in hun eigen vakgebied.⁴¹

Na een beknopt historisch overzicht van analoge luchtfotografie in Nederland gaan we in dit hoofdstuk in op kwaliteitskenmerken en toepassingen van analoge luchtfoto's in archeologisch bureauonderzoek (afb. 4.1). Daarbij worden eerst de foto's besproken die voor militaire en topografische doeleinden zijn gemaakt. Aansluitend staan analoge luchtfoto's uit de

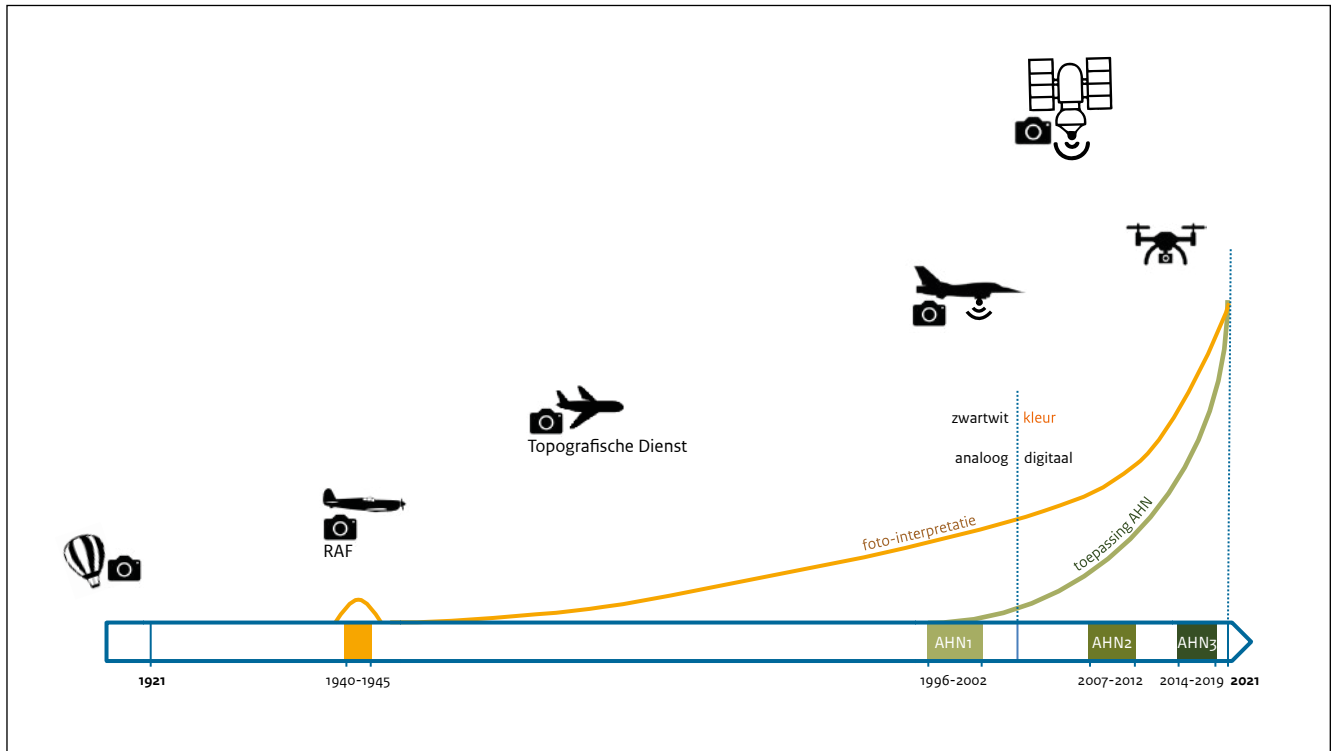
collectie De Vries-Metz, specifiek gemaakt voor archeologische doeleinden, centraal. Vervolgens wordt aandacht besteed aan digitale beeldoptimalisatie van analoge luchtfoto's en wordt een voorbeeld gegeven van een beeldartefact waarmee rekening moet worden gehouden bij de interpretatie van deze foto's. Het hoofdstuk sluit af met een casestudy in West-Friesland.

4.2 Korte historische terugblik

De vroegste vormen van analoge luchtfotografie ontstonden halverwege de negentiende eeuw. Deze foto's werden gemaakt vanuit luchtballonnen en met vliegers. Het maken van analoge luchtfoto's vanuit vliegtuigen gaat terug tot in het begin van de twintigste eeuw. In het begin van de jaren twintig trokken overboordfoto's in zwart-wit de aandacht van de Topografische Dienst, destijds Topografische Inrichting geheten.⁴² Naast topografische bijzonderheden namen medewerkers van deze dienst ook

⁴¹ Een toename van het gebruik van beeldmateriaal van remote sensing in de archeologie blijkt uit het aantal artikelen dat in internationale, peerreviewed tijdschriften verschijnt. Het gaat om zowel archeologische tijdschriften als breder georiënteerde tijdschriften over remote sensing, zie Luo *et al.* 2019, Fig. 2 en Fig. 3.

⁴² In 1932 werden de Topografische Inrichting en de Militaire Verkenningen samengevoegd tot de Topografische Dienst, zie Geudeke 2015.



Afb. 4.1 De verschillende technieken van remote sensing hebben elk hun eigen geschiedenis in toepassing in Nederland. Luchtfotografie is de oudste. Hogeresolutiebeelden verkregen vanuit satellieten, vliegtuigen en met behulp van drones zijn de jongste. De laatste twee decennia staan in het teken van grote technologische veranderingen, zoals betere meetinstrumenten, snellere computers, meer opslagcapaciteit en geavanceerdere software.

andere zaken waar en dat bleken vaak archeologische overblijfselen te zijn. Vanaf 1931 nam het besef van de gebruikswaarde van analoge luchtfoto's toe, zeker toen de opnames zelf beter werden en bovendien geschikt voor stereoscopisch gebruik.

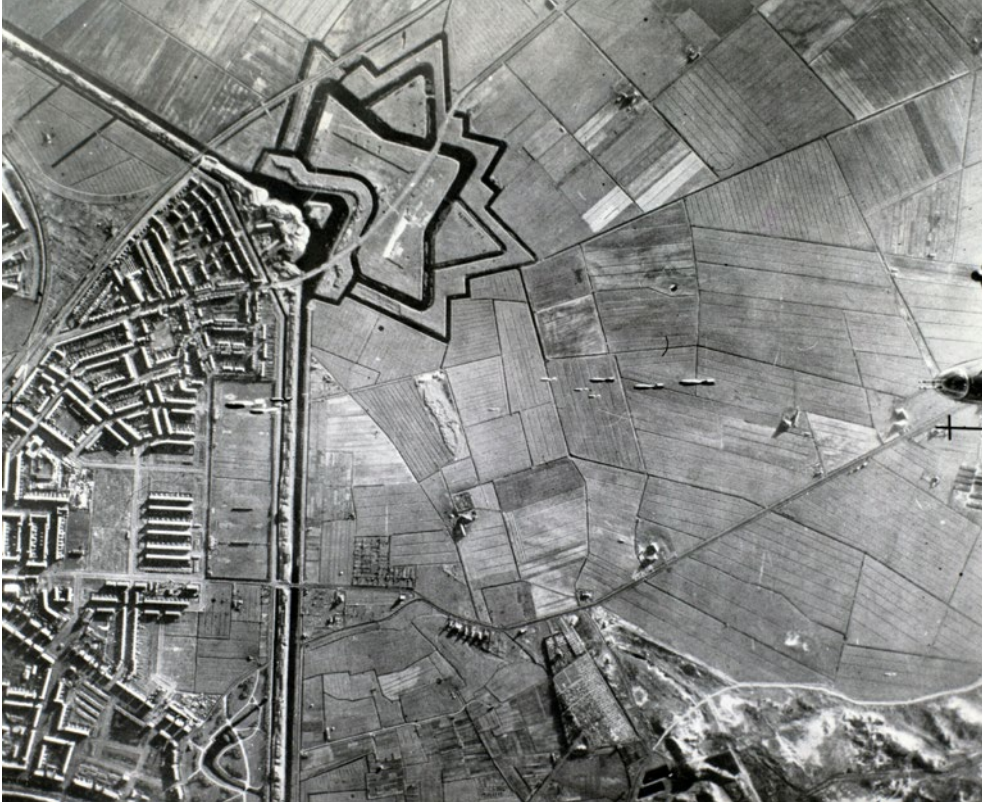
In Nederland is traditioneel een belangrijke rol weggelegd voor luchtfoto's bij het maken en actualiseren van topografische kaarten. Luchtfoto's die fungeerden als bron van deze kaarten werden vanaf 1927 vanuit vliegtuigen gemaakt, loodrecht naar beneden (verticale opnames). De schaal van de analoge zwartwitfoto's varieerde tussen 1:10.000 en 1:20.000, maar ook werden ze op kleinere schaal gemaakt. Ten behoeve van topografische kaarten, schaal 1:10.000, bedroeg de vlieghoogte ongeveer 1800 m.

Niet alleen voor topografische, maar ook voor militaire doeleinden werden tijdens militaire vluchten talloze luchtfoto's gemaakt, vooral in de periode vlak voor, tijdens en direct na de Tweede Wereldoorlog. Het resulteerde in een omvangrijke en belangrijke set van analoge luchtfoto's in zwart-wit. Ze zijn voor een

belangrijk deel afkomstig van de Britse Royal Air Force (RAF) en bestrijken grote delen van Nederland (afb. 4.2).

In 1947 begon de Topografische Dienst van de Koninklijke Landmacht Nederland systematisch vanuit de lucht te fotograferen. Luchtfoto's genomen tussen 1948 en 1978 hebben een originele schaal van eerst 1:20.000 en later 1:18.000. In de beginjaren werd één keer per tien jaar gevlogen. Vanwege de snel veranderende omstandigheden ging vanaf de jaren zeventig van de vorige eeuw de frequentie omhoog naar één keer in de vijf jaar. Vanaf 1981 werd Nederland om de drie jaar en per regio vanuit de lucht gefotografeerd. Zo ontstonden in de loop der jaren opeenvolgende, volledig dekkende fotoreeksen van Nederland, waarvan jaarlijks delen werden vernieuwd. Het was in deze periode, vanaf 1984, dat de Topografische Dienst onderdeel werd van het Kadaster.

Analoge luchtfoto's zijn tot in het begin van het nieuwe millennium in zwang gebleven. Vanaf 2000 vond de geleidelijke introductie van digitale camera's plaats, waarmee het mogelijk werd om digitale kleurenfoto's (RGB) van het



Afb. 4.2 Luchtfoto van de Britse Royal Air Force waarop vallende bommen zijn te zien. Dit bombardement vond plaats bij Fort Dirks Admiraal (linksboven) bij Den Helder op 8 februari 1943 (bron: Collectie Nederlands Instituut voor Militaire Historie).

aardoppervlak van Nederland te nemen. Inmiddels is het mogelijk via websites vele digitale kopieën van analoge luchtfoto's te bekijken en, in de regel tegen betaling, op te vragen en te bestellen. Het gaat daarbij onder andere om foto's uit de archieven van het Kadaster.

4.3 Kwaliteitskenmerken

4.3.1 Aantal en verspreiding van controlepunten

R. Emaus

Een belangrijke voorwaarde voor een goed archeologisch gebruik van analoge luchtfoto's is een exacte en betrouwbare locatiebepaling van gewas- en eventueel andere verkleuringen die op deze foto's zichtbaar zijn. Hiervoor is het nodig om op de foto afgebeelde informatie te koppelen aan een ruimtelijk informatiesysteem

bestaande uit x- en y-coördinaten. Op wereldniveau wordt veelal gebruikgemaakt van het stelsel van meridianen en parallellen (latitude-longitudestelsel). Binnen Nederland is het Rijksdriehoekstelsel (RD-stelsel) het gangbare systeem.

Het 'op de juiste plek leggen' van een (gescande) analoge luchtfoto is mogelijk met behulp van een Geografisch Informatie Systeem (GIS) en wordt meestal 'georefereren' genoemd.

Letterlijk betekent dit het refereren aan een geografische locatie. Het basisprincipe is om de vaak schuin genomen (oblique) luchtfoto door middel van controlepunten (*control points*) aan een coördinatensysteem te koppelen.

Voorbeelden hiervan zijn gebouwen, kerktorens en bruggen (zoals zichtbaar op de luchtfoto) die ook op hedendaagse topografische kaarten staan afgebeeld en waarvan de x- en y-coördinaten exact bekend zijn. Deze controlepunten werken daarbij als een soort 'digitale punaises' waarmee de luchtfoto als het ware digitaal op een andere kaart wordt geprikt. Op deze manier krijgen de pixels ter plekke van de controle-

punten een coördinaat toegewezen. De projectie van de luchtfoto is ter plaatse van de controlepunten zeer betrouwbaar, maar minder betrouwbaar naarmate de afstand groter wordt. Het is dus raadzaam om altijd een (of meer) controlepunten zo dicht mogelijk bij het onderzoeksobject op de luchtfoto te plaatsen – in het geval van archeologische remote sensing dus bij plaatsen met gewas- en andere verkleuringen. Daarnaast kan een goede projectie pas worden opgesteld wanneer de controlepunten niet te dicht bij elkaar geplaatst worden en een goede spreiding over de hele luchtfoto hebben. Het bovenstaande maakt duidelijk dat georefereren eisen stelt aan het aantal controlepunten op een analoge luchtfoto en de verspreiding ervan. Een vervolgstap is de keuze voor de juiste projectie. In veel gevallen zal een GIS-softwarepakket automatisch de *affine transformation* toepassen, terwijl een *2nd order polynomial transformation* specifiek voor het georefereren van luchtfoto's (van een relatief vlak landschap) betere resultaten geeft.

4.3.2 Schaal van analoge luchtfoto's

Om voor archeologische doeleinden bruikbaar te zijn, moet de schaal van analoge luchtfoto's van dien aard zijn, dat (mogelijke) archeologische objecten, elementen en structuren zichtbaar en als zodanig herkenbaar zijn. Het moge duidelijk zijn dat een bewogen luchtfoto veel minder informatie bevat dan een haarscherpe variant. Maar ook de afstand tussen een archeologisch relict en de camera is bepalend voor de zichtbaarheid. De schaal van een analoge luchtfoto is een cruciale factor voor de zichtbaarheid en herken-

baarheid van vindplaatsen. Om de relatie tussen enerzijds schaal en anderzijds zichtbaarheid van vindplaatsen beter inzichtelijk te maken, zijn voor analoge, verticale luchtfoto's vier detailniveaus of schalen (1:1000, 1:5000, 1:10.000 en 1:20.000) afgezet tegen vijf grootteklassen (tabel 4.1). De tabel maakt duidelijk dat schaal 1:20.000 niet geschikt is voor het detecteren van vindplaatsen, met uitzondering van vindplaatsen die in grootteklassen 4 (100 tot 500 m) en 5 (meer dan 500 m) vallen. Gezien hun grote omvang zijn deze laatstgenoemde vindplaatsen in principe zichtbaar op analoge luchtfoto's, mits zij (ook) voldoen aan andere criteria, zoals de aanwezigheid van forse kuilen, greppels of muurresten en/of antropogene ophoging. De schaal met het meeste detailniveau (schaal 1:1000) in de tabel is ook uitermate geschikt voor het opsporen van kleine vindplaatsen.

Het bovenstaande maakt duidelijk dat analoge luchtfoto's met een schaal van 1:10.000, 1:20.000 of kleiner feitelijk niet geschikt zijn voor het opsporen van vindplaatsen van kleine afmeting. In een publicatie van net na de Tweede Wereldoorlog schrijft Von Frijtag Drabbe hierover: 'Stelt u maar eens een kringgraf voor met een middellijn van 10 meter, wat toch werkelijk niet zoo weinig is. Deze teekent zich in de vorenbedoelde foto af als een kringetje van resp. 1 mm, 1/2 mm of nog minder. Daarmee valt eenvoudig niet te werken.'⁴³

4.3.3 Verticale versus oblique luchtfoto's

In dezelfde publicatie wijst Von Frijtag Drabbe op nadelen die specifiek van toepassing zijn op de verticale luchtfoto's van de Topografische Dienst. Deze foto's werden op het helderste deel

Tabel 4.1 Relatie werkelijke grootte vindplaatsen (grootteklassen 1 t/m 5), schaal en zichtbaarheid van vindplaatsen (in mm) op analoge luchtfoto's

Grootteklassen	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
	1-10 m	10-50 m	50-100 m	100-500 m	>500 m
Schaal	grootte op remote sensing-beeldmateriaal (in mm)				
1:1000	1-10	10-50	50-100	100-500	>500
1:5000	0,2-2	2-10	10-20	20-100	>100
1:10.000	0,1-1	1-5	5-10	10-50	>50
1:20.000	0,05-0,5	0,5-2,5	2,5-5	5-25	>25

⁴³ Von Frijtag Drabbe 1947, 493.

van de dag gemaakt met als doel om zo weinig mogelijk hinder te ondervinden van de schaduwwerking van bomen, gebouwen en andere opgaande elementen. Voor archeologische kartering zijn juist overboordopnames (oblique luchtfoto's), genomen bij zeer lage zonnestand, te prefereren. Zo worden subtiele reliëfverschillen beter zichtbaar en tekenen archeologische vindplaatsen zich als schaduwen (*shadow marks*) af. In vergelijking met oblique luchtfoto's zijn verticale luchtfoto's die zijn gemaakt rond het middaguur, als de zon hoog aan de hemel staat, veel minder geschikt voor het herkennen van schaduwverkleuringen

4.3.4 Bewaarcondities van analoge luchtfoto's

R. Emaus

Een ander kwaliteitskenmerk dat relevant is voor de bruikbaarheid van analoge luchtfoto's, is de bewaarconditie of conserveringstoestand van de originele foto's die in archieven worden bewaard. Deze toestand bepaalt in belangrijke mate de geschiktheid van (scans van) deze luchtfoto's voor het toepassen van digitale bewerkingstechnieken, zoals fotogrammetrie (zie kadertekst 'Wat is stereoscopie en fotogrammetrie?' in paragraaf 4.5.4). Sinds de jaren vijftig zijn topografische kaarten in de meeste landen op analoge, handmatige manier fotogrammetrisch vervaardigd. Hiervoor werden vaak jaarlijks opnieuw luchtfoto's genomen. Dat wil zeggen dat er stereografisch opgenomen luchtfoto's vanaf deze periode beschikbaar zijn in de archieven van de meeste (militaire) topografische diensten. Daarnaast zijn er tijdens de Eerste en met name de Tweede Wereldoorlog veel (stereo)fotografische verkeningsvluchten uitgevoerd. Een groot deel van deze luchtfoto's is bewaard gebleven. De fotogrammetrische verwerking van analoge luchtfoto's dient zeer precies te worden uitgevoerd. Deze verwerking stelt dan ook hoge eisen aan de kwaliteit van de luchtfoto's. Dit is met name een probleem bij de verwerking van luchtfoto's die de RAF in de Tweede Wereldoorlog heeft genomen. De bijzonder slechte bewaarcondities die de analoge opnames hebben gekend, hebben ervoor gezorgd dat de film waarop de meeste luchtfo-

to's stonden, in meer of mindere mate is gaan vervormen (met name vocht en warmte zijn funest voor dit medium als informatiedrager). Dit heeft geleid tot allerlei onregelmatige en willekeurige beeldvervalsingen, die op geen enkele manier te verwerken zijn omdat ze niet direct afhankelijk zijn van iets anders (zoals reliëf, lens of opnamehoek). De luchtfoto's van na de Tweede Wereldoorlog die wel goed zijn gearhiveerd, zijn in principe wel geschikt om fotogrammetrisch te verwerken.⁴⁴

4.4 Archeologische toepassingen

4.4.1 Inleiding

Archeologische toepassingen van analoge luchtfoto's die oorspronkelijk voor andere doeleinden waren vervaardigd, waren in de vorige eeuw vooral gericht op het opsporen en vastleggen van kenmerken van 'nieuwe' vindplaatsen. Incidenteel werden vanuit de lucht ook bekende vindplaatsen gefotografeerd, een werkwijze die teruggaat tot de jaren twintig van de vorige eeuw. Ruim vijftig jaar later werden tijdens vluchten boven West-Friesland op systematische wijze foto's van delen van bronstijdlandschappen gemaakt. In deze paragraaf worden belangrijke pioniers op het gebied van archeologische analoge luchtfotografie en bijbehorende toepassingen besproken (zie ook tabel 4.2).

4.4.2 Analoge luchtfoto's uit archieven

Rond de Tweede Wereldoorlog was Von Frijtag Drabbe de eerste die archeologische vindplaatsen op systematische wijze in kaart bracht met behulp van verticale zwart-witluchtfoto's (zie kadertekst 'Cornelis von Frijtag Drabbe' en afb. 4.5). In zijn functie van hoofd van de opnemingsdienst en later directeur van de Topografische Dienst had Von Frijtag Drabbe toegang tot het archief van deze dienst. De foto's waren kort voor, tijdens en kort na de Tweede Wereldoorlog vervaardigd voor topografische karteringen. Ook luchtfoto's gemaakt door de Royal Air Force (RAF) bleken een goede bron. Die foto's waren direct na de oorlog voor

⁴⁴ Hiernaar doet R. Emaus (Saxion Deventer) momenteel onderzoek.

Tabel 4.2 Overzicht van in hoofdstuk 4 besproken archeologische toepassingen van analoge luchtfoto's, kwaliteitskenmerken en selectie van relevante publicaties in Nederland.

Periode	Opnames	Kwaliteitskenmerken	Toepassingen	Literatuur
1920-1939	verticale luchtfoto's van de Dienst der Militaire Verkenningen en Topografische Inrichting (later Topografische Dienst)	schaal 1:10.000, 1:20.000 en kleinere schaal	opsporen van grotere archeologische structuren en complexen, bijvoorbeeld raatakkers, middeleeuwse verkavelingen, Romeinse en andere wegen, terpen, fortificaties, kastelen en dijken	Von Frijtag Drabbe 1947, 1948
1926-1934	overboordluchtfoto's (zwart-wit) van bekende archeologische verschijnselen		grafheuvelgroep Zeven Bergjes op de Zuiderheide bij Hilversum rond 1926; documentatie van grafveld van Laudermake in de provincie Groningen in 1932; Noordsche Veld bij Zeijen in 1934	Van Giffen 1939; Halbertsma 1948
1940-1945 (Tweede Wereldoorlog)	overboordluchtfoto's (zwart-wit) van de Britse Royal Air Force (RAF)	schaal 1:5.000 tot 1:73.500; het meest gebruikelijk is schaal van 1:7.600 tot 1:18.000.	relatief kleinschalige foto's, bruikbaar voor het opsporen van grotere structuren en complexen	Von Frijtag Drabbe 1947; Brongers 1976
1940-2006	verticale luchtfoto's door de Topografische Dienst van de Koninklijke Landmacht.	schaal: 1:18.000 en 1:20.000	opsporen van grotere archeologische structuren en complexen, bijvoorbeeld raatakkers, middeleeuwse verkavelingen, Romeinse en andere wegen, terpen, fortificaties, kastelen en dijken	Brongers 1976
1974-1989	overboordluchtfoto's uit de collectie van W.H. de Vries-Metz		luchtfoto's van West-Friesland gemaakt specifiek voor archeologische doeleinden; documenteren van nederzettingssporen uit de bronstijd aan de hand van <i>soil marks</i> en het monitoren van archeologisch waardevolle terreinen.	De Vries-Metz 1993; casestudy West-Friesland-Hoogkarspel in dit rapport
1993-1994	overboordluchtfoto's uit de collectie van W.H. de Vries-Metz		luchtfoto's van 59 rijksmonumenten in Noord-Holland, soort van eerste nulmeting en voor het exact vastleggen van de (kadastrale) begrenzingen van de monumenten	De Vries-Metz 1994; Metz 1999

vernietiging behoed, doordat een medewerker van de net opgerichte Stichting voor Bodemkartering (Stiboka) het belang had onderkend. Een deel van de RAF-foto's ging naar de Topografische Dienst in Delft en een deel naar Stiboka in Wageningen.⁴⁵

Al in de jaren dertig hield Von Frijtag Drabbe zich bezig met uitgebreid onderzoek naar archeologische, geologische en bodemkundige verschijnselen die op luchtfoto's zichtbaar waren. In 1947 en 1948 publiceerde hij verschillende zwart-witluchtfoto's waarop uiteenlopende archeologische verschijnselen zichtbaar zijn.⁴⁶ Voorbeelden hiervan zijn het Romeinse castellum bij Vechten, verdrinken dorpen in Noord-Holland en in het verdrinken land van lerseke, terpen inclusief walcomplexen in het terpengebied bij Dokkum en prehistorische raatakkers in Drenthe (afb. 4.3). Hoewel deze daar niet voor bedoeld waren, blijken ook de RAF-foto's van grote waarde voor het opsporen en nader in kaart brengen van archeologische

vindplaatsen. Een goed voorbeeld daarvan is een versterkte woonplaats uit de late middeleeuwen bij Holten, die zich in de vorm van *crop marks* aftekent in een graslandperceel (afb. 4.4). In navolging van Von Frijtag Drabbe wijdde A. Brongers in 1964 een korte publicatie aan het belang van zwart-witluchtfoto's voor archeologische doeleinden in Nederland.⁴⁷ Ook hij erkende al vroeg de archeologische bruikbaarheid van analoge zwart-witluchtfoto's gemaakt door de RAF, maar ook door Aerocarto en andere organisaties. In enkele publicaties, waaronder zijn in 1976 verschenen proefschrift, toont Brongers aan dat verticale zwart-witopnames een uitstekend hulpmiddel zijn bij het karteren van raatakkercomplexen.⁴⁸ In aanloop naar zijn proefschrift publiceerde hij in 1972 een artikel over luchtfoto's van een akkercomplex uit de ijzertijd bij Vaassen. Veelzeggend is dat hij deze publicatie opdroeg aan Von Frijtag Drabbe.⁴⁹

⁴⁵ Tegenwoordig biedt <https://www.dotkadata.com> RAF-foto's tegen betaling aan.

⁴⁶ Von Frijtag Drabbe 1947, 1948.

⁴⁷ Brongers 1964. Het artikel maakt deel uit van een bundel die verscheen naar aanleiding van een internationaal colloquium over luchtfoto's en archeologie in 1963 in Parijs.

⁴⁸ Brongers 1976.

⁴⁹ Brongers 1972.



Afb. 4.3 Prehistorisch raatakkercomplex bij het hunebed de Papeleze Kerk (D49) ten zuiden van Schoonoord in Drenthe. De wallen van de akkers tekenen zich als lichte verkleuringen af, de akkers zelf zijn door humusvorming donkerder gekleurd (bron: Von Frijtag Drabbe 1947, Pl. 69).



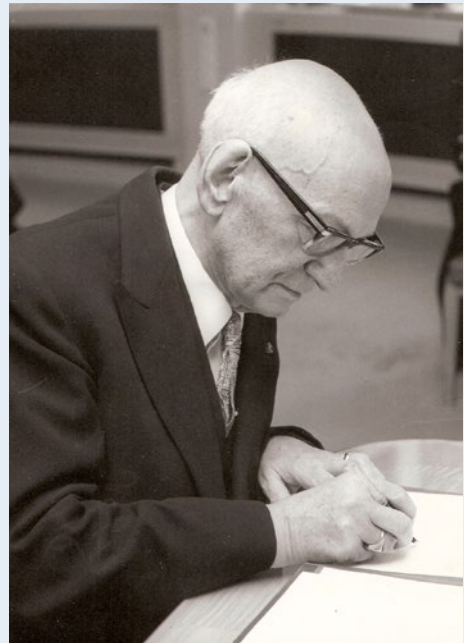
Afb. 4.4 RAF-luchtfoto uit de Tweede Wereldoorlog (april 1945). De foto toont een versterkte woonplaats uit de elfde-twaalfde eeuw bij Holten. Voor een actueel satellietbeeld van hetzelfde gebied, zie afb. 5.4.

Cornelis von Frijtag Drabbe, grondlegger van de archeologische luchtfoto-interpretatie in Nederland

Cornelis Antonius Josèphe von Frijtag Drabbe wordt op 5 oktober 1889 in Leeuwarden geboren.⁵⁰ Na de middelbare school begint hij op 16 september 1908 aan een militaire carrière bij de Koninklijke Militaire Akademie (KMA) te Breda. Hij doorloopt vervolgens de rangen van cadet tot kapitein. Op 16 september 1934 wordt hem op verzoek eervol ontslag verleend uit militaire dienst en wordt hij benoemd tot hoofd van de opnemingsdienst van de Topografische Dienst. In oktober 1940 verlaat hij de Topografische Dienst, zodat hij niet voor de bezetter hoeft te werken. Na de oorlog wordt dit ontslag herzien en met ingang van 8 mei 1945 wordt hij opnieuw als hoofd van de opnemingsdienst aangenomen bij de Topografische Dienst. Op 1 mei 1947 volgt zijn benoeming tot directeur, wat hij tot zijn pensioen op 1 november 1954 blijft. Op 27 maart 1975 overlijdt hij in Doorn, op 85-jarige leeftijd.

Von Frijtag Drabbe toont altijd grote belangstelling voor luchtfoto's en de toepassingsmogelijkheden die deze foto's bieden buiten het militaire en topografische doel waarvoor ze zijn gemaakt. Deze belangstelling resulteert in een groot aantal publicaties. Hij ontwikkelt zich in de loop der tijd tot de autoriteit op het gebied van de luchtfoto-interpretatie in Nederland. Om zijn kennis over te brengen geeft hij les in de luchtfoto-interpretatie, aan de KMA te Breda en aan het in 1950 opgerichte *International Training Centre for Aerial Survey* (ITC) te Enschede. Ook heeft hij als directeur van de

Topografische Dienst intensieve contacten met de NAVO. Vanwege deze betrokkenheid wordt hij in 1950 benoemd tot kolonel in buitengewone dienst. Via publicaties en lezingen komt Von Frijtag Drabbe in contact met wetenschappers op velerlei gebied, zoals A.E. van Giffen (archeologie) en C.H. Edelman (bodemkundige). In 1947 publiceert hij de bijdrage 'De luchtfoto in dienst van de archaeologie' in het gedenkboek voor A.E. van Giffen. In deze publicatie schrijft Von Frijtag Drabbe in feite al over *crop marks* en *shadow marks*, hoewel deze termen dan nog niet worden gebruikt.



Afb. 4.5 Cornelis Antonius Josèphe von Frijtag Drabbe (bron: Wageningen University & Research).

4.4.3 Analoge luchtfoto's gemaakt voor archeologische doeleinden

De allereerste luchtfoto's die zijn genomen specifiek met het oog op het documenteren van aan het maaiveld zichtbare archeologische verschijnselen, zijn die van de grafheuvelgroep Zeven Bergjes op de Zuiderheide bij Hilversum (rond 1926), van het grafveld van Laudermake in de provincie Groningen (in 1932) en van het Noordsche Veld bij Zeijen (in 1934).⁵¹ Ze tonen

aan dat al in de beginjaren van de analoge luchtfotografie belang werd gehecht aan het vastleggen van kenmerken van archeologische vindplaatsen vanuit de lucht.

Naar aanleiding van de voorgenomen grootschalige ruilverkaveling Het Grootslag startte in het midden van de jaren zeventig W.H. de Vries-Metz van de Universiteit van Amsterdam met systematische fotoverkenningsvluchten boven West-Friesland in de provincie Noord-Holland. Vanaf 1974 tot en met 1989 fotografeerde zij vanuit vliegtuigen met veel succes delen van bronstijdschappen in West-Friesland (zie kadertekst

⁵⁰ De kadertekst over Von Frijtag Drabbe is deels ontleend aan <https://www.historischwaterbeheer.wur.nl/>.

⁵¹ Van Giffen 1939; Halbertsma 1948.

‘Willy Metz’, afb. 4.9 en paragraaf 4.6). In tegenstelling tot haar voorgangers, Von Frijtag Drabbe en Brongers, maakte De Vries-Metz de luchtfoto’s zelf, met een handcamera vanuit kleine vliegtuigen en specifiek voor archeologische doeleinden. Vanuit de lucht legde zij talrijke aangeploegde bewoningssporen, sloten en greppels uit de bronstijd vast op foto’s en dia’s (afb. 4.6). Deze werkwijze resulteerde in een periode van vijftien jaar in een belangrijke, omvangrijke regionale collectie van luchtfoto’s. De Vries-Metz toonde het belang aan van oblique luchtfoto’s ten behoeve van prospectie en monitoring van archeologische vindplaatsen en landschappen in West-Friesland. Haar onderzoek resulteerde in 1993 in een proefschrift.⁵² Ook maakte De Vries-Metz in het kader van een proefproject luchtfoto’s van 59 rijksmonu-

menten in Noord-Holland, als een soort nulmeting en voor het exact vastleggen van de (kadastrale) begrenzingen van de monumenten.⁵³ Twee andere voorbeelden betreffen opnames van een aangeploegde Romeinse villa bij Hoogeloon in het Brabantse zandgebied in 1980 (afb. 4.7) en van een aangeploegd raatakkercomplex bij Wekerom aan de westelijke rand van de Veluwe (afb. 4.8). Halverwege de jaren negentig nam het fotograferen vanuit de lucht voor archeologische doeleinden sterk af. In de Belgische provincies West- en Oost-Vlaanderen daarentegen maakte J. Semey vanaf de jaren tachtig talloze vluchten, met als resultaat een omvangrijke collectie van 70.000 dia’s.⁵⁴ Deze activiteit was ingebed in een luchtfotografisch onderzoeksproject van de Universiteit Gent. De dia’s zijn later gedigitali-



Afb. 4.6 De Streekweg bij Hoogkarspel waar sporen van een bronstijdnederzetting door de geploegde akkers heen schemeren (foto: W.H. Metz).

⁵² De Vries-Metz 1993.

⁵³ Die luchtfoto’s zijn genomen in de winter van 1993-1994, zie De Vries-Metz 1994; Metz 1999.

⁵⁴ Ampe *et al.* 1995; Bourgeois, Meganck & Semey 1998; Bourgeois *et al.* 1999.



Afb. 4.7 De Romeinse villa van Hoogeloon is een mooi voorbeeld van *soil marks* in een akkerperceel. Op deze foto, gemaakt in 1980, zijn de aangeploegde fundamenten als donkere lijnen te zien. De donkeroranje vlek is het badgebouw met stookruimte (foto: W.H. Metz).



Afb. 4.8 Blik op de aangeploegde raatakker bij Wekerom in Gelderland. De aangeploegde wallen zijn lichter van kleur en tekenen zich af in een rasterpatroon (foto: W.H. Metz).

seerd en voorzien van georeferentie (zie kadertekst 'Wat is stereoscopie en fotogrammetrie?' in paragraaf 4.5.4). De inventarisatie leverden vele sporen op, lijnvormige elementen, vierkante en vooral ook – meer dan duizend – cirkelvormige structuren. Gravend onderzoek

van een aantal van deze cirkels wees uit dat het ging om de randstructuren van grafheuvels uit de midden-bronstijd.⁵⁵ Ook op Nederlands-Vlaanderen zijn foto's gemaakt waarbij archeologische vindplaatsen zijn ontdekt.⁵⁶

⁵⁵ De Reu & Bourgeois 2013.

⁵⁶ De Kraker, Kerckaert & Kattenberg 2006, zie ook Theunissen, Müller & De Kraker 2011.

Willy Metz: liever zelf fotograferen vanuit de lucht

Willy Metz (later De Vries-Metz, afb. 4.9) is als middelbare scholier al dol op vliegen. Als jong meisje mag zij mee met een testvlucht in een DC8 van de KLM en zo raakt zij gefascineerd door het vogelvluchtperspectief. In Cambridge volgt zij in 1967-1968 colleges luchtfoto-interpretatie bij J.K.S. St Joseph (1912-1994). St Joseph is opgeleid als geoloog en is veteraan van de Royal Air Force. Aan de Universiteit van Cambridge geeft hij jarenlang les over het gebruik van luchtfotografie als methode voor geologisch-archeologisch onderzoek.

Geïnspireerd door alle mogelijkheden van deze toepassing neemt Metz vlieglessen en haalt ze haar brevet. Ze beseft dat ook in Nederland archeologische luchtfoto-interpretatie en het in eigen beheer uitvoeren van luchtverkenningen een waardevolle aanvulling kunnen zijn bij archeologisch onderzoek. In de jaren veertig is al duidelijk geworden dat de West-Friese landschapsdelen veel sporen van bewoning uit de bronstijd bevatten die vanuit de lucht goed te zien zijn. In 1970 onderneemt St Joseph daar enkele prospectievluchten, maar het is De Vries-Metz die systematisch, over een lange periode (1974-1989) verkenningvluchten uitvoert. Met de beelden van aangeploegde donkere bronstijdsporen tegen een lichtgrijze achtergrond kunnen uitgestrekte nederzettingsarealen worden vastgelegd. De resultaten vormen vaak het startpunt voor opgravingen. In 1993 promoveert zij op een proefschrift over dit onderwerp: *Luchtfoto-archeologie in oostelijk West-Friesland. Mogelijkheden en resultaten van archeologische remote sensing in een verdwijnend prehistorisch cultuurlandschap*. Een jaar later

publiceert zij een overzicht van de archeologische monumenten in Noord-Holland die vanuit de lucht zijn vastgelegd.⁵⁷ Dat project is een eerste vorm van monitoring. Naast het uitvoeren van verkenningvluchten laat zij als medewerker bij het Albert Egges van Giffen Instituut voor Prae- en Protohistorie (IPP) aan de Universiteit van Amsterdam vele studenten kennismaken met luchtfotoarcheologie.⁵⁸ Zo wordt de kennis over de mogelijkheden en het gebruik van luchtfoto's, ook voor de monumentenzorg, breed gedeeld.



Afb. 4.9 Willy de Vries-Metz, 8 april 1980 (foto: R. Bogaerts, Nationaal Archief, Anefo).

4.5 Beeldoptimalisatie en interpretatie van analoge luchtfoto's

R. Emaus

4.5.1 Inleiding

Voor het (beter) herkennen en beoordelen van gewasverkleuringen en andere tekens op

analoge luchtfoto's kan gebruik worden gemaakt van digitale beeldverwerking gericht op kleuren en patronen. Deze werkwijze (beeldoptimalisatie) is met name geschikt voor de analyse van *crop marks*, *soil marks*, *snow marks* en *shadow marks*. Door het contrast in de intensiteit en tint van kleuren (afzonderlijk van elkaar) te vergroten, kunnen eventuele patronen in het landschap zichtbaar worden gemaakt. Genoemde variabelen (intensiteit en tint) worden in deze paragraaf kort besproken.

⁵⁷ De Vries-Metz 1994.

⁵⁸ Vanaf 1991 bekend onder de naam Instituut voor Pre- en Protohistorische Archeologie Albert Egges van Giffen.

4.5.2 Intensiteit van kleuren

Het menselijke visuele systeem is gemiddeld gezien in staat een verschil in lichtintensiteit van ongeveer 2% te onderscheiden.⁵⁹ Voor zeer lichte en zeer donkere delen van luchtfoto's is een hoger percentage nodig. Dit betekent dat er in deze delen tussen twee naast elkaar gelegen pixels mogelijk wel een contrast kan bestaan, maar dat dit niet groot genoeg is om door het menselijke visuele systeem te worden opgemerkt. Het kan daarom nuttig zijn om de weergave van de kleuren van een luchtfoto aan te passen, waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van alle beschikbare ruimte om kleur(intensiteit) weer te geven. Er zijn grofweg twee manieren om dit digitaal aan te passen. De eerste maakt gebruik van de spreiding van kleuren, meer specifiek: de spreiding van de intensiteit van de kleuren. Kleuren die relatief veel op elkaar lijken, die dicht bij elkaar liggen in het zichtbare spectrum, worden op deze manier uit elkaar getrokken en de onderlinge verschillen tussen de pixels worden groter gemaakt. Een niet-waarneembaar verschil kan zo een waarneembaar verschil worden. Een veelgebruikte methode is de *histogram equalization*. Deze methode kijkt naar het deel van het spectrum dat in de foto niet wordt gebruikt. Dit betreft meestal de lichtste en de donkerste kleurintensiteiten. De methode zorgt er vervolgens voor dat het gebruikte deel van het spectrum opnieuw verspreid wordt, zodanig dat het volledige spectrum wordt gebruikt. Het verschil in kleurintensiteit (de ruimte tussen de kleurintensiteiten) tussen de pixels wordt op deze manier vergroot. De tweede wijze om het contrast te vergroten is luchtfoto's te filteren met bijvoorbeeld een highpassfilter. In tegenstelling tot *histogram equalization* kijkt deze methode niet naar de hoogste en laagste waarden (intensiteiten) in de hele foto, maar enkel naar de verschillen tussen de pixels direct rondom een bepaalde pixel. Op deze manier kunnen kleine verschillen worden versterkt (*highpassfilter*) of juist verminderd (*lowpassfilter*, dat erg bruikbaar is voor het verwijderen van ruis).

4.5.3 Tint van kleuren

Behalve voor verschillen in kleurintensiteit is het menselijke visuele systeem ook gevoelig voor verschillen in tint. Conceptueel kunnen we de zichtbare kleuren terugbrengen tot de drie primaire kleuren die door de kegeltjes in onze ogen worden waargenomen: blauw, groen en rood. Alle zichtbare kleuren zijn (noodzakelijk) opgebouwd uit een of meer van deze drie kleuren. Echter, het menselijke visuele systeem blijkt minder gevoelig voor verschillende tinten in het groene spectrum dan in de rode of blauwe spectra.⁶⁰ Het verschil tussen twee groene pixels (met lichtjes verschillende tint) moet groter zijn om door een mens te worden waargenomen dan wanneer deze twee pixels exact hetzelfde verschil zouden hebben, maar in het blauwe of rode spectrum zouden liggen. Wanneer men op zoek is naar minimale kleurverschillen in digitale kleurenluchtfoto's, loont het dikwijls de moeite om simpelweg de kleuren om te draaien. In ieder GIS-pakket is het relatief eenvoudig om bijvoorbeeld de groene en blauwe (of rode) kleuren in elkaars plaats te laten zien.

4.5.4 Herkenning van patronen

Waarneembare verschillen in tint of intensiteit worden pas archeologisch betekenisvol wanneer een bepaalde vorm of een bepaald patroon herkend wordt, bijvoorbeeld een cirkel, een lijn of een serie lijnen. Hierbij is van belang dat het menselijke visuele systeem vooral is ingesteld om horizontale en verticale lijnen (en dus patronen) te vinden. Diagonale patronen worden relatief slecht herkend. Perfect noord-zuid of oost-west lopende patronen hebben daarom meer kans om te worden gevonden in een ongegeorefereerde luchtfoto dan bijvoorbeeld noordoost-zuidwest lopende patronen. Behalve het 'spelen' met de kleuren van een digitale luchtfoto om contrast te vergroten, loont het daarom de moeite om luchtfoto's ook (digitaal) te draaien. Op deze manier komen bijvoorbeeld ook de noordoost-zuidwest lopende patronen als horizontaal of verticaal in beeld. Daarmee hebben ze dezelfde kans om waargenomen te worden.

⁵⁹ Het menselijke visuele systeem is het geheel van waarneming door beide ogen, alsook de verwerking hiervan door de hersenen; Gonzalez & Woods 2008.

⁶⁰ MacAdam 1942.

Wat is stereoscopie en fotogrammetrie?

R. Emaus

Stereoscopie was lange tijd een belangrijk hulpmiddel bij het genereren van driedimensionale beelden op basis van luchtfoto's. Door middel van stereoscopie kan met twee deels overlappende luchtfoto's hoogte-informatie worden verkregen over het deel waar de luchtfoto's elkaar overlappen.⁶¹ Wanneer deze luchtfoto's door een stereoscoop (afb. 4.10) worden bekeken, lijkt er een driedimensionaal landschap zichtbaar te zijn. De stereoscoop zorgt er namelijk voor dat de linker luchtfoto alleen door het linkeroog wordt bekeken, en de rechter luchtfoto alleen door het rechteroog. De stereoscoop simuleert daarmee in feite het effect van een enorme verrekijker waarmee naar de aarde wordt gekeken. Omdat het landschap in het ene beeld licht oblique van links, en in het andere beeld licht oblique van rechts wordt bekeken, maken de hersenen daar automatisch een driedimensionaal beeld van.

Met behulp van een stereoscoop kunnen er ook metingen in de luchtfoto's gedaan worden. Dat noemen we fotogrammetrie. De wiskundige grondslag hiervoor werd al in 1851 uitgewerkt. Hiermee kan voor iedere locatie in

de foto de afstand tot het nadirpunt worden gemeten, en tegelijkertijd het verschil in 'omvalling' tussen twee foto's worden bepaald.⁶² Vanwege een verschil in opnamelocatie is er sprake van een perspectiefverschil tussen twee foto's: op de ene foto valt iets naar rechts, terwijl hetzelfde punt op de andere foto naar links valt. De omvalling op de ene foto naar de ene kant minus de omvalling op de andere foto naar de andere kant is een afgeleide van de hoogte van die locatie. Door twee luchtfoto's met voldoende overlap fotogrammetrisch te verwerken, kunnen we dus een hoogtemodel vervaardigen (door voor iedere pixel de relatieve omvalling te berekenen). Vervolgens kunnen we een van de beide luchtfoto's naadloos orthorectificeren op dit verkregen hoogtemodel. De nauwkeurige orthofoto is daarmee feitelijk een nuttig bijproduct van de fotogrammetrie. Dit hele proces werd tot de komst van relatief krachtige computers nog analoog uitgevoerd. Tegenwoordig zijn er fotogrammetrische softwarepakketten beschikbaar. Een aantal GIS-pakketten biedt al de mogelijkheid (via specifieke plug-ins) voor fotogrammetrische dataverwerking.



Afb. 4.10 Een spiegelstereoscoop (foto: R. Emaus).

⁶¹ Avery 1970, 53-54; Schneider 1974, 17-34; Lillesand, Kiefer & Chipman 2008, 146-153.

⁶² Het nadirpunt is in de astronomie het punt dat recht tegenover het zenit staat: het punt recht onder de waarnemer. Het zenit staat dus recht boven iemands hoofd en het nadir dus precies onder die persoon.

4.5.5 Interpretatie van analoge luchtfoto's

Als op een luchtfoto eenmaal een lijn, cirkel of patroon is waargenomen, is het belangrijk te analyseren welk proces dit patroon heeft veroorzaakt. Met andere woorden: waar kijk je precies naar? In iedere stap van het proces van opname tot (digitale) analyse kunnen er (bewust of onbewust) veranderingen in het beeld zijn

aangebracht. Dat geldt niet alleen voor vervormingen, maar ook voor de 'inhoud' van het beeld. Men dient na te gaan of het waargenomen patroon wordt veroorzaakt door iets in het landschap, bijvoorbeeld een *crop*, *soil*, *snow* of *shadow mark*, of dat de oorzaak een fout is in de productie⁶³ of de postproductie.⁶⁴ In deze laatste gevallen spreken we over (beeld)artefacten. Hieronder zal een voorbeeld van een dergelijke beeldartefact worden gegeven. Tijdens een bureauonderzoek naar een gebied op Schouwen-Duiveland werd op een



⁶³ Onder productie wordt verstaan de primaire totstandkoming van het beeld: de camera, het filmnegatief of de lichtgevoelige chip, de cameraleens, het ontwikkelprocedé van het filmnegatief, etc.

⁶⁴ De postproductie omvat alle acties betreffende het beeld na de primaire productie: de archivering van het filmnegatief, de (contact)afdrukken of andere reproductiemethoden, de archivering van reproducties (wanneer er met een reproductie wordt gewerkt), de digitalisering, etc.

Afb. 4.11 RAF-luchtfoto van Westenschouwen (Collectie Bibliotheek Universiteit Wageningen, WUR Library ID: 290247)]

RAF-luchtfoto een zeer vage, grote cirkel in de weilanden opgemerkt (afb. 4.11). Hij lag enkele kilometers ten westen van een andere, bekende grote cirkel: de ringwalburg van Burgh-Haamstede. De waargenomen cirkel was ongeveer even groot als de ringwalburg van Burgh-Haamstede (met een diameter van 340/345 m, gemeten aan de buitenzijde van de gracht) en lag eveneens in de buurt van een waterweg.⁶⁵ Typologisch vertoonde deze cirkel dus veel overeenkomsten met de bekende ringwalburgen. Het zou een *crop mark* kunnen zijn die werd veroorzaakt door de greppel rondom de ringwalburg. Toch kan het geen *crop mark* van een ringwalburg zijn. Het fenomeen is namelijk maar op één foto zichtbaar en op geen enkele andere foto uit dezelfde serie. Dit zou wel het geval moeten zijn, omdat er slechts enige minuten tijd zit tussen

deze opname en de vorige en volgende luchtfoto. Het is zeer onwaarschijnlijk dat een *crop mark* in een tijdsbestek van enkele minuten opkomt en ook weer verdwijnt. Daarnaast lijkt de cirkel niet alleen in het grasland zichtbaar te zijn: wanneer de hogeresolutiescans worden bekeken, is dit patroon ook zichtbaar in de wegen en zelfs in het dak van een huis. Het is daarmee zeer waarschijnlijk dat de cirkel is veroorzaakt tijdens de productie of postproductie van de luchtfoto en geen onderdeel is van het waargenomen landschap. De diameter van de cirkel, zoals gemeten op de fysieke luchtfoto, is 3 cm. Het is waarschijnlijk dat iemand ergens tussen de productie van de luchtfoto en het scannen van de foto een voorwerp op de foto heeft gezet die er een lichte afdruk in heeft gemaakt.

⁶⁵ Van Heeringen 1995, 32-36.

4.6 Casestudy analoge luchtfoto's

Hoogkarspel-Tolhuis. West-Friesland 2.0: luchtfoto's van Metz digitaal bekeken

N.C.I. Karagiannis en W.K. van Zijverden
(Saxion Deventer)

Administratieve gegevens

Land: Nederland
Provincie: Noord-Holland
Gemeente: Drechterland
Plaats: Hoogkarspel
Toponiem: Tolhuis
RD-coördinaten: 139.906/522.445
ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
Grondgebruik: bouwland

Kernpublicatie

Karagiannis 2021

Overige literatuur

Bakker 1977; Ente 1963; De Vries-Metz 1993;
Roessingh 2018; Roessingh & Tol 2019;
Roessingh et al. 2021

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische
Landschappenkaart
Hoofdlandschap: Noord-Hollands kleigebied
Landschapszone: kwelders
Het landschap van West-Friesland kent een
complexe genese. De basis van het landschap
wordt gevormd door kreekruigten die zijn
opgeslibd tot boven gemiddeld hoogwater in een
kreekenkommenlandschap. Dit landschap is in de
vroeg bronstijd gedeeltelijk afgedekt met kwel-
derafzettingen. Het patroon van zand- en zavel-
gronden dat is weergegeven op de bodemkaart
van Ente is een palimpsest van deze twee
verschillende afwateringssystemen en daardoor
complex.⁶⁶ De lagere delen van dit landschap zijn
afgedekt met een dun (maximaal enkele
decimeters) pakket dekafzettingen bestaande uit
pik-, knik- en kiekklei of een moerige laag.

Geraadpleegde beelden

Oblique luchtfoto's collectie Metz (79-003-001
t/m 79-003-012 en 79-028-001 t/m 007)
Opnamejaar: 1979

Opnameseizoen: zomer (respectievelijk 26 juni
1979 en 5 juli 1979)
Type foto: overboord

Wat zien we?

In de zomer van 1979 zijn enkele percelen in
Hoogkarspel gediëpplagd. Voorafgaand aan
deze ingreep zijn tussen 1965 en 1979 binnen het
onderzoekgebied opgravingen uitgevoerd door
het toenmalige Instituut voor Prae- en
Protohistorie (IPP) van de Universiteit van
Amsterdam (afb. 4.12). W.H. Metz heeft van deze
percelen twee series luchtfoto's gemaakt
waarop diverse greppels en greppelbundels
zichtbaar zijn als *soil marks* (afb. 4.13).⁶⁷ Op basis
van het uitgebreide archeologische onderzoek in
West-Friesland in de jaren zestig, zeventig en
tachtig van de vorige eeuw is bekend dat deze
greppels en greppelbundels samenhangen met
erf- en grafstructuren uit de midden- en late
bronstijd.⁶⁸ Metz veronderstelde dat de ruilver-
kavelingsingrepen dermate groot zijn geweest,
dat op deze plaats geen resten uit de bronstijd
bewaard zouden zijn gebleven.⁶⁹ Hernieuwd
onderzoek in de regio vanaf 2009 toont aan dat
op percelen met vergelijkbare *soil marks* wel
degelijk nog resten aanwezig zijn.⁷⁰
In het kader van een afstudeeronderzoek in
opdracht van ADC-ArcheoProjecten heeft
N. Karagiannis geprobeerd vast te stellen of op
dit perceel sporen uit de bronstijd bewaard zijn
gebleven.⁷¹ Hiervoor diende eerst de exacte
locatie van de waargenomen grondsporen te
worden vastgesteld. Dit is niet eenvoudig,
omdat de oblique opnames zijn gemaakt vóór
de ruilverkaveling. Het landschap is daarna
ingrijpend veranderd. Het is daardoor bijzonder
lastig om voldoende herkenningspunten te
vinden om de foto's te kunnen georefereren.
Door gebruik te maken van een lijn tussen twee
herkenningspunten op de foto bleek het
evenwel mogelijk een groot aantal referentie-
punten te verkrijgen (afb. 4.14). Met behulp van
een splinefunctie (een bepaalde interpolatieme-
thode in GIS om de foto's op de juiste geografi-
sche plek te leggen) is de foto vervormd tot een
orthogonale foto. Vervolgens zijn de twee beste
beelden uit de *runs* gecombineerd tot één
afbeelding. Deze gecombineerde foto is geana-
lyseerd (afb. 4.15) en vergeleken met sporen die
zijn aangetroffen tijdens opgravingen die zijn
uitgevoerd zowel voorafgaand als na de foto-
opnames.

⁶⁶ Ente 1963.

⁶⁷ De Vries-Metz 1993.

⁶⁸ Bakker 1977; Roessingh 2018, 55-131.

⁶⁹ De Vries-Metz 1993, 284.

⁷⁰ Roessingh & Tol 2019.

⁷¹ Karagiannis 2021.



Afb. 4.12 Ligging van het onderzoekgebied Hoogkarspel-Tolhuis en uitgevoerde opgravingen (bron: Karagiannis 2021, ADC-Archeoprojecten).

Behalve archeologische sporen zijn in de foto lichte banen te zien die overeen lijken te komen met de kreekruggronden zoals deze zijn weergegeven in de bodemkaart van Ente (afb. 4.16). Hoewel het patroon in de foto in grote lijnen overeenkomt met het patroon in de kaart van Ente, zijn het vooral de talloze kleinere 'zandbanen' die een veel grotere mate van detail in de genese van het landschap laten zien.

Wat is de archeologische interpretatie?

Vooral in de lichte ondergrond zijn de donkere *soil marks* van de archeologische grondsporen

goed te zien. Zo kunnen in de foto naast de greppelbundels een huisgreppel en een ringsloot behorende bij een grafmonument worden herkend. Een deel van deze sporen is opgegraven. Dat deze opgegraven sporen als *soil marks* te zien zijn, heeft zeer waarschijnlijk te maken met de gehanteerde opgravingsstrategie (uitlepelen van greppels) en het terugstorten van de donkere vulling en bouwvoor.

Opvallend is dat de sporen in de foto veel breder zijn dan de breedte van de sporen zoals deze zijn gedocumenteerd tijdens de opgraving (afb. 4.17). Doorgaans wordt gedacht dat deze verbreding



Afb. 4.13 Luchtfoto 79-28-003, genomen in 1979, waarop *soil marks* zichtbaar zijn (foto: W.H. Metz).

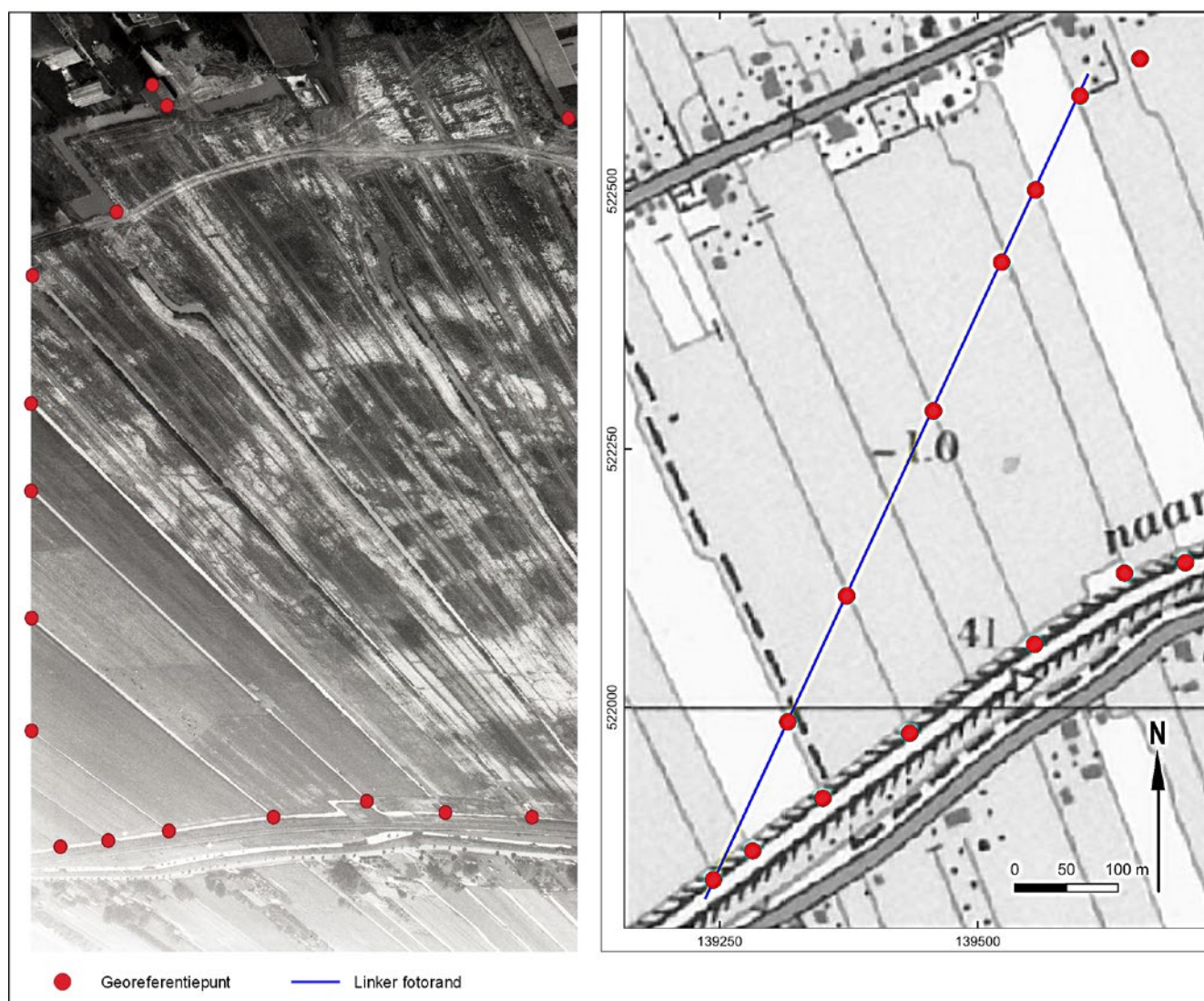
van het spoor ontstaat als gevolg van het vervoegen van de opvulling in de bouwvoor. Het is echter zeer aannemelijk dat de sporen aan de bovenzijde oorspronkelijk, dat wil zeggen voordat ze werden aangeploegd, breder waren dan in het opgravingsvlak. Dit is zeker van toepassing op de gegraven greppels die een V-vormige insteek hebben.

In de donkere vlakken zijn minder sporen waargenomen. Dit kan twee oorzaken hebben. De sporen zijn mogelijk niet zichtbaar door de donkere kleur van de natuurlijke ondergrond of het afdekkende pakket is iets dikker, waardoor de archeologische sporen niet zijn geraakt tijdens het diepploegen.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Naast een analyse van de *soil marks* met de opgravingsresultaten is een booronderzoek

uitgevoerd. Het was gericht op de in de beelden waargenomen sporen. Op basis van het booronderzoek en de opgravingsresultaten kon worden vastgesteld dat sporen (gedeeltelijk) intact aanwezig waren, in tegenstelling tot hetgeen voorafgaand aan het onderzoek werd verondersteld. Daarnaast lijken sporen aanwezig te zijn die niet tijdens de opgravingen zijn aangetroffen. Mogelijk zijn dit ondiepe sporen die niet in het opgravingsvlak voorkomen. Het gekozen georefereringsproces en de gekozen techniek voor beeldvorming (*spline*) bleek te voldoen om de geografische ligging van de grondsporen met voldoende geografische nauwkeurigheid vast te stellen. De gehanteerde werkwijze is in principe geschikt voor de gehele dataset van ca. 4000 West-Friese foto's uit de collectie-Metz.

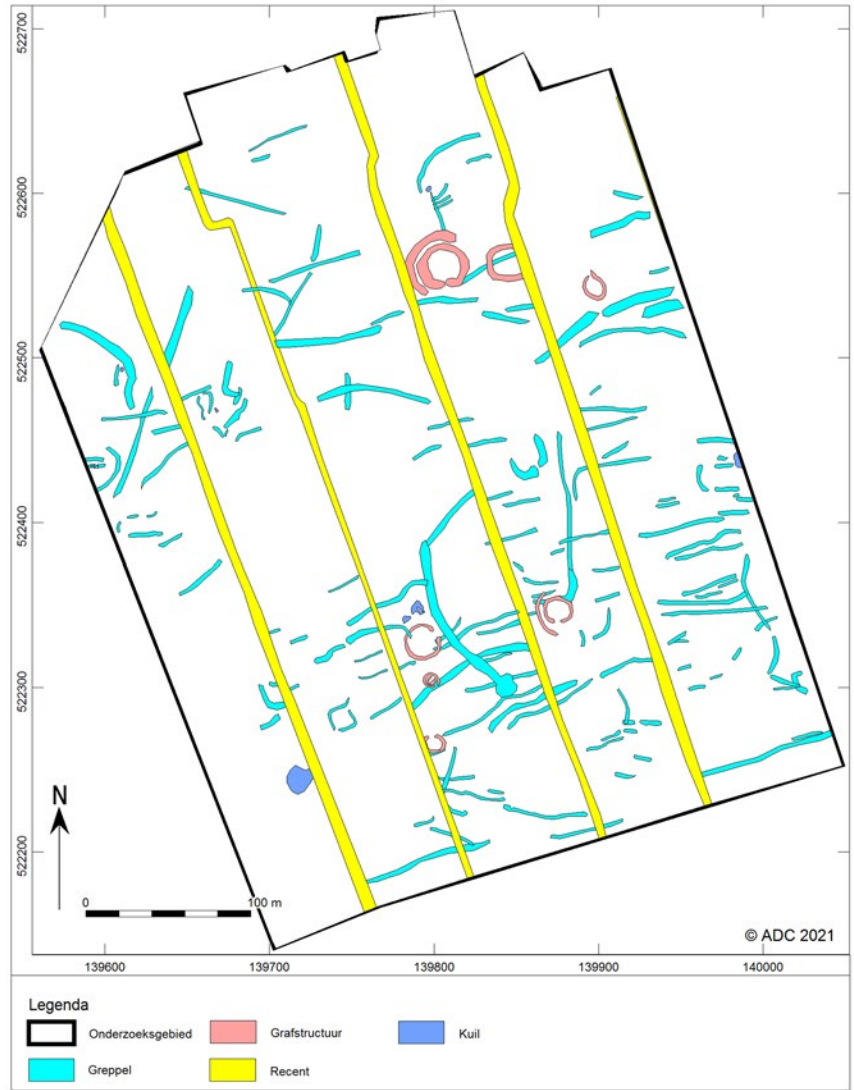


Afb. 4.14 De luchtfoto van het onderzoeksgebied (links) en de topografische kaart uit de jaren zeventig (rechts) met georeferentiepunten (bron: Karagiannis 2021).

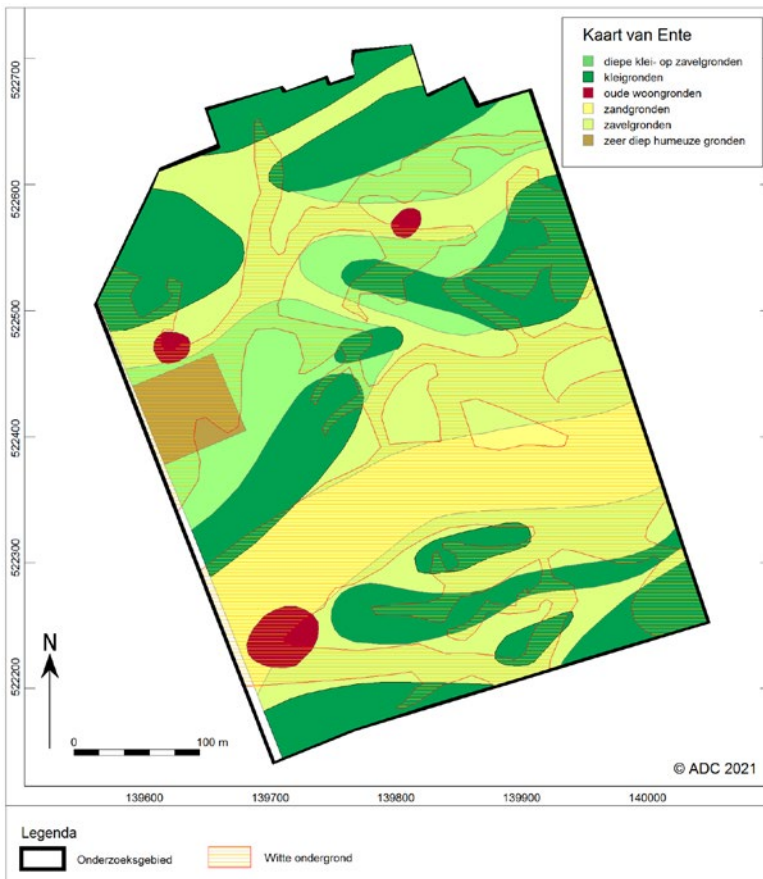
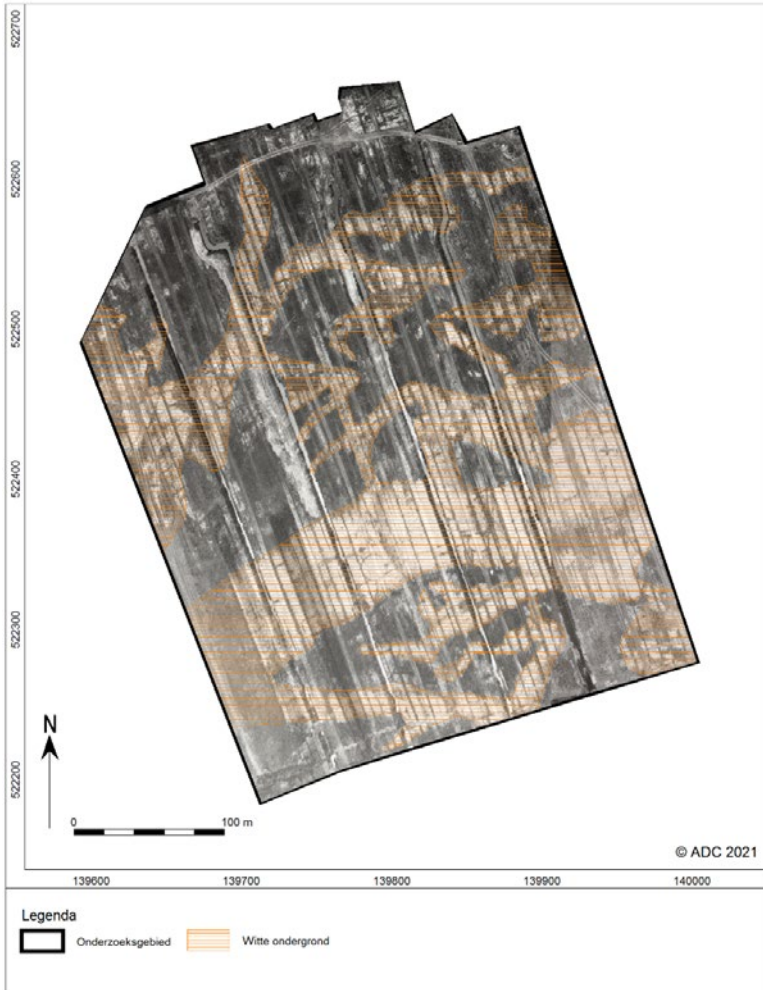
Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Analyse van gegeoreferende oude luchtfoto's levert waardevolle informatie op voor bureau-onderzoeken. Zo kunnen heel gericht en nauwkeurig data uit 1979 over het landschap van nu worden gelegd, zodat een beter inzicht wordt verkregen in de potentie van vindplaatsen. Ook de vervolgstap, het vaststellen van de fysieke kwaliteit, kan gericht en minder destructief worden uitgevoerd, bijvoorbeeld met minisleuven in plaats van grote proef-
- sleuven. Het onderzoek naar De Rikkert is een goed voorbeeld van een dergelijke aanpak.⁷²
- De spoorbreedte in het opgravingsvlak is systematisch kleiner dan op de luchtfoto. Voor de boorafstand in de validatiefase dient dan ook rekening te worden gehouden met een onderlinge afstand van maximaal de helft van de in de foto waargenomen spoorbreedte.
- Houd rekening met in spiegelbeeld afgedrukte negatieven.

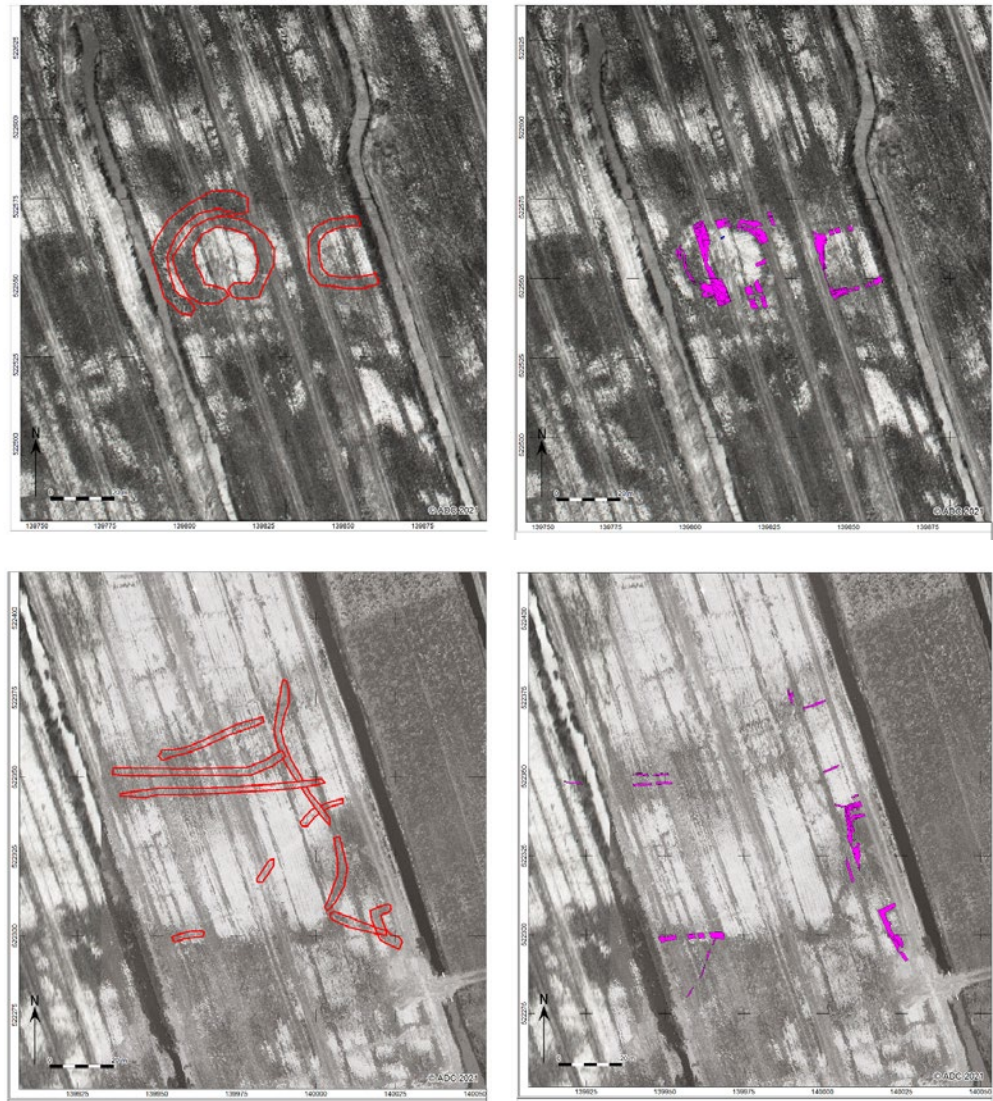
⁷² Roessingh et al. 2021.



Afb. 4.15 Een kaart van het onderzoeksgebied met daarop de verschillende, herkende spoorcategorieën die op de luchtfoto zijn te zien als soil marks (bron: Karagiannis 2021).



Afb. 4.16 De lichte banen die op de luchtfoto (boven) te zien zijn, zijn kreekruggronden. Die laten meer detail zien dan wat er aan zandgronden op de kaart van bodemkundige Ente (onder) is weergegeven (bron: Karagiannis 2021; Ente 1963).



Afb. 4.17 Linksboven sporen van *soil marks* van kringgreppels, rechtsboven de opgegraven grondsporen in 1965, linksonder sporen van *soil marks* van greppels, rechtsonder de opgegraven greppels in 2019 (bron: Karagiannis 2021).

5 Digitale luchtfoto's en sensorbeelden

Twee decennia digitaal

Rond de eeuwwisseling tekenden zich steeds duidelijker de contouren van een digitale wereld af, een ontwikkeling die voor de archeologische vakwereld van grote betekenis is. De analoge luchtfotografie werd geleidelijk vervangen door de digitale variant ervan, met als belangrijk resultaat landsdekkende opnames van Nederland in een steeds hogere resolutie. Vooral digitale luchtfoto's en satellietbeelden in het zichtbare spectrum genomen in de droge en hete zomers van 2018, 2019 en 2020 hebben een schat aan nieuwe vindplaatsen opgeleverd. Ook tekenen archeologische sporen en structuren zich haarscherp af op oblique foto's gemaakt vanuit kleine motor- en zweefvliegtuigen. Voor digitale luchtfoto's geldt hetzelfde als voor analoge luchtfoto's: archeologische sporen en structuren kunnen alleen worden opgespoord aan de hand van gewas-, vegetatie-, bodem- en schaduwverkleuringen.

Archeologische toepassingen van sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum (bijvoorbeeld radar- en infraroodbeelden) bevinden zich in een experimentele fase en zijn tot op de dag van vandaag zeldzaam in Nederland.

Dankzij het internet neemt ook de toegang tot en beschikbaarheid van digitale luchtfoto's en sensorbeelden toe. Er is een overweldigend aanbod van digitale foto's in het zichtbare spectrum op internet, van historische, oorspronkelijk analoge zwart-witfoto's van steden en dorpen tot landsdekkende luchtfoto's en satellietbeelden in kleur. Ze worden deels aangeboden als open data en deels tegen betaling (op bestelling of door middel van een licentie). De open data worden beschikbaar gesteld door de Nederlandse overheid. De betaalde dienstverlening wordt geleverd door commerciële bedrijven, al dan niet in samenwerking met andere partijen (overheid-, semioverheid).

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staan digitale luchtfoto's en sensorbeelden in archeologische remote sensing centraal. Eerst gaan we in op belangrijke kwaliteitskenmerken van deze foto's en beelden. Vervolgens worden archeologische toepassingen besproken, zowel van digitale kleurenluchtfoto's (RGB-beelden) in het voor het menselijke oog zichtbare spectrum als van sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum. Het hoofdstuk sluit af met enkele casestudy's.

5.2 Korte historische terugblik

Met de introductie van digitale camera's en sensoren vond rond 2000 de overstap van analoge naar digitale luchtfotografie plaats. Daarmee verdween de analoge zwart-witluchtfoto geleidelijk van het toneel als product van remote sensing. Tot en met 2006 werden landsdekkende luchtfoto's nog grotendeels analoog en in zwart-wit opgenomen, maar vanaf 2007 gebeurde dit digitaal en in kleur (RGB). Deze

ontwikkeling, en min of meer parallel hieraan de sterke toename in de beschikbaarheid, hoeveelheid en kwaliteit van digitale luchtfoto's en sensorbeelden op het internet, heeft het gebruik van RGB-foto's door archeologen sterk bevorderd.

Een grote hoeveelheid digitale luchtfoto's en andere sensorbeelden wordt kosteloos op het internet als open data aangeboden. Een belangrijke en zeer toegankelijke bron voor Nederland zijn de landsdekkende luchtfoto's die Publieke Dienstverlening Op de Kaart (PDOK) in de vorm van een viewer aanbiedt op het internet.⁷³ De betreffende luchtfoto's (orthofotomosaïeken) zijn gemaakt in de zomer van vier opeenvolgende jaren (2016-2019). De resolutie is 25 cm en daarmee zijn de beelden zeer geschikt voor het identificeren van (bepaalde typen van) archeologische fenomenen en complextypen. Ook de contouren van proefsleuven die zijn gegraven tijdens recentelijk uitgevoerd archeologisch onderzoek, zijn herkenbaar op digitale PDOK-luchtfoto's (afb. 5.1).

Archeologische instanties en bedrijven gebruiken de PDOK-viewer standaard voor het raadplegen van luchtfoto's als bron van bureauonderzoek dat wordt uitgevoerd in het kader van een beoogde ruimtelijk ontwikkeling.⁷⁴ Maar

⁷³ Website PDOK (www.pdok.nl), geraadpleegd in juli 2022. Van 2021 zijn geen luchtfoto's beschikbaar.

⁷⁴ Ghauharali 2007; Van der Vliet 2007; Janssen 2012; Verhoeven 2013.



Afb. 5.1 Voorbeeld van PDOK-luchtfoto uit 2018 met duidelijk zichtbaar de inmiddels gedichte proefsleuven ten oosten van de woonwijk Oosterveld van Norg (Drenthe) (bron: Publieke Dienstverlening Op de Kaart, <https://www.pdok.nl/viewer/>).

ook vrijwilligers in de archeologie hebben de weg naar digitale luchtfoto's allang gevonden, onder andere door gebruik te maken van de website van Google Earth. Via Google Earth kunnen onderzoekers op eenvoudige wijze toegang krijgen tot gedetailleerde satellietbeelden wereldwijd. Een belangrijke en eenvoudig te raadplegen bron zijn de satellietbeelden die de Nederlandse overheid aanbiedt via www.satellietdataportaal.nl.

5.3 Kwaliteitskenmerken

RGB-luchtfoto's en sensorbeelden zijn opgebouwd uit beeldpunten, ook wel pixels genoemd. Een pixel is het kleinste beeldelement in de opname en correspondeert meestal met één lichtgevoelige cel van de sensor. De afmeting van het grondoppervlak dat door een pixel wordt gedekt (aangeduid als pixelgrootte) is afhankelijk van het type sensor waarmee het beeld is gemaakt en de vlieghoogte op het moment van opname. De pixelgrootte kan variëren van 5 cm tot enkele meters. Bij normaal

gebruik van een beeld zijn de afzonderlijke pixels in de regel niet zichtbaar.⁷⁵ Deze worden pas zichtbaar bij sterke uitvergroting.

Wat bij analoge luchtfoto's wordt uitgedrukt in schaal, wordt bij digitaal beeldmateriaal uitgedrukt in raster- of grondresolutie (GSD of *ground sampling distance*). Deze grondresolutie wordt uitgedrukt in meters of centimeters (bijv. 1 m, 25 cm en 10 cm). Het aantal pixels, dat wil zeggen diodes op de sensor, en de pixelgrootte staan vast en bepalen de resolutie. Hoeveel detail een beeld bevat, wordt mede bepaald door de afstand tussen de sensor en bijvoorbeeld een object op het aardoppervlak. Een resolutie van 1 m betekent dat één pixel van de digitale opname een detail van het aardoppervlak weergeeft van 1 x 1 m, ongeacht hoe ver wordt ingezoomd of uitgezoomd op het beeld. Op een beeld met een resolutie van 25 cm is de grootte van een pixel op het aardoppervlak 25 x 25 cm. Een object van 1 x 1,5 m bestaat in dat geval uit 24 pixels. Op een beeld met een hogere resolutie van 10 cm heeft hetzelfde object 150 pixels. Met een resolutie van 5 cm is het aantal pixels nog hoger en kunnen meer details worden onderscheiden. Op basis van een

⁷⁵ Uitzondering zijn bijvoorbeeld thermische camera's die zelden een hogere resolutie hebben dan 640 x 512 pixels. Bij deze resolutie zijn de pixels wel zichtbaar.

Tabel 5.1 Overzicht van in hoofdstuk 5 besproken archeologische toepassingen van sensorbeelden in het zichtbare en niet-zichtbare spectrum, kwaliteitskenmerken en selectie van relevante publicaties

Periode	Beelden	Kwaliteitskenmerken	Toepassingen	Literatuur
2006-nu	verticale luchtfoto's in het zichtbare spectrum, na 2008 in kleur (RGB-beelden) vanuit vliegtuigen	grote variatie in grondresolutie, bijvoorbeeld 25 cm en 50 cm (veelal beschikbaar als <i>open source</i>); 25 cm is zeer geschikt voor prospectiedoelinden	divers, als bron van bureauonderzoek en nadere duiding van gegevens die zijn verzameld tijdens inventariserend veldonderzoek of een opgraving; opsporen van vindplaatsen in eigen streek door vrijwilligers in archeologie	divers, rapporten van archeologische bedrijven, universiteiten en overheden, ook presentaties en artikelen van vrijwilligers in de archeologie.
2006-nu	satellietbeelden in het zichtbare spectrum	bestrijken grote gebieden en bieden meer overzicht, maar misten eerst nog gewenste resolutie voor effectief gebruik bij archeologische prospectie; vanaf 2006 grote variatie in grondresolutie, bijvoorbeeld 50 cm, 1 m en 10 m (veelal beschikbaar als <i>open source</i>); 50 cm geschikt voor prospectiedoelinden	divers, als bron van bureau-onderzoek en nadere duiding van gegevens verzameld tijdens IVO of opgraven; opsporen van vindplaatsen in eigen streek door vrijwilligers in archeologie; casestudy Maredsous-Biert (B.)	divers, rapporten van archeologische bedrijven, ook presentaties en artikelen van amateurarcheologen en vrijwilligers
2010-nu	multispectrale beelden; <i>false color</i> -weergave van RGB- en infraroodbanden opgenomen met een multispectrale camera	resolutie 25 cm, na bewerking en optimalisatie contrasten geschikt voor het herkennen van <i>crop marks</i> en het vastleggen van archeologische verschijnselen	casestudy's Gennep-Genneperhuis, Groenlo-Franse schans	Van Doesburg & Müller 2011
2012-2017	radarbeelden	Synthetic Aperture Radarbeelden (SAR) in hoge resolutie	casestudy Nordfriesland-Pellworm (D.)	Gade, Kohlus & Kost 2017
2004- nu	oblique luchtfoto's in het zichtbare spectrum vanuit (zweef)vliegtuigen (RGB-beelden)	hoge resolutie luchtfoto's genomen tijdens extreem droge en hete zomers; zeer geschikt voor het herkennen van <i>crop marks</i> en het vastleggen van archeologische verschijnselen	casestudy's Vught-De Gement, Kloosterzande-Drogendijk, Lichtenvoorde-Het Harreveld en Ieper-Frezenberg (B.)	Theunissen, Müller & De Kraker 2011 Van Londen et al. 2019 Stichelbaut et al. 2017

Sensorbeelden die zijn gemaakt met behulp van een drone, zijn in dit overzicht buiten beschouwing gelaten en worden in hoofdstuk 8 besproken.

eenvoudige rekenformule (*rule of thumb*) kan rasterresolutie worden omgerekend naar (kaart) schaal: kaartschaal = rasterresolutie (in m) * 2 * 1000. Uitgaande van deze formule correspondeert bijvoorbeeld een grondresolutie van 1 m met schaal 1:2000 van analogo beeldmateriaal.⁷⁶ Digitale luchtfoto's en sensorbeelden worden gemaakt met behulp van sensoren bevestigd aan satellieten, vliegtuigen en drones.⁷⁷ In vergelijking met luchtfoto's vanuit vliegtuigen bestrijken satellietbeelden een groter gebied en bieden ze meer overzicht, maar in de beginjaren was er sprake van een ontoereikende resolutie om bruikbaar te zijn voor archeologische prospectie.⁷⁸ Daarbij verliep het verzenden van de data langzaam en bovendien was de opslagcapaciteit vaak ontoereikend voor de data-explosie die een hogere resolutie met zich meebracht. Vandaag de dag zijn die nadelen verdwenen. Waar vroeger de pixelgrootte van de beelden in de buurt van enkele kilometers lag, is de pixelgrootte van de gemiddelde satellietbeelden nu ongeveer 100 tot 250 m, terwijl de commercieel verkrijgbare satellietbeelden een pixelgrootte hebben van enkele decimeters, en

dus vergelijkbaar zijn met, of soms zelfs beter dan luchtfoto's. De hoogst beschikbare grondresolutie vanuit satellieten is 31 cm (Worldview III) en deze resolutie benadert de grondresolutie (25 cm of 10 cm) van beelden genomen vanuit vliegtuigen.

Wel is het zo dat de afstand tussen satelliet en het aardoppervlak beduidend groter is dan bij een bemand vliegtuig en dat de metingen door een veel dikkere laag atmosfeer moeten gaan (dat laatste is bij radar overigens geen probleem). Als gevolg daarvan biedt een 30 cm-luchtfoto meer detail dan een 30 cm-satellietbeeld. Daartegenover staat de grote dekking van satellietbeelden. Satellieten kennen namelijk geen beperking in de dekking en kunnen in principe de hele wereld in beeld brengen. Bepalend voor de frequentie (of 'temporele resolutie') van bruikbare beelden is hoe vaak de betreffende satelliet overkomt en of het op dat moment helder weer is (anders zie je op de satellietbeelden alleen wolken). Er zijn satellieten die dagelijks de hele aarde fotograferen, maar die beelden hebben een heel lage resolutie. Voor een satelliet met een enigszins

⁷⁶ <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/on-map-scale-and-raster-resolution/>.

⁷⁷ Voor kwaliteitskenmerken die specifiek van toepassing zijn op het gebruik van drones, zie paragraaf 8.3.

⁷⁸ Sœur 2006, 53.

bruikbare resolutie ligt de frequentie aanzienlijk lager. In de praktijk is een landsdekkende jaarlijkse update met een resolutie van 30 cm of 50 cm goed haalbaar.

5.4 Archeologische toepassingen

5.4.1 Digitale luchtfoto's in het zichtbare spectrum

Digitale luchtfoto's die tijdens de extreem droge en hete zomers van 2003 en 2018 zijn genomen vanuit kleine motor- en zweefvliegtuigen hebben (opnieuw) de ogen van archeologen geopend voor de grote waarde van luchtfoto's voor prospectieonderzoek ((afb. 5.2 en 5.3; tabel 5.1)). De foto's tonen talrijke verkleuringen (*crop marks*) als gevolg van door de droogte versterkte groeiverschillen van vegetatie en gewas, bijvoorbeeld gras of mais. Ze wijzen op de aanwezigheid van onbekende archeologische fenomenen in de ondiepe ondergrond, die bij eerder bureau- en/of veldonderzoek onopgemerkt zijn gebleven.⁷⁹ Ook de zomers van 2019 en 2020 waren veel droger en heter dan het jarenlange gemiddelde, waardoor ook luchtfoto's uit deze perioden zeer informatief en bruikbaar zijn voor het opsporen van archeologische vindplaatsen en het vastleggen van belangrijke kenmerken ervan (vorm, omvang, land-schappelijke context).

5.4.2 Digitale satellietbeelden in het zichtbare spectrum

Archeologische toepassingen van satellietbeelden gaan veel minder ver terug in de tijd dan van analoge (conventionele) luchtfoto's. Ook satellietbeelden van het aardoppervlak van Nederland worden inmiddels standaard gebruikt voor het identificeren en lokaliseren van archeologische vindplaatsen. Overeenkomstig onze opmerkingen over luchtfoto's zijn vooral beelden die zijn genomen tijdens de extreem droge zomers van 2018, 2019 en 2020 een goudmijn: op satellietbeelden van allerlei plekken in Nederland zijn *crop marks* in de vorm van cirkels en lijnen te zien die archeologische resten in de ondiepe ondergrond

verraden. Ook hier zijn de kleurverschillen het resultaat van verschillen in bodemvochtigheid en daarmee gewasgroei. Ze kunnen wijzen op greppels, grachten of muurresten aan of dicht onder het maaiveld. Een fraai voorbeeld uit de uitzonderlijk hete zomer van 2018 betreft een vol-tot laat-middeleeuws erf bij Holten in Overijssel.⁸⁰ Op het RGB-satellietbeeld van TripleSat van juli-augustus 2018 met een resolutie van 80 cm zijn een grote, afgerond vierkante structuur en daarbinnen een kleiner cirkelvormig element duidelijk zichtbaar als *crop marks* (afb. 5.4). Deze patronen wijzen op greppels en grachten in de ondergrond. In 1986 had hier al archeologisch onderzoek plaatsgevonden. Daarbij werden paalsporen, kuilen en greppels met middeleeuws aardewerk aangetroffen. De casestudy Maredsous-Biert (paragraaf 5.5) bevat een voorbeeld van het gebruik van satellietbeelden voor het opsporen en duiden van archeologische *soil marks*.

5.4.3 Sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum

Via websites te raadplegen remote sensing-beelden in het niet-zichtbare deel van het spectrum worden slechts incidenteel gebruikt voor archeologische prospectie in Nederland. Archeologische bedrijven, universiteiten of overheidsinstellingen maken in de regel geen gebruik van bestaande infrarood-, radar- of spectrale beelden voor het opsporen of nader in kaart brengen van archeologische vindplaatsen. Wel heeft de UvA, in de persoon van J. Waagen, in de afgelopen jaren specifiek voor archeologische doeleinden zelf sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum ingewonnen. Dat gebeurde met drones. Deze vorm van prospectie, drone remote sensing, wordt beschouwd als onderdeel van inventariserend veldonderzoek en wordt daarom afzonderlijk behandeld in hoofdstuk 8.

Infraroodbeelden

Jaarlijks worden op diverse tijdstippen van het jaar digitale luchtfoto's (orthofotomosaïeken) van Nederland gemaakt. In de PDOK-viewer worden die ook in een infraroodversie aangeboden. Evenals de RGB-beelden is de resolutie van de infraroodbeelden 25 cm. Daarmee zijn ze in potentie geschikt voor

⁷⁹ Van Londen *et al.* 2019.
⁸⁰ Het satellietbeeld van de middeleeuwse versterkte woonplaats in Holten is in 2022 opgenomen als *user story* op de website van de Netherlands Space Office (www.satellietdataportaal.nl) in de rubriek Lagen > User stories > Archeologische ontdekkingen.



Franse Schans leek zich af in het maisveld 25 augustus 2003 foto: Martin Grevers

Afb. 5.2 Luchtfoto van de Franse Schans uit de Tachtigjarige Oorlog bij Groenlo, genomen tijdens droge zomer van 2003. Vanuit de lucht tekenen de contouren van de schans zich duidelijk af in de vorm van verkleuringen in het gewas (crop marks) (foto: M. Grevers, bron: www.engelseschans.nl).

Droogte onthult contouren van middeleeuwse forten

MICHEL BRANDSMA

NOORDLAREN De aanhoudende droogte heeft archeologische sporen onthuld van een middeleeuws bolwerk bij Noordlaren.

De contouren van de burcht zijn te zien op recente luchtfoto's van Aërophoto Eelde. Ze worden zichtbaar doordat de historische grachten meer water vasthouden dan het kurkdroge land er omheen. Archeologe Diana Spijkhout noemt de luchtfoto's van grote waarde. „Ze behoren tot de mooiste die ik ooit heb gezien van zo'n bolwerk.”

Spijkhout promoveert aan de Rijksuniversiteit Groningen op haar onderzoek naar middeleeuwse kastelen in Noord-oost-Nederland. „Mensen denken bij kastelen aan een sprookjeskasteel van Disney, maar militaire verdedigingswerken uit de middeleeuwen noemen wij ook kastelen.”

Volgens de promovenda is het bolwerk samen met nog vier bolwerken omstreeks 1400 gebouwd door de bisschop van Utrecht, mogelijk op de fundamenten van een nog ouder kasteel. De bisschop was verwekt in een oorlog met Groningen en wilde de wegen naar de stad kunnen afsluiten. Naast het bolwerk bij Noordlaren legde hij een twee kilometer lange landweer aan, een verdedigingslijn van wallen en grachten die destijds de Blankenweerd werd genoemd.

Het bolwerk zelf telde drie wallen, twee grachten en een licht verhoogd middenterrein met daarop een toren. Naast het bolwerk liggen twee kleinere cirkels. „Dat zijn mogelijk kleinere bolwerken die bij het complex horen”, denkt Spijkhout. „Maar het kunnen ook prehistorische grafheuvels zijn.”

Dat laatste is niet ondenkbaar, want de omgeving van Noordlaren wordt al duizenden jaren bewoond. Er zijn spullen gevonden uit de steentijd, ijzertijd, bronstijd, Romeinse tijd en de middeleeuwen. Ook staat een kilometer verderop een hunebed. In de omgeving van hunebedden worden wel vaker grafheuvels aangetroffen.

Gaat Spijkhout het bolwerk bij Noordlaren nu te lijf met grondboor



In de cirkels zijn de contouren van de middeleeuwse verdedigingswerken goed te zien. Het bolwerk boven telde drie wallen, twee grachten en een licht verhoogd middenterrein met daarop een toren. In de twee cirkels onder kleinere bolwerken die mogelijk bij het complex horen. FOTO AEROPHOTO EELDE

'Mooiste foto die ik ooit heb gezien'

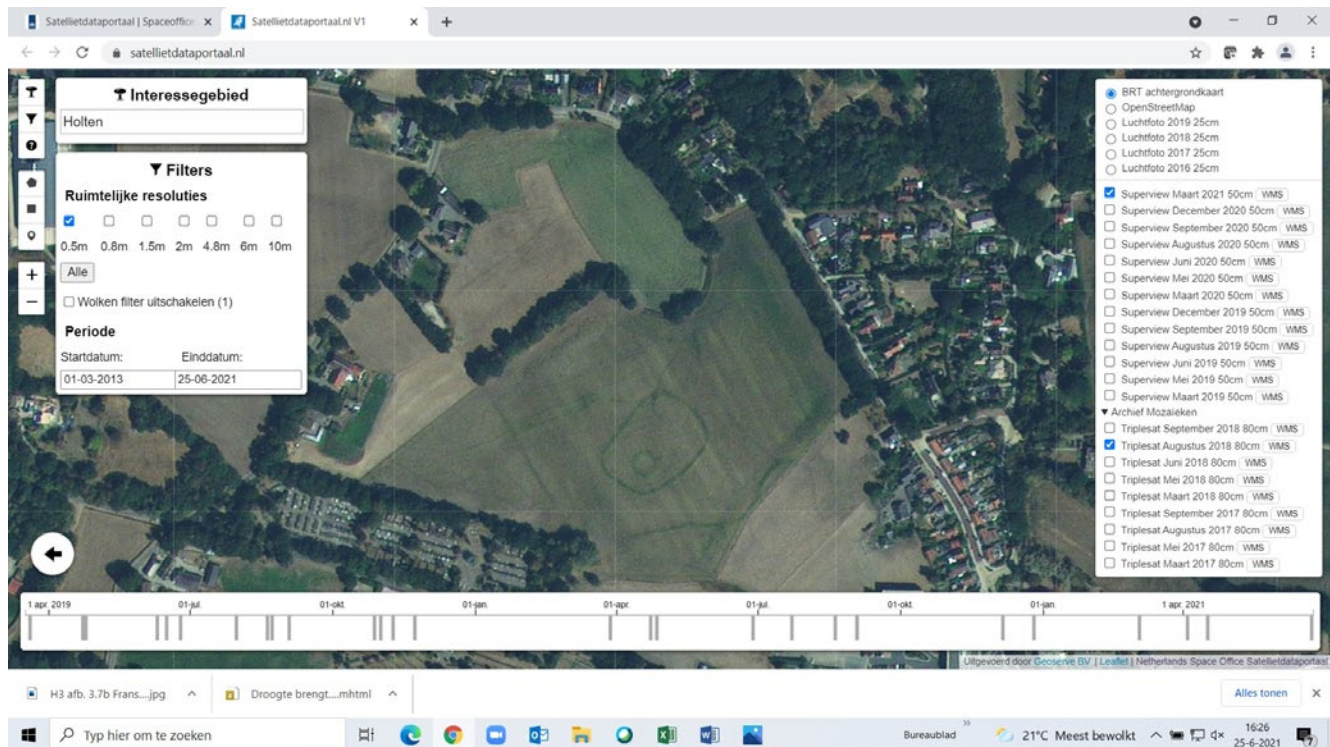
Het bolwerk van Noordlaren



Klein Stonehenge

De aanhoudende droogte heeft overal in Europa verrassende sporen in het landschap onthuld. De meest spraakmakende vondst is die van een 'Klein Stonehenge' in Ierland. Een amateur-archeoloog ontdekte het 5000 jaar oude bouwwerk toen hij zijn drone opliet boven Brú na Bóinne, een archeologische vindplaats in de buurt van Dublin. In Nederland zien boeren tot hun verrassing oude akkerranden terugkeren die vijftig jaar geleden verdwenen door de ruilverkaveling. Ook de contouren van oude loopgraven uit verschillende oorlogen worden plotseling weer zichtbaar, met als voormalige rivierbeddingen.

Afb. 5.3 Het Dagblad van het Noorden van 6 augustus 2018 kopte over de ontdekking van middeleeuwse verdedigingswerken bij het Groningse Noordlaren dankzij de droge zomer.



Afb. 5.4 Uitsnede uit een satellietbeeld uit de zomer van 2018 van een versterkte woonplaats uit de elfde en/of twaalfde eeuw bij Holten in de provincie Overijssel (bron: www.satellietdataportaal.nl).

archeologisch gebruik en het identificeren van archeologische fenomenen aan de hand van kenmerken van de gezondheidstoestand van de vegetatie (*crop marks*). Toepassingen van landsdekkende infraroodbeelden in de Nederlandse archeologie zijn voornamelijk schaars.

Multispectrale beelden

Buiten Nederland hebben multispectrale opnames zich al meermaals bewezen als waardevolle toepassing van archeologisch onderzoek.⁸¹ In Nederland zijn toepassingen in archeologische prospectie echter op één hand te tellen. In het kader van een onderzoek naar de circumvallatielinie van Gennep (Limburg) zijn voor zes deelgebieden multispectrale beelden met een resolutie van 25 cm bekeken.⁸² Voor de analyse van de beelden zijn voor ieder perceel afzonderlijk de contrasten geoptimaliseerd, met verschillende methoden. Vervolgens is gekeken of groeiverschillen in vegetatie in de beelden zichtbaar zijn en of die wijzen op grachten, wallen of kampementen in de ondergrond. Deze structuren kunnen behoren tot de Staats-Spaanse linie in de Tachtigjarige Oorlog. Een eenvoudige perceelsgebonden contrast-optimalisatie laat in een van de deelgebieden een duidelijke driehoekige vorm in de vegetatie zien. Ook in andere deelgebieden kwamen structuren aan het licht, waaronder opnieuw een

sterstructuur en een lijnenpatroon (zie casestudy Gennep-Gennepershuis, paragraaf 7.4). Een ander voorbeeld van gebruik van multispectrale beelden is de Friese Schans in Groenlo (zie casestudy paragraaf 5.6).

Hyperspectrale beelden

De toepassing van hyperspectrale gegevens voor archeologische doeleinden wordt bemoeilijkt doordat voor de analyse van de gegevens (ingewikkelde) bewerkingen moeten worden uitgevoerd. De specialistische kennis hiervoor is bij archeologen vaak niet aanwezig. Dat verklaart vermoedelijk het ontbreken van Nederlandse voorbeelden van het gebruik van hyperspectrale gegevens, terwijl deze wel een hoge potentie hebben.⁸³

Radarbeelden

Radar wordt in Nederland niet voor archeologische prospectie gebruikt. Dat neemt niet weg dat in specifieke landschappelijke situaties, zoals intergetijdenplaten, deze techniek bruikbaar kan zijn voor het opsporen van archeologie (zie casestudy Nordfriesland-Pellworm in het Duitse Waddengebied, paragraaf 5.6).⁸⁴ Met radaropnames zijn ook zeer nauwkeurige digitale hoogtemodellen te maken die onder meer bruikbaar zijn voor het monitoren van vindplaatsen en monumenten.

⁸¹ Zie bijvoorbeeld Beck 2011.
⁸² Van Doesburg & Müller 2011.
⁸³ Beck 2011; Doneus et al. 2014.
⁸⁴ Gade, Kohlus & Kost 2017.

5.5 Casestudy's luchtfoto's en sensorbeelden in het zichtbare spectrum

Kloosterzande-Drogendijk. Cirkels in het Zeeuwse land

L. Theunissen (RCE)

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Zeeland
 Gemeente: Hulst
 Plaats: Kloosterzande
 Toponiem: Drogendijk
 RD-coördinaten: 59.000/377.750
 ARCHIS-onderzoekmelding: 31737 (zaak-identificatienummer 2220374100)
 Grondgebruik: bouwland met gewas (tarwe)

Kernpublicatie

Theunissen, Müller & De Kraker 2011

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: jonge zee-inbraken
 Landschapszone: kwelders
 Het gebied rond de Drogendijk is een ruim 1 km brede zandbaan die min of meer noord-zuid is georiënteerd. Dit zandpakket, met een dikte van ca. 20 m, is een opgevlude getijdenarm, die rond 750-800 n.Chr. actief was.

Geraadpleegde beelden

Luchtfoto's
 Opnamejaar: 2004, 2005, 2008 en 2009
 Opnameseizoen: zomer (juli en augustus)
 Type opname: oblique vanuit deltavlieger en Mistral (eenmotorig vliegtuig)
 In de zomers van 2004, 2005, 2008 en 2009 nam A.M.J. de Kraker verschillende foto's van het gebied ter weerszijden van de Drogendijk. Daar was een brede variatie aan verkleuringen in het gras en de tarwe te zien, waaronder een paar opvallende.

Wat zien we?

In de gras- en graanpercelen zijn verschillende typen donkergroene verkleuringen te zien (afb. 5.5 tot en met afb. 5.7):

a rechthoekige patronen van 6 tot 8 m brede banen die parallel en haaks op elkaar staan;
 b meanderende, vertakkende patronen van ca. 4 tot 40-50 m breed;
 c verschillende ronde en een paar vierkante lijnvormige elementen in ca. 1 m brede banen; de omvang van deze structuren is 10 m.
 Op de foto's van 2004, 2005 en 2008 zijn 28 structuren van de c-categorie herkend. Een jaar later, in de zomer van 2009, kwamen daar nog elf bij.

Wat is de archeologische interpretatie?

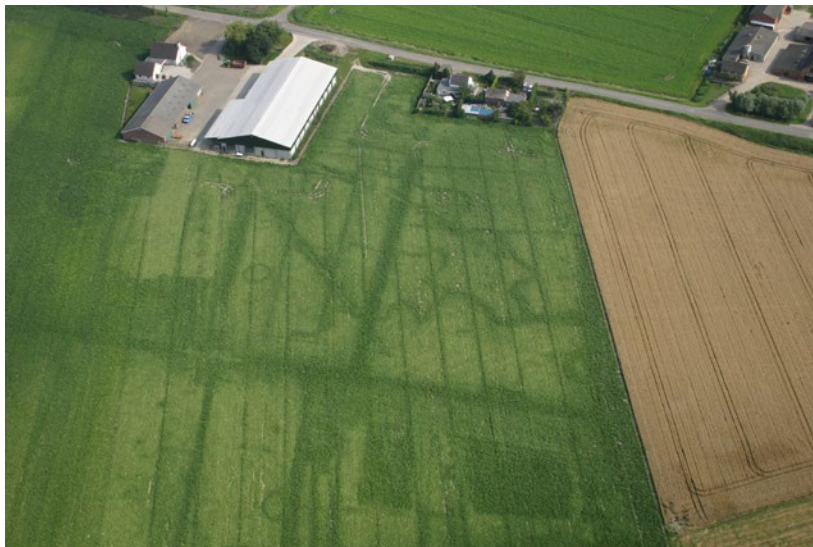
De aandacht ging uit naar c-categorie: de ronde en vierkante structuren die tussen de opgevlude verkavelingsgreppels (a) en de natuurlijke krekken (b) zijn gesitueerd.

In eerste instantie, direct na de ontdekking van de eerste cirkelvormige structuren in 2004, werd verondersteld dat de greppelstructuren overblijfselen zouden kunnen zijn van grafmonumenten uit de late prehistorie, naar analogie van de vele cirkels die in het aangrenzende Oost- en West-Vlaanderen zijn herkend en onderzocht. Ondanks de gelijkenis in vorm was er een duidelijk verschil in de ondergrond. De Zeeuwse cirkels zijn gesitueerd in jongere, mariene afzettingen, terwijl de Vlaamse exemplaren zijn ingegraven in pleistocene gronden. Bovendien zijn de Zeeuwse cirkels een stuk kleiner in omvang, ca. 10 m tegenover 20-35 m voor die in Vlaanderen.

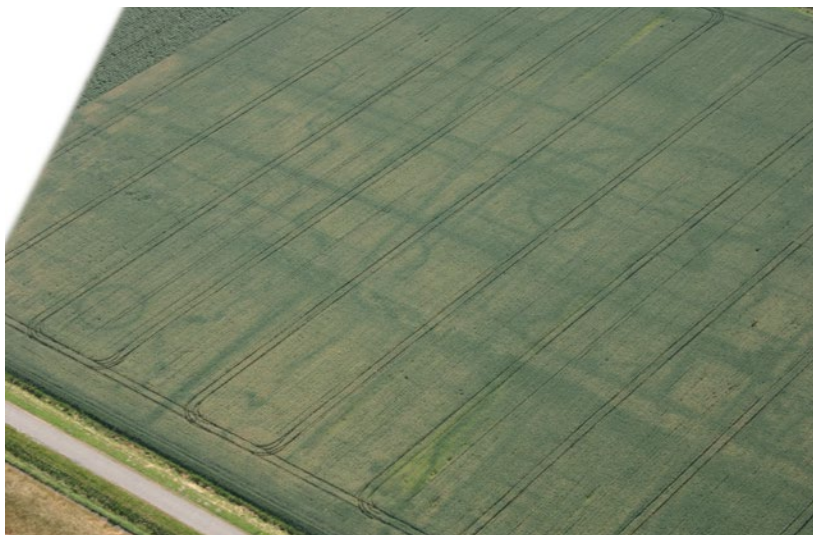
Tijdens het beoordelen en het georefereren van de luchtfoto's zijn de structuren aangemerkt in vijf zekerheidsklassen, variërend van klasse 1 (onzeker) tot klasse 5 (zeer zeker).

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

De RCE heeft begin 2009 een veldtoets uitgevoerd, waarbij onder andere zes gerichte proefsleuven zijn gegraven over dertien gewasverkleuringen om deze te toetsen (afb. 5.8 tot en met afb. 5.10). Zes daarvan – vijf cirkelvormige en een vierkante – bleken te zijn veroorzaakt door greppels die duidelijk door mensenhand zijn gegraven. De andere structuren waren onder meer natuurlijke opvullingen, banen met veel ijzeroxide en schelpfragmenten. De sporen van de antropogene structuren tekenden zich scherp af, ondanks het geringe kleurverschil tussen spoorvulling en natuurlijke ondergrond. De vullingen zijn opvallend homogeen en schoon (afb. 5.10).



Afb. 5.5 De gewasverkleuringen in het perceel ten noorden van de Drogendijk bij Kloosterzande op 30 juli 2004 (foto: A.M.J. de Kraker).



Afb. 5.6 De gewasverkleuringen in het perceel ten zuiden van de Drogendijk bij Kloosterzande, vastgelegd op 28 juni 2005 (bron: Theunissen, Müller & De Kraker 2011, afb. 4).



Afb. 5.7 Gewasverkleuringen in een perceel ten oosten van de Noordstraat bij Kloosterzande, gefotografeerd op 4 juli 2009 (foto: A.M.J. de Kraker).

Op basis van een combinatie van luminescentie-dateringen en (schaars) vondstmateriaal uit oversnijdende en geassocieerde sporen mag worden geconcludeerd dat de greppelstructuren dateren uit de late middeleeuwen, en wel in periode van de twaalfde-veertiende eeuw. Waarschijnlijk gaat het om relictten van een tijdelijke, eenmalige opslag op het land van materiaal (bijvoorbeeld rijshout) in schelven, ruiters, oppers of iets dergelijks.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Niet alle gewasverkleuringen bleken antropogene relictten te zijn. Ook natuurlijke verschijnselen kunnen zich zeer scherp (als zekere structuur, klasse 4) op een luchtfoto aftekenen.
- Samenwerking met een historisch-geograaf en het gebruik van veel historisch kaartmateriaal is vruchtbaar.
- Het onderzoek heeft informatie opgeleverd over de exploitatie in de late middeleeuwen van onbedijkte landschappen. Over dit soort overblijfselen van een extensief gebruik van nog ongecultiveerde, 'marginale' gronden, is nog weinig bekend. Een van de redenen is dat dit gebruik archeologisch gezien weinig sporen nalaat. Deze casus laat zien dat luchtfotografische survey, gevolgd door een veldtoets, belangrijke aanknopingspunten oplevert over activiteiten die zich buiten de bewoonde wereld hebben afgespeeld.



Afb. 5.8 Ronde structuur 6 komt bij de aanleg van het vlak tevoorschijn (bron: Theunissen, Müller & De Kraker 2011, afb. 23c).



Afb. 5.9 Een vierkante structuur wordt vrijgelegd.



Afb. 5.10 De greppelvulling van de vierkante structuur tekent zich scherp af, in een hoekige vorm (bron: Theunissen, Müller & De Kraker 2011, afb. 33).

Diepenheim-Den Haller. Mogelijke voorganger van het huidige kasteel van Diepenheim

B. Terlouw (amateurhistoricus en -archeoloog)

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Overijssel
 Gemeente: Diepenheim
 Plaats: Diepenheim
 Toponiem: Den Haller
 RD-coördinaten: 236.087/468.109
 Grondgebruik: akkerland, bebouwd

Kernpublicaties

K. de Rooij 2020, Spiekhout 2020

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische
 Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: noordelijk zandgebied
 Landschapszone: dekzandvlakte
 Het dekzandlandschap ten zuidoosten van
 Diepenheim is doorsneden door beekdalen, op
 de hogere delen liggen essen. De onderzoeks-

locatie is gelegen in een beekerdgrond van fijn,
 lemig zand.

Geraadpleegde beelden

Satellietbeelden
 Opnamejaar: 2018
 Opnameseizoen: zomer (augustus)
 Type opname: satellietopname Google Earth
 Satellietdataportal.nl V1 (filtering op
 2 augustus 2018)

Wat zien we?

Op het satellietbeeld uit augustus 2018 is in het
 weiland ten westen van de boerderij aan de
 Nijhofweg 1 te Diepenheim een deel van een
 rechthoekig, door drie donkergroene banen
 omgeven terrein te zien (afb. 5.11). De banen
 liggen parallel aan elkaar en hebben aan de
 westzijde afgeronde hoeken. Aan de oostzijde
 verdwijnen de banen onder de bestaande
 bebouwing. Ook op het erf van de boerderij
 lijken er zich structuren af te tekenen.
 Daaromheen bevindt zich een zone met verschil-
 lende lineaire donkergroene banen met verschil-
 lende oriëntaties. Sommige hiervan volgen de
 contouren van de drie parallelle banen, terwijl
 andere daar haaks op staan. De banen omsluiten
 verschillende rechthoekige terreintjes en lijken



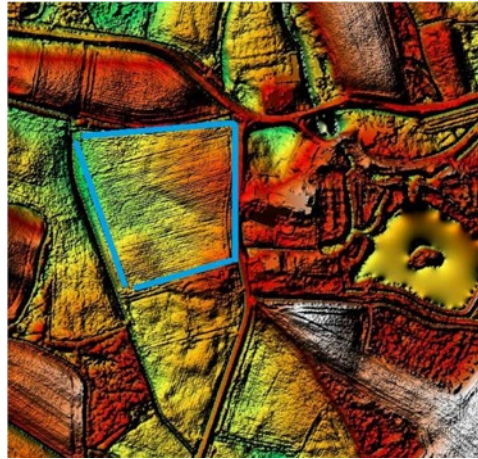
Afb. 5.11 Uitsnede uit een satellietbeeld van Den Haller uit augustus 2018 (bron: Google Earth).

elkaar niet te oversnijden, hetgeen op gelijktijdigheid en gelijke ouderdom wijst. Twee van de parallelle banen zijn ook te zien op het AHN2 (afb. 5.12).

Op de AHN-beelden zijn tevens twee parallelle gebogen structuren ten westen van de bebouwing te zien. Ten oosten van het erf bevinden zich in een bosperceeltje twee parallelle verhogingen (wallen?), die aan de buitenkant zijn begrensd door een laagte (gracht?). Deze fenomenen sluiten niet mooi aan op die in het gebied ten westen van het erf, maar zouden toch wel tot hetzelfde complex kunnen behoren.

Wat is de archeologische interpretatie?

Vermoed wordt dat dit complex van parallelle banden de resten zijn van een middeleeuws kasteel. Het gaat mogelijk om een voorganger van het huidige kasteel van Diepenheim. Het geslacht Diepenheim wordt voor het eerst vermeld in 1105. In dat jaar was Bernardus van Diepenheim een van de eregasten bij de wijding van de herbouwde St. Walburgskerk in Zutphen. Volgens de bronnen bezat deze Bernardus een versterking. In een oorkonde uit 1169 wordt Wolbertus van Diepenheim genoemd die 'hield hoff op syn Castrum benevens de Watermolen liggende'. Het huis wordt opnieuw vermeld in 1177, toen het werd verwoest door troepen van de bisschop van Utrecht. In 1180 werd op een andere plek een nieuw kasteel gebouwd. Dit is de locatie van het huidige Huis Diepenheim aan de Lochemseweg in Diepenheim.



Afb. 5.12 Uitsnede uit het AHN2 van het complex Den Haller (bron: Actueel Hoogtebestand Nederland).

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

In het gebied Den Haller hebben de AWN-afdelingen 18 en 19 en Historische Vereniging Old Deep'n op 6 oktober 2018 een veldkartering uitgevoerd, in combinatie met metaaldetectie. Het onderzoek vond plaats kort nadat het weiland was omgezet in akkerland. In totaal is ca. 20.000 m² akker verkend. Op lijn hebben vijftien personen het terrein in ruim drie uur op het oog en met metaaldetectoren afgezocht, waarbij zij elke vondst ter plaatse in een plastic zakje hebben gedeponerd (afb. 5.13). Zo ontstond er een beeld van bepaalde concentraties. De vondsten zijn daarna



Afb. 5.13 Op lijn: veldkartering en metaaldetectie op het terrein Den Haller door leden van de AWN-afdelingen 18 en 19 en Historische Vereniging Old Deep'n (foto: K. de Rooij).

verzameld per vondstconcentratie (afb. 5.14: gele, rode en bruine cirkels) of terreindeel (afb. 5.14: roze en zwarte zones). Een klein deel van het terrein is niet afgezocht (blauwe zone). Uit de concentratie in het midden van het omgrachte terrein (afb. 5.14: gele cirkel) komt een klein aantal scherven middeleeuws aardewerk, waaronder handgevormd kogelpot-aardewerk, steengoed zonder oppervlakbehandeling uit Siegburg en grijs- en roodbakend aardewerk (afb. 5.15). Verder leverde deze concentratie enkele objecten van ijzer en koperlegeringen, ijzerslakken, tegelfragmenten, stukken onbewerkt natuur- en vuursteen, drie vuurstenen artefacten en een groot aantal scherven postmiddeleeuws aardewerk en bouw materiaal op. Beide andere vondstconcentraties (afb. 5.14: rode en bruine cirkel) leverden grote hoeveelheden ijzerslakken (waaronder vloeislakken) en ijzeroer op (afb. 5.16). Uit de overige delen van de percelen kwamen aanzienlijke aantallen scherven handgevormd en draaischijfaardewerk, stukken natuur- en vuursteen, ijzerslakken, objecten van ijzer en koperlegeringen, delen van kleipijpen, stukken glaswerk en fragmenten bouw materiaal. Het materiaal kent een ruime datering van mogelijk



Afb. 5.14 Ruimtelijke verspreiding van de verschillende vondstgroepen op het terrein Den Haller (bron: K. de Rooij 2020).

ijzertijd tot nieuwste tijd. De meeste vondsten dateren uit de achttiende tot twintigste eeuw en lijken samen te hangen met de bemesting van de akkers.

Op grond van de waargenomen sporen/structuren, en de samenstelling en ruimtelijke verspreiding van het vondstmateriaal kan worden geconcludeerd dat het terrein vanaf de



Afb. 5.15 De veldkartering op het perceel van het omgrachte terrein leverde een grote hoeveelheid roodbakend aardewerk en fragmenten aan dakpannen op (foto: K. de Rooij).



Afb. 5.16 Op het zuidelijke perceel troffen de AWN-leden een flinke hoeveelheid, naar schatting ruim 30 kg, ijzeroerbrokken aan (foto: K. de Rooij).

prehistorie is gebruikt. Een deel van de vondsten hangt waarschijnlijk samen met de waargenomen grachten. Dit geldt zeker voor de vondsten op het binnenterrein en mogelijk ook voor de concentratie ijzerslakken en ijzeroer daarbuiten. Deze laatste vondsten wijzen op ijzerproductie. Deze kan echter ook jonger of ouder zijn dan de sporen/structuren op de satellietbeelden. Het overgrote deel van de vondsten houdt verband met bemesting in de laatste paar eeuwen.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Het combineren van de droogtebeelden met *crop marks*, de AHN-beelden en historische gegevens is van groot belang. Hierdoor ontstaat een completer beeld van wat er zich

mogelijk in de bodem bevindt.

- Daarnaast is het uitvoeren van een veldtoets cruciaal. In dit geval is gekozen voor een combinatie van metaaldetectie en veldkartering. Het is belangrijk dat hiervoor voldoende mensen worden gemobiliseerd en dat deze goed worden geïnstrueerd. Verder is een goed plan, waarin beloopstrategie en verzamelwijze duidelijk uiteen worden gezet, van groot belang. Wel moet er ruimte zijn om het plan aan te passen. Goed overleg met de terreineigenaar is van belang.
- Bij de uitwerking is voldoende materiaal-kennis onontbeerlijk. Op basis hiervan kunnen verspreidingskaarten worden gemaakt en kan inzicht worden verkregen in de datering en fasering van het complex.

Maredsous-Biert. Vlekken in akkerland ten zuiden van Maredsous

*K. Deforce (Koninklijk Belgisch Instituut voor
Natuurwetenschappen en Universiteit Gent)*

Administratieve gegevens

Land: België
 Provincie: Namen
 Gemeente: Anhée
 Plaats: Maredsous
 Toponiem: Biert
 Coördinaten: 175.668/106.788 (Lambert72);
 latitude 50.271567 N, longitude 4.728808 E
 (decimale graden)
 ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
 Grondgebruik: bouwland

Kernpublicaties

Deforce, Groenewoudt & Haneca 2021; Hardy &
 Dufey 2015

Overige bronnen en literatuur

Google Maps
 Google Earth
 Castiau *et al.* 2011; Goblet D'Alviella 1930

Landschappelijke ligging

Landschap volgens de Waalse landschapsatlas
 (Castiau *et al.* 2011)
 Hoofdlandschap: Condroz (leemplateau)

Landschapszone: Vallei van de Molinee
 Golvend plateau van kalksteen- en zandsteen-
 lagen dat door erosie zijn reliëf heeft gekregen.
 Hogere delen bestaan uit harde zandsteen, afge-
 wisseld met zachtere kalksteendepressies.

Geraadpleegde beelden

Satellietbeelden en luchtfoto's op Google Maps
 en Google Earth
 Opnamejaar: 2021
 Opnameseizoen: voorjaar

Wat zien we?

In de akkerlandpercelen ten zuiden van
 Maredsous zijn vele zwarte cirkelvormige of
 elliptische vlekken te zien, van ca. 15 tot 40 m in
 doorsnede (afb. 5.17 en afb. 5.18). Deze vlekken
 zijn *soil marks*. Ze liggen op een onderlinge
 afstand van ca. 50 m en vormen zo uitgestrekte
 patronen van honderden donkere stippen in het
 landschap. Ook verder naar het westen, bijvoor-
 beeld ten noorden van Florennes, komen deze
 vlekken talrijk voor op akkerpercelen.

Wat is de archeologische interpretatie?

Uit onderzoek naar vergelijkbare verschijnselen
 elders is bekend dat het hier gaat om resten van
 houtskoolmeilers. Dat zijn plaatsen waar in het
 verleden houtskool is geproduceerd. Tot
 ca. 1300 n.Chr. gebeurde dit in kleine kuilen,
 nadien in grote koepelvormige stapels hout die
 werden afgedekt met aarde (afb. 5.19). De



Afb. 5.17 Satellietbeeld van de regio ten zuiden van Maredsous (bron: Google Earth).



Afb. 5.18 Satellietbeeld, ingezoomd op akkerland (bron: Google Earth).



Afb. 5.19 Houtskoolproductie in een koepelvormige meiler, Bos van Anlier, Ardennen (foto: Goblet d'Alviella 1930).

geproduceerde houtskool was voornamelijk bestemd als brandstof voor ijzerproductie. De donkere vlekken die we hier zien, zijn restanten van houtskoolproductie in koepelvormige meilers. Door herhaald ploegen is het

houtskoolresidu van de oude meilers in de bouwvoor opgenomen en zo verspreid geraakt. De hier zichtbare meilerresten dateren heel waarschijnlijk uit de periode tussen het einde van de veertiende en het begin van de negen-



Afb. 5.20 Coupe door de resten van een houtskoolmeiler in Bois de Lauzelle bij Louvain-la-Neuve, België (foto: J. Dufey, 2012).



Afb. 5.21 Terreinfooto van enkele meilers uit Biert (foto: J. Dufey, 2012).

tiende eeuw, toen Wallonië een belangrijk productiecentrum van ijzer was, maar in de hoogovens nog geen steenkool of cokes werd gebruikt. In deze periode, met een hoogtepunt tussen 1750 en 1830 n.Chr., werd in de regio op heel grote schaal houtskool geproduceerd. De meilers waren oorspronkelijk in het bos gesitueerd, maar dat is ondertussen omgezet naar akkerland. Ook in de bossen in de omgeving zijn nog resten van houtskoolmeilers aanwezig. Deze zijn niet zichtbaar op satellietbeelden of luchtfoto's. Ze zijn echter wel goed zichtbaar als kleine lage heuvels op LiDAR-beelden.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

In Maredsous is geen veldtoets uitgevoerd, maar uit opgravingen in Louvain-la-Neuve, Zoersel en het Zoniënwoud (België) en op de Veluwe (Nederland) is bekend hoe deze meilers er archeologisch uitzien. Ze zijn herkenbaar als een houtskoolrijke laag van ca. 10 tot 50 cm diep, net onder het oppervlak (afb. 5.20). Naast houtskool bevatten ze gewoonlijk geen archeologisch materiaal.

Niet alleen op satellietbeelden en luchtfoto's, maar ook op het terrein zijn de meilers zichtbaar als donkere vlekken aan het oppervlak in geploegde akkers waar nog geen gewassen op staan (afb. 5.21).

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Houtskoolmeilers komen vaak voor in 'marginale' zones, gebieden ver van de bewoning verwijderd, omdat het houtskool in bosgebieden werd geproduceerd. De aanwezigheid van dit soort donkere stippen in het landschap geven dan ook voormalig beboste gebieden aan.
- Door houtskool in deze meilers te dateren met de ^{14}C -methode kan worden bepaald wanneer op die locatie bos aanwezig was.
- Met anthracologisch onderzoek van houtskool uit deze meilers is de samenstelling van het voormalige bos te achterhalen en eventueel ook het gebruikte bosbeheersysteem (bijvoorbeeld hakhoutbeheer).

Ieper-Frezenberg.

'Het Westelijke Front' in België (1914-1918)

B. Stichelbaut en J. Bourgeois (Universiteit Gent, vakgroep archeologie)

Administratieve gegevens

Land: België

Provincie: West-Vlaanderen

Gemeente: Zonnebeke

Plaats: Ieper

Toponiem: Frezenberg

Kaartblad 1:25.000: niet van toepassing

Coördinaten: 224.83/136.006 (Lambert72);

latitude 50.520948 N, longitude 2.570364 E (decimale graden)

ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing

Grondgebruik: bouwland met gewas

Kernpublicatie

Stichelbaut *et al.* 2017

Overige literatuur

Stichelbaut 2018; Stichelbaut, Chielens &

Bourgeois 2019

Landschappelijke ligging

Archeologische Landschappenkaart van

Nederland: niet van toepassing

Geopunt Vlaanderen: Polder Leie-Interfluvium,

zandleem- en leemstreek, zuidelijke IJzervlakte en het land van Ieper

Een licht golvend, open landschap van natte zandleembodems, veelal in gebruik als gras- en akkerland.

Geraadpleegde opnames

Historische luchtfoto's

Historische luchtfoto uit de Eerste Wereldoorlog (opnamejaren 1915-1918). Dergelijke beelden zijn beschikbaar voor het volledige westelijke gedeelte van België. Doordat de beelden gelijktijdig zijn met de periode van de Eerste Wereldoorlog, zijn ze een uitstekende bron voor twintigste-eeuwse conflictarcheologie. Er bestaan nog ruim een half miljoen historische luchtfoto's van het westelijke front in België en Frankrijk. Ze worden bewaard in België, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, de Verenigde Staten en Australië.

Luchtfoto's (digitaal, kleur)

Opnamejaar: 2015

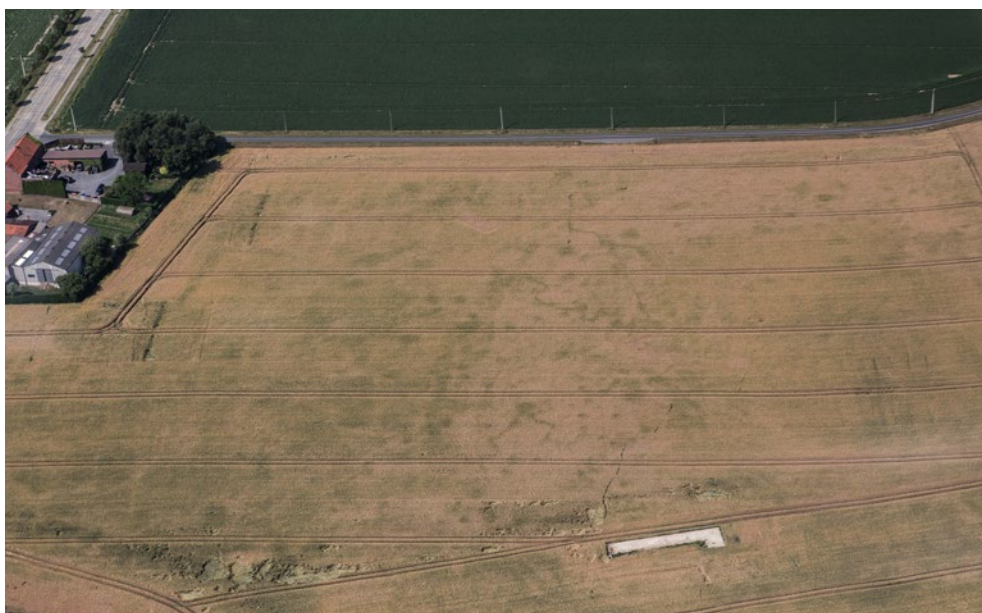
Opnameseizoen: zomer

Type opname: oblique luchtopnames vanuit een Morane sportvliegtuig, speciaal gemaakt voor archeologische prospectiedoeleinden

Wat zien we?

Een schuine (oblique) luchtfoto, genomen in juli 2015 nabij Frezenberg in de gemeente

Zonnebeke, toont een veld tussen de Ieperstraat



Afb. 5.22 Oblique luchtfoto van het perceel aan de Felix Nadarstraat met de *crop marks*, juli 2015 (foto: B. Stichelbaut, UGent).

en de Felix Nadarstraat – toevallig is de straat genoemd naar de luchtfotopionier die in 1864 een ballonvlucht maakte tussen Brussel en Ieper – met daarop sterk uitgedroogde gewassen (afb. 5.22). Op de foto is een bijzondere reeks positieve en negatieve *crop marks* waargenomen die te verbinden zijn aan de Eerste Wereldoorlog. Op de voorgrond van de oblique foto zien we de restanten van een betonnen bunker die als relict in het landschap bewaard is gebleven. In de sterk uitgedroogde gewassen net achter deze bunker zijn tal van positieve *crop marks* te zien (afb. 5.22). Het gaat enerzijds om duidelijk afleesbare sporen van gevechtloopgraven met typische vierkante traversen en verbindingsloopgraven in de kenmerkende zigzagvorm. Tientallen donkergroene vlekken komen wellicht overeen met diepe en ondiepe granaatrechters die het gevolg zijn van intensieve artilleriebeschietingen in deze regio. Op de achtergrond is een rechthoekige negatieve *crop mark* te zien van een begraven bunker, waarboven de gewassen veel minder sterk groeien.

Wat is de archeologische interpretatie?

De interpretatie van deze structuren is mogelijk dankzij de uitgebreide collectie van historische luchtfoto's die tijdens de Eerste Wereldoorlog zijn genomen.

Met ArcMap 10 werden de schuine luchtfoto's 'rechtgetrokken' om de sporen in kaart te kunnen brengen. Vergelijking van de recente foto met een luchtbeeld van 24 september 1918 bevestigt het vermoeden dat de gewasmarkeringen hun oorsprong vinden in de Eerste Wereldoorlog. Een gedetailleerde interpretatie van het beeld en nauwkeurige vergelijking met historische luchtfoto's onthulde nog twee andere begraven bunkers (afb. 5.23).

De vergelijking toont tevens dat niet alle loopgraven en granaatrechters op de historische luchtfoto ook zichtbaar zijn geworden als gewasmarkering. De vorming van *crop marks* is immers afhankelijk van een samenloop van omstandigheden: de droogte, het bodemtype én een luchtfotograaf die de vindplaatsen opmerkt en een foto neemt van de sporen, die soms maar enkele dagen zichtbaar zijn.

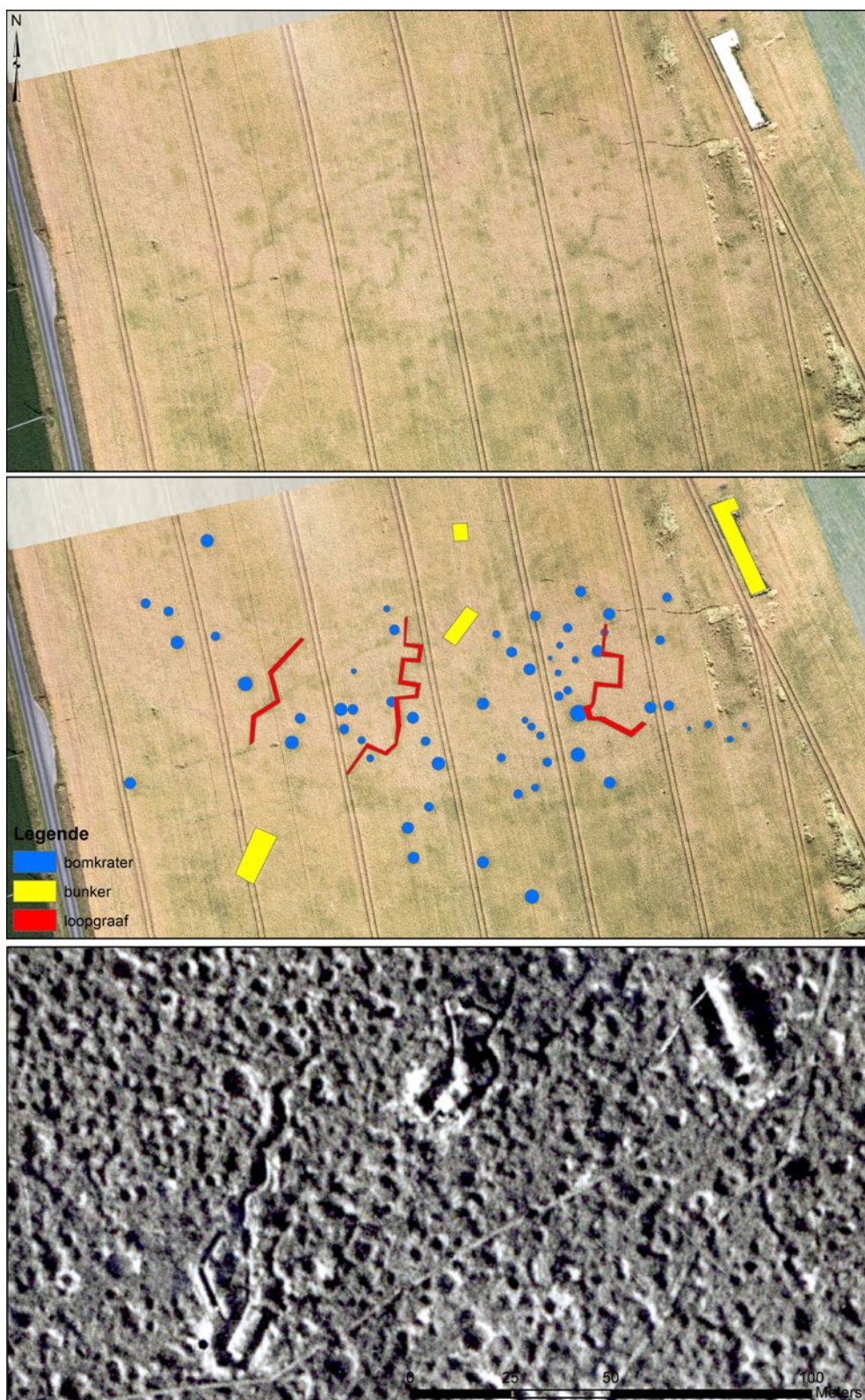
Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Er is geen validerend veldonderzoek uitgevoerd. Wel leverde de nauwkeurige vergelijking tussen

enerzijds de recente oblique luchtfoto met *crop marks* en anderzijds historische luchtfoto's uit de Eerste Wereldoorlog een interpretatie en identificatie van de waargenomen structuren op. Deze casestudy toont een zeldzaam beeld, waarbij *crop marks* worden waargenomen van sporen die afkomstig zijn uit de Eerste Wereldoorlog. Dit is bijzonder omdat het zware gronden betreft die een relatief lange periode van droogte nodig hebben voordat ze duidelijke *crop marks* vertonen. In Vlaanderen geven archeologen die onderzoek doen naar de Eerste Wereldoorlog, daarom meestal de voorkeur aan historische luchtfoto's boven recente luchtfoto's. Vrijwel overal is het zo dat op plekken waar er op de historische luchtfoto's uit de periode van 1914-1918 sporen van loopgraven, versterkingen of bunkers zichtbaar zijn, ze ook in het ondergrondse bodemarchief worden aangetroffen. In de regio van het front worden, voorafgaand aan bodemingrepen, bureauonderzoeken uitgevoerd waarop enkel en alleen op basis van de analyse van historische luchtfoto's een inschatting wordt gemaakt of er al dan niet materiële relicten van de oorlog worden aangetroffen.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Voor grote delen van West-Europa zijn er aanzienlijke archiefbronnen beschikbaar die tot stand gekomen zijn tijdens de Eerste en Tweede Wereldoorlog. Vandaag helpen ze om inzichten te krijgen in de mogelijk bewaarde materiële resten van die conflicten.
- De opbouw van een grote collectie historische luchtfoto's is van zeer groot belang. Eerder dan een sitegerichte aanpak (met hedendaagse remote sensing-beelden) proberen onderzoekers van de Universiteit Gent oorlogslandschappen in hun totaliteit te bestuderen aan de hand van historische luchtfoto's. Elke historische luchtfoto is slechts een klein stukje van een uitgebreide puzzel. Door honderden of zelfs duizenden van die historische luchtfoto's met elkaar te combineren kunnen we inzicht krijgen in de densiteit, diversiteit en verspreiding van oorlogsrelicten. Hoewel we deze aanpak vooral toespitsen op het oorlogslandschap van de Eerste Wereldoorlog, heeft deze aanpak evenveel potentieel voor het bestuderen van de Tweede Wereldoorlog in België, Nederland of elders in Europa.



Afb. 5.23 Combinatie van een gegeorectificeerde luchtfoto (boven), de interpretatie daarvan (midden) en een historische luchtfoto uit 1918 (onder) (bron: UGent, vakgroep archeologie, historische luchtfoto In Flanders Fields Museum).

5.6 Casestudy's sensorbeelden in het niet-zichtbare spectrum

Groenlo-Friese Schans. Sporen van circumvallatielinie uit 1627 *R. Emaus (Saxion Hogeschool)*

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Gelderland
 Gemeente: Oost Gelre
 Plaats: Groenlo
 Toponiem: Boerijendijk
 RD-coördinaten: 241.258/451.836
 ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
 Rijksmonumentnummer: 532275
 Grondgebruik: agrarisch, voornamelijk grasland

Bronnen en literatuur

Kaart van de circumvallatielinie rond Groenlo in 1627 van J. Blaeu uit 1649
 Triplesat en Superview satellietbeelden
 Alders 2006; Boshoven, Van der Veen & Verschoof 2014; Lillesand, Kiefer & Chipman 2008; Nijs 2002; Nijs & Van der Pluijm 2008

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: Munsterland
 Landschapszone: dekzandruggen
 Het gaat om een kleinschalig dekzandlandschap bij Groenlo, ten oosten van de Slinge.

Geraadpleegde beelden

Infraroodluchtfoto ortho 25 cm op beeldmateriaal.nl
 Opnamejaar: 2017
 Opname seizoen: zomer
 Type foto: *false color*-weergave van de groen-, rood- en infraroodbanden die zijn opgenomen met behulp van een multispectrale camera

Wat zien we?

In de (*false color*-) infraroodfoto zijn in het weiland tussen een boerderij en wat bosschages enkele donkere lijnen waar te nemen (afb. 5.24). Dat de lijnen donkerder zijn en daardoor te onderscheiden zijn, betekent in dit geval dat de



Afb. 5.24 Uitsnede van de infraroodluchtfoto ortho 25 cm waarop *crop marks* zijn te zien (bij de grijze pijlen) in de vorm van een schans uit de Tachtigjarige Oorlog (bron: beeldmateriaal.nl).

vegetatie – waarschijnlijk gaat het om gras – daar gezonder is of beter groeit dan de vegetatie buiten deze lijnen. Dit is een vergelijkbaar proces als bij de vorming van *crop marks* in het zichtbare deel van het spectrum: de bladgroenkorrels in gezonde vegetatie absorberen blauw, rood en met name infrarood, terwijl vegetatie die stress ondervindt – bijvoorbeeld door droogte – deze energie vooral reflecteert.⁸⁵ Bij gezonde vegetatie wordt er dus minder licht gereflecteerd en daarom tekent deze zich donkerder af. Het verschil tussen infrarood en rood licht is dat dit principe bij infrarood veel eerder optreedt en tevens een veel groter verschil laat zien.

Wat is de archeologische interpretatie?

De vorm van de zichtbare *crop marks* laat op zichzelf al een relatief eenduidige interpretatie toe: het gaat om een schans uit de Tachtigjarige Oorlog. Meer specifiek kunnen we stellen dat het om de gedempte grachten van deze schans gaat; deze zullen bestaan uit een vulling van humusrijk en relatief los sediment, zoals ook aangetroffen ter hoogte van Groenlo-Laarberg.⁸⁶ Dat maakt dat de vegetatie ter plekke beter kan groeien en/of minder last heeft van stressfactoren. Op basis van lokale archeologische en historische informatie, en met name op basis van de kaart van Joan Blaeu uit 1649, kunnen we deze schans identificeren als de Friese Schans.⁸⁷ Dit is een van de schansen uit de circumvallatielinie die onder leiding van Frederik Hendrik in 1627 rond Groenlo is aangelegd (afb. 5.25).

⁸⁵ Lillesand, Kiefer & Chipman 2008.

⁸⁶ Alders 2006.

⁸⁷ Nijs & Van der Pluijm 2008.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

De zoektocht naar de resten van deze circumvallatielinie kent al een kleine geschiedenis. Dankzij de kaart van Joan Blaeu was de globale ligging van de linie rond Groenlo al langer bekend, maar waar hij precies lag, was een lastige kwestie. De exacte locatie van de Engelse Schans was wel bekend. De in het bos gelegen wallen en grachten zijn zichtbaar en zijn jarenlang gebruikt als motorcrossbaan, totdat de schans in 2002 is gerestaureerd.⁸⁸ De Franse Schans is pas in 2003 vanuit een ultralichtvliegtuig als *crop mark* in een maisveld herkend en is samen met het oostelijk gelegen hoornwerk regelmatig op satellietbeelden te zien.⁸⁹ Op basis van de bekende locaties van de linie hebben Nijs en Van der

Pluijm in 2008 een projectie van de kaart van Blaeu gemaakt, waardoor er een goed overzicht is ontstaan van de ligging van de linie in het fysieke landschap (afb. 5.26).⁹⁰

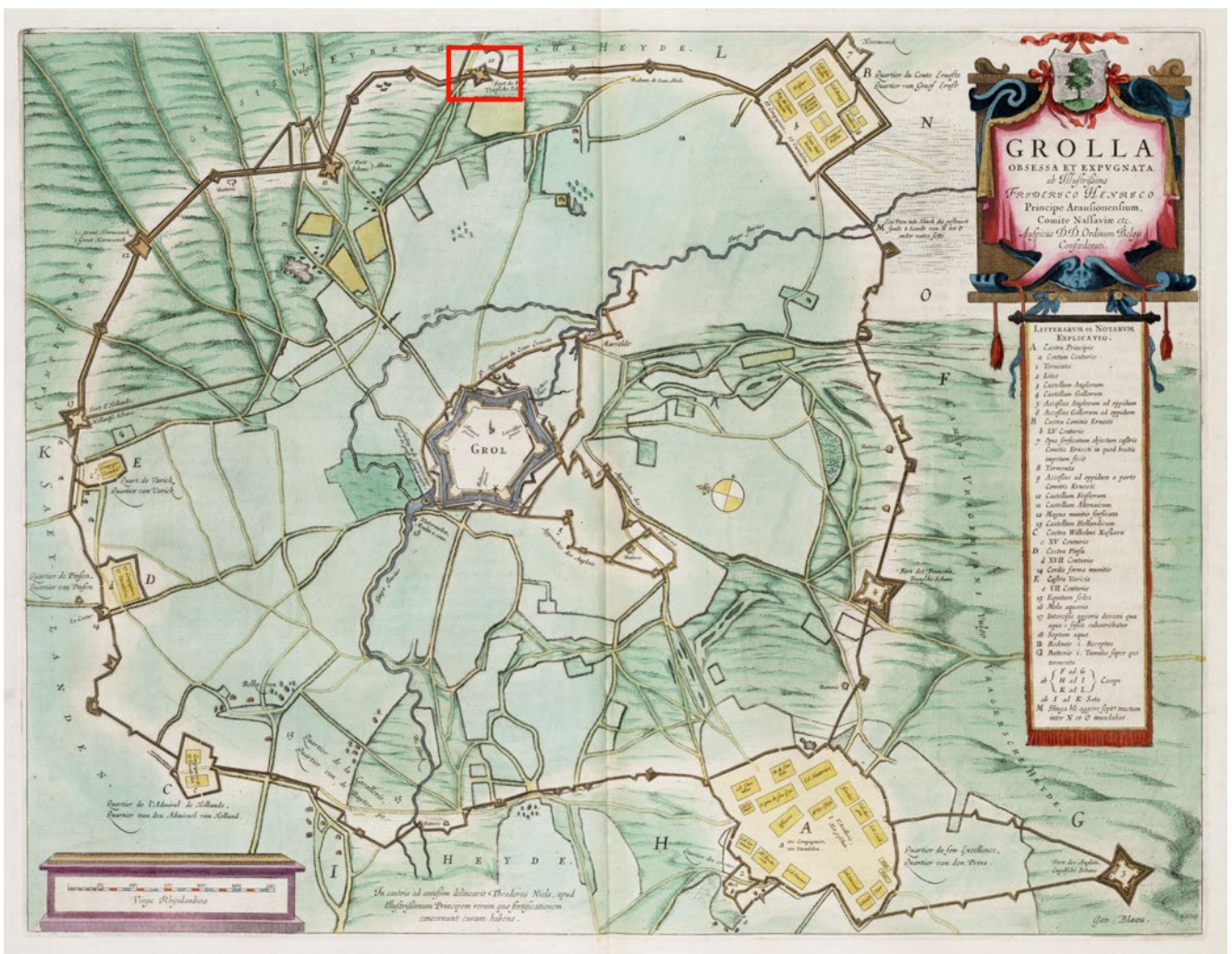
RAAP heeft vervolgens in 2012 een veldonderzoek uitgevoerd door middel van boringen en geofysische weerstandsmetingen om de ligging van de linie op een aantal geselecteerde locaties te bepalen.⁹¹ Hierbij is onder andere onderzoek gedaan op locaties waar de Hollandse Schans, Schans Altena en ook de Friese Schans volgens de kaart van Blaeu zouden liggen. Zowel de Hollandse Schans als Schans Altena is tijdens dit onderzoek aangetroffen, maar op de verwachte locatie van de Friese Schans (ca. 150 m ten noordoosten van de infraroodwaarneming, zie afb. 5.26) zijn in de geofysische weerstandsmet-

⁸⁸ Nijs 2002.

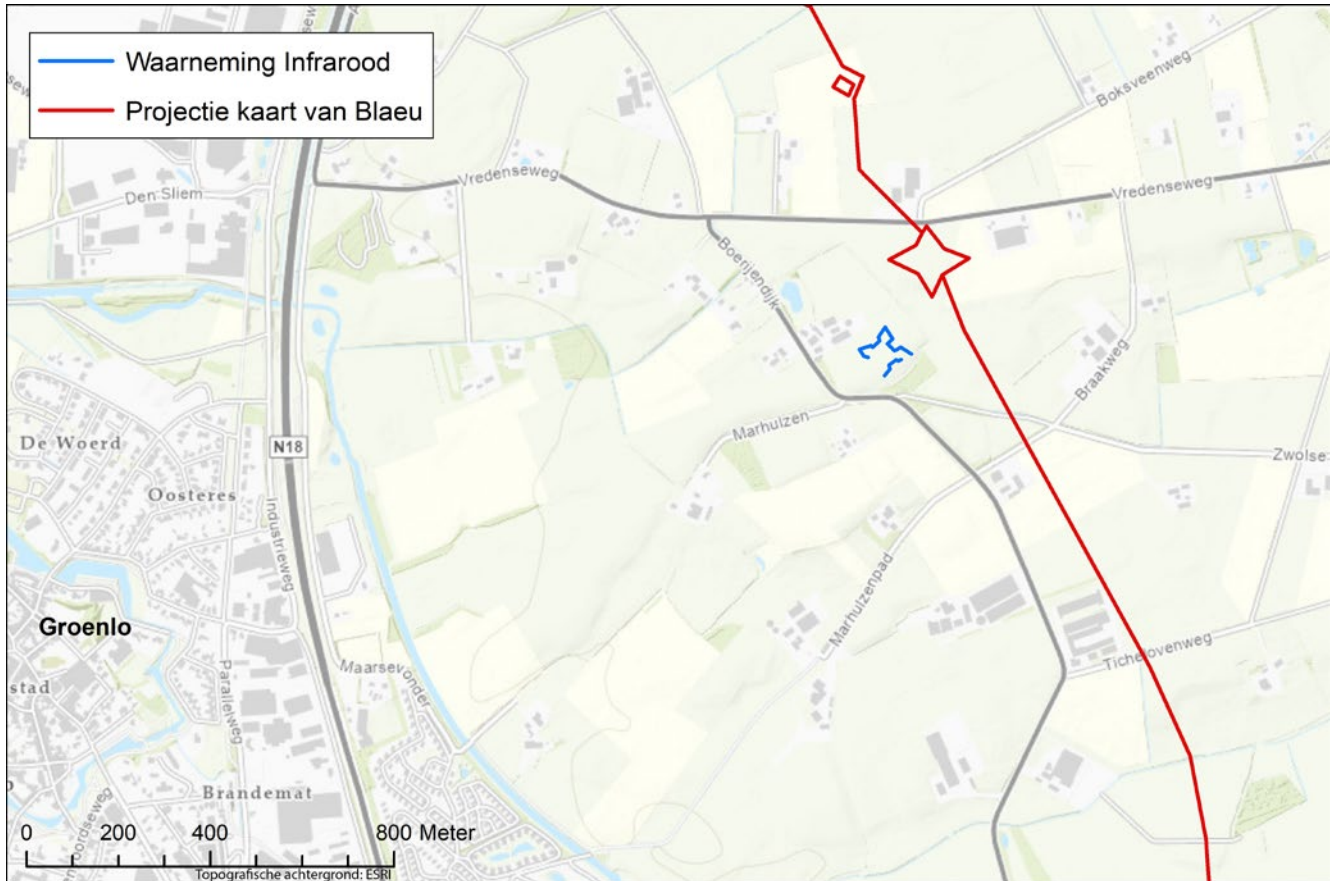
⁸⁹ Bijvoorbeeld in de zomerbeelden van Triplesat en Superview, beschikbaar via spaceoffice.nl.

⁹⁰ Nijs & Van der Pluijm 2008.

⁹¹ Boshoven, Van der Veen & Verschoof 2014.



Afb. 5.25 Kaart van Joan Blaeu uit 1649 van de circumvallatielinie rond Grol (Groenlo), door Frederik Hendrik aangelegd in 1627. Het noorden ligt links. Het rode kader geeft de Friese Schans aan (bron: Wikimedia Commons).



Afb. 5.26 De locatie van de waargenomen sporen (in blauw) van de Friese Schans in de infraroodluchtfoto's. In rood de ligging van de circumvallatielinie uit 1627 zoals afgeleid van een projectie van de kaart van Joan Blaeu. In 2017 is de linie ter plaatse van de rode lijn aangewezen als archeologisch rijksmonument (collectie: R. Emaus).

tingen slechts mogelijke sporen van een redoute aangetroffen, die een andere vorm heeft. Deze redoute is wellicht in verband te brengen met een eerdere belegering. De belegering van Groenlo in 1627 was namelijk de jongste van een reeks belegeringen in de Tachtigjarige Oorlog. Uit het onderzoek van RAAP mogen we concluderen dat de gebruikte methoden (geofysisch onderzoek gecombineerd met booronderzoek) zinvol zijn voor het opsporen van dit soort sporen. Een dergelijk onderzoek zou daarom ook op het perceel aan de Boerijendijk, waar de infraroodwaarnemingen zijn gedaan, nieuwe informatie kunnen opleveren. In de infraroodwaarneming is de schans immers niet volledig te zien en daarnaast is het mogelijk dat er voorgangers op hetzelfde perceel aanwezig zijn. Ook een aanvullend LARS-onderzoek (*low-altitude remote sensing*) met behulp van een drone (UAV) kan nieuwe gegevens opleveren, zoals de exacte ligging van overige restanten van de structuur en de verdere loop van de linie en/of eventuele voorgangers daarvan. Daarnaast zal aanvullend gravend onderzoek noodzakelijk zijn om de schans definitief te dateren en de afmetingen van de archeologische sporen beter te bepalen.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Wat deze ontdekking met name duidelijk maakt, is dat het altijd zinvol is om een archeologisch onderzoeksgebied ruimer te nemen dan verwacht. Het gebruik van luchtfoto-interpretatie en remote sensing als onderzoeksmethode laten dit ook in grote mate toe, omdat veel beeldmateriaal al online (gratis) beschikbaar is.
- Het is opmerkelijk dat de schans pas zo laat is ontdekt. Dat heeft deels te maken met de relatieve onzichtbaarheid van de sporen en de onbekendheid van archeologen met (*false color*-)infraroodfoto's als informatiebron. De foto's waren al in 2017 beschikbaar, toch is de schans pas in 2020 door de auteur ontdekt. Verder speelt ook een rol dat onderzoekers relatief veel waarde hechten aan de informatie die op oude kaarten staat en in het gebruik weinig kritisch zijn. De historische kaart van Joan Blaeu is 22 jaar na de belegering uitgebracht, voor een doelgroep die vooral in Holland actief was. De betrouwbaarheid mag dan ook worden betwijfeld. Deze casus laat zien dat de foutmarge bij het gebruik van een historische kaart 150 m kan zijn.

Nordfriesland-Pellworm. Middeleeuwse nederzetting in Duitse Waddenzee

H. Feiken (RCE), op basis van Gade, Kohlus & Kost 2017

Administratieve gegevens

Land: Duitsland
Deelstaat: Sleeswijk-Holstein
Kreis: Nordfriesland
Amt: Amt Pellworm
Plaats: Pellworm
Kaartblad 1:25.000: niet van toepassing
Coördinaten: latitude 54.58580 N, longitude 8.77640 E (decimale graden)
ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
Grondgebruik: waddengebied

Kernpublicatie

Gade, Kohlus & Kost 2017

Landschappelijke ligging

De archeologische resten komen voor op intergetijdenplaten in de Duitse Waddenzee. Het gebied waar deze intergetijdenplaten tegenwoordig liggen, behoorde in de middeleeuwen tot het vasteland. Dit land overspoelde tijdens grote stormvloed in de veertiende en zeventiende eeuw.

Geraadpleegde opnames

Voor het onderzoek door Gade, Kohlus en Kost zijn negentien SAR-beelden (*synthetic aperture radar*) in hoge resolutie geraadpleegd. Daarbij gaat het om TerraSAR-X/TanDEM-X/Radarsat-2-beelden met een pixelgrootte variërend van 1 x 1 m tot 0,22 m x 0,22 m. De SAR-beelden zijn gemaakt tussen 2012 en 2017, tijdens of nabij laagtij.

Wat zien we?

Op de beelden zijn verschillende antropogene fenomenen te zien (afb. 5.27 en afb. 5.28). Het

gaat hierbij om rechte lijnen die op een afstand tussen 10 en 20 m naast elkaar voorkomen en tientallen meters lang zijn. Deze lijnen hebben een breedte van 0,1 tot 0,3 m. Ook zijn op de beelden lineaire structuren waargenomen en waren ronde anomalieën zichtbaar.

Wat is de archeologische interpretatie?

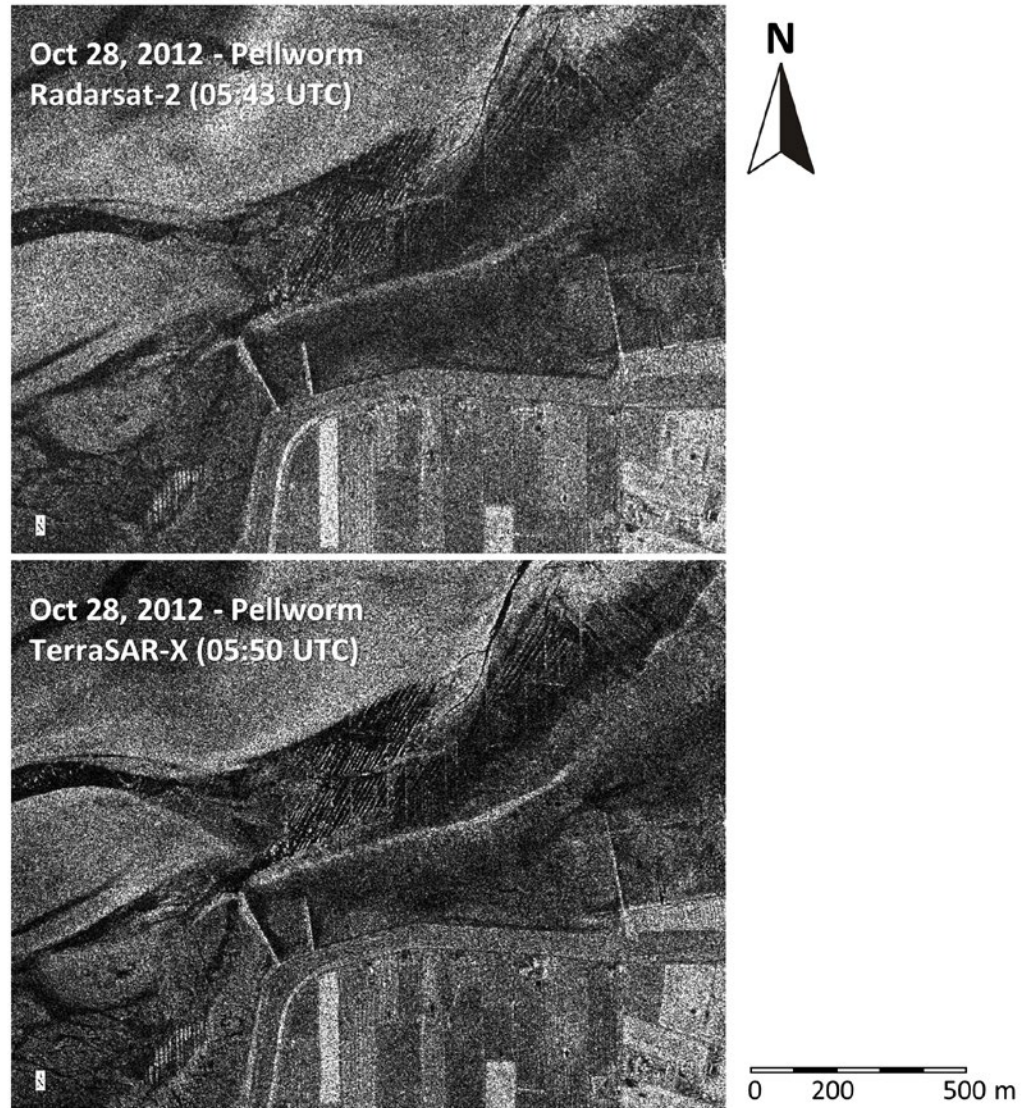
De rechte lijnen worden geïnterpreteerd als de randen van greppels. De greppelranden zijn verstevigd door plantenwortels, ander plantmateriaal en schelpen en daarom harder en compacter dan het waddensediment. Door deze compactheid zijn deze structuren zichtbaar op de radarbeelden. De lineaire structuren worden geïnterpreteerd als huisplattegronden en de ronde anomalieën als kuilen en waterputten die samen deel uitmaakten van nederzettingen. De archeologische resten stammen uit de middeleeuwen, van voor de stormvloed, uit de periode dat het gebied nog geen deel uitmaakte van het Duitse Waddenzee, maar van het vasteland.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

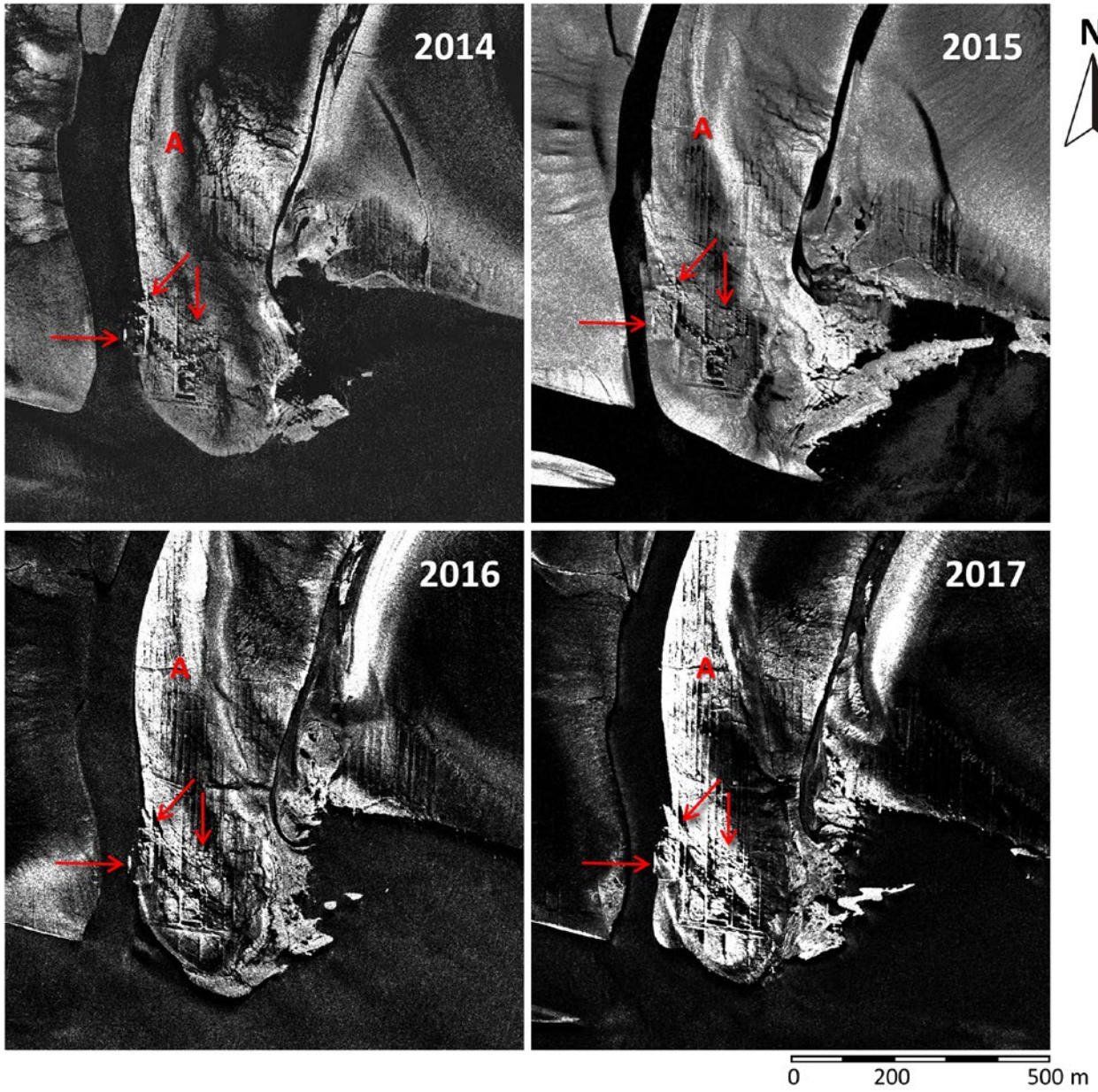
Greppels: een deel van de greppels is tijdens laagtij bezocht (afb. 5.29 en afb. 5.30).
Nederzettingen: de nederzettingen zijn niet via veldonderzoek gevalideerd. Er is wel een luchtfoto beschikbaar van het gebied waarop de huisplattegronden duidelijk zichtbaar zijn (afb. 5.31).

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Dat (tegen betaling) SAR-beelden beschikbaar zijn in hoge resolutie, namelijk met een pixelgrootte van 1 m x 1 m tot 0,22 m x 0,22 m.
- Dat radarbeelden zeer goed bruikbaar zijn voor het opsporen van archeologische resten in een landschappelijke context die ook in Nederland veelvuldig voorkomt, namelijk verdrinken landschappen en intergetijdenplaten.



Afb. 5.27 De TerraSAR-X-beelden van 28 oktober 2012 van het gebied waarop de grootschalige, lineaire structuren zichtbaar zijn (bron: Gade, Kohlus & Kost 2017, fig. 5).



Afb. 5.28 Deze vier beelden, genomen tussen 2014 en 2017, laten een gebied van 1 x 1 km zien in de Duitse Waddenzee. De beelden zijn verkregen met een TerraSAR-X/TanDEM-X Staring/Spotlight-modus. De rode pijlen wijzen naar zichtbare middeleeuwse huisplattegronden (bron: Gade, Kohlus & Kost 2017, fig. 8).



Afb. 5.29 Foto genomen tijdens laagtij in juni 2017. Duidelijk zichtbaar zijn de randen van de greppels met plantenwortels, ander plantmateriaal en schelpen (bron: Gade, Kohlus & Kost 2017, fig. 10).



Afb. 5.30 Foto eveneens genomen tijdens laagtij in juni 2017. De herkenbare greppel is ruim 1 m breed (bron: Gade, Kohlus & Kost 2017, fig. 10).



Afb. 5.31 De luchtfoto laat lineaire en ronde grondsporen zien die duidelijk afsteken tegen het bruingrijze waddensediment. Deze sporen worden als huisplattegronden geïnterpreteerd (bron: Gade, Kohlus & Kost 2017, fig. 7).

6 LiDAR en het Actueel Hoogtebestand Nederland

AHN: subtiele hoogteverschillen verraden archeologische resten

Sinds de publicatie van de eerste versie in 2001 is het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) een bijzonder waardevolle informatiebron van archeologisch bureauonderzoek gebleken. Dit landsdekkende bestand bevat gedetailleerde hoogtegegevens van het maaiveld die door middel van vliegtuiglaseraltimetrie zijn ingewonnen. Aan de hand van het AHN kunnen archeologische fenomenen worden opgespoord die zich aftekenen door (vaak subtiele) hoogteverschillen aan het huidige maaiveld. In het merendeel van de gevallen gaat het om locaties waar de mens in het verleden heeft gegraven (bijvoorbeeld grachten, greppels of klei- of zandwinningsputten) of grond heeft opgebracht (bijvoorbeeld grafheuvels, terpen, kasteelheuvels of mottes). Hieronder bevinden zich ook vindplaatsen die met de ‘klassieke’ methoden van inventariserend veldonderzoek (zoals oppervlaktekartering en booronderzoek) vaak onopgemerkt blijven. Bekende voorbeelden daarvan zijn prehistorische raatakkers (*Celtic*

fields) en bundels karrensporen in heideterreinen en dicht begroeide bospercelen. Ook voor het (beter) begrenzen van vindplaatsen en het monitoren van de fysieke staat ervan kan het AHN een belangrijk hulpmiddel zijn. Het AHN kent vier versies, die verschillen in het aantal meetpunten en nauwkeurigheid. Beide zijn in de loop van de tijd, en vooral van AHN versie 1 naar versie 2, steeds groter geworden. In vergelijking met het AHN₃ is met het verschijnen van het AHN₄ kwalitatief nog beter beeldmateriaal met een zeer hoge ruimtelijke resolutie beschikbaar gekomen. Dankzij de ontwikkeling en toepassing van geavanceerde visualisatie- en analysetechnieken is de mate van zichtbaarheid van archeologische fenomenen op het AHN in de afgelopen twee decennia sterk toegenomen. Voorbeelden van visualisatietechnieken zijn *hillshade* en dynamisch en statisch kleuren-raster. Het AHN is bij uitstek een bron die kan worden gebruikt in combinatie met andere bronnen van remote sensing (luchtfoto's en satellietbeelden).

6.1 Inleiding

LiDAR (*Light Detection And Ranging*) is een techniek van remote sensing die wereldwijd en in toenemende mate wordt toegepast in archeologische prospectie, zoals uit talrijke internationale studies, congressen, workshops en publicaties kan worden afgeleid.⁹² Digitale hoogtemodellen die zijn opgesteld met data van laseraltimetrie, maken het mogelijk om archeologische fenomenen op te sporen, te visualiseren en te monitoren, met inbegrip van gebieden die vanwege een dicht vegetatiedek of om veiligheidsredenen niet toegankelijk zijn voor andere vormen van veldwerk. Voorbeelden van archeologische toepassingen zijn er legio, variërend van het karteren en visualiseren van grote tempelcomplexen en andere gebouwresten van de Mayacultuur in de oerwouden van Mexico, Belize en Guatemala⁹³ tot landschapskarteringen rondom Stonehenge.⁹⁴ Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) is het digitale hoogtebestand van heel Nederland

waarvan de data zijn verzameld met behulp van LiDAR.

Dit hoofdstuk besteedt aandacht aan producten, kwaliteitskenmerken en archeologische toepassingen van het AHN in Nederland. Voordat deze onderwerpen worden besproken, lichten we eerst het principe van LiDAR of laseraltimetrie toe. Ook presenteren we eerst een korte historische terugblik van het AHN. Het hoofdstuk sluit af met een Nederlandse casestudy en twee Vlaamse casestudy's waarin digitale hoogtemodellen een belangrijke rol spelen.

6.2 Wat is LiDAR?

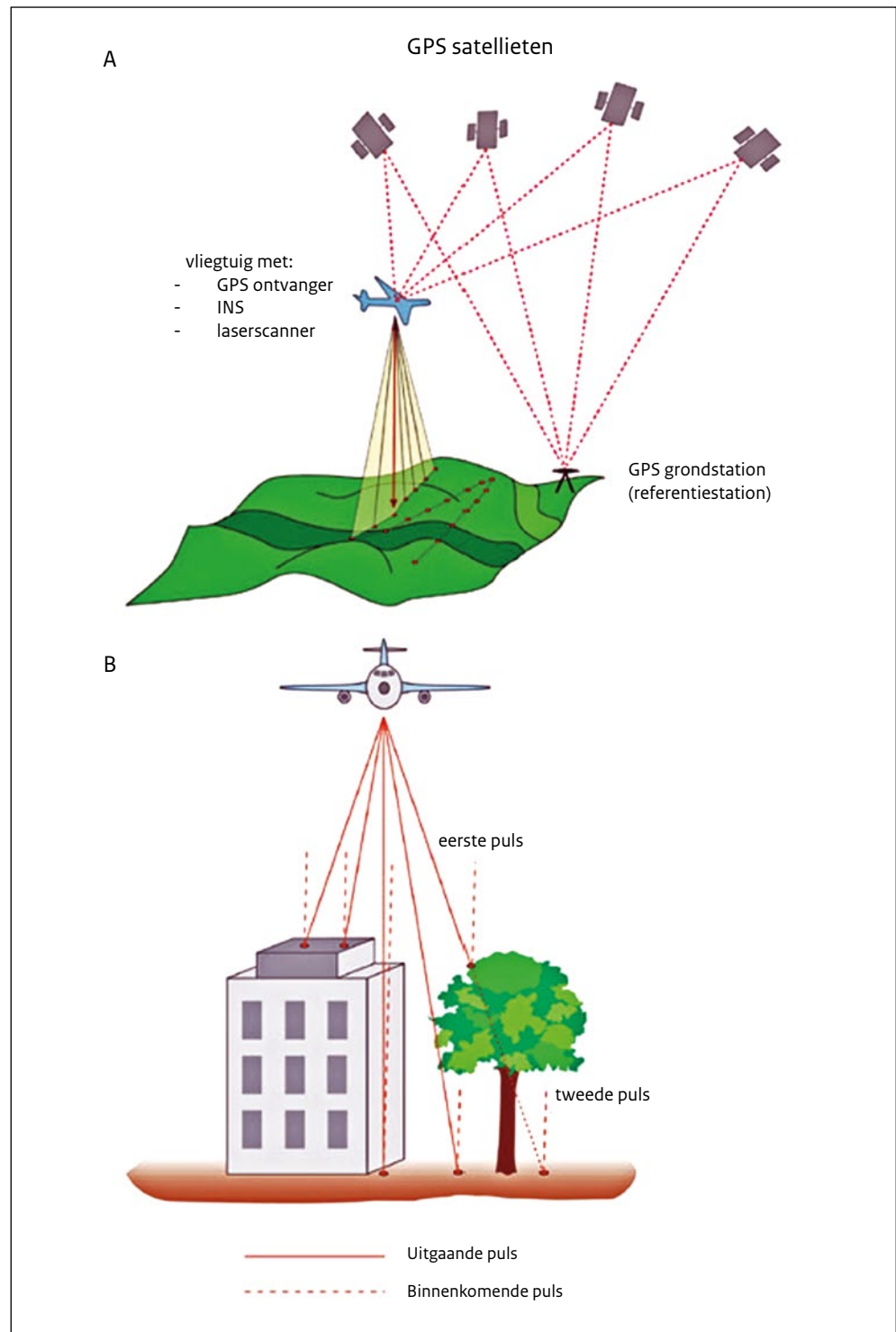
LIDAR (*Laser Imaging Detection And Ranging*) – of LiDAR (*Light Detection And Ranging*) – is een techniek van remote sensing die de afstand van het meetinstrument tot een object of oppervlak bepaalt door middel van laserpulsen.⁹⁵ Deze techniek staat ook bekend als laseraltimetrie. LiDAR is een actieve techniek en werkt volgens hetzelfde principe als radar: vanuit een vliegtuig

⁹² Zie bijvoorbeeld Hesse 2010; verscheidene artikelen in Cowley 2011.

⁹³ Enkele voorbeelden van publicaties zijn Chase *et al.* 2012, 2014; Ringle *et al.* 2021.

⁹⁴ Bewley, Crutchley & Shell 2005.

⁹⁵ Voor een Engelstalige publicatie over dit onderwerp, zie Holden 2001.



Afb. 6.1 De werking van het principe van vliegtuiglaseraltimetrie (bron: Willemse 2013, 9). GPS = *global positioning system*, INS = *inertial navigation system*.

of helikopter wordt een signaal (laserstraal) uitgezonden die het aardoppervlak aftast (afb. 6.1). Enige tijd later wordt dit signaal door reflectie weer opgevangen. De afstand tot het object of oppervlak wordt bepaald door de tijd te meten die verstrijkt tussen het uitzenden van een puls en het opvangen van een reflectie van die puls. De meting van de looptijd van de laserreflectie en van de positie (via *global positioning system* of GPS) en stand van het meettoestel (*inertial navigation system* of INS) gedurende de meetvlucht geven samen een heel nauwkeurig resultaat. Het verschil tussen LiDAR en radar is dat LiDAR gebruikmaakt van laserlicht, terwijl radar gebruikmaakt van radiogolven.⁹⁶ Er worden wereldwijd dagelijks enorme hoeveelheden LiDAR-gegevens verzameld. Voor dit rapport is het bestand van de in Nederland verzamelde gegevens het meest relevant. Dit bestand wordt het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) genoemd.⁹⁷ In Vlaanderen wordt gebruikgemaakt van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (2020). Verschillen in natuurlijk reliëf zijn samen met objecten of elementen die het resultaat zijn van menselijk handelen (zoals bebouwing, dijken en groeves) op LiDAR-gegevens zichtbaar als hoogteverschillen (in Nederland ten opzichte van Normaal Amsterdams Peil) van het aardoppervlak.

6.3 Korte historische terugblik

Het AHN is een meerjarenprogramma en een samenwerking tussen de waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat. Deze organisaties hebben een gezamenlijke verantwoordelijkheid voor een veilig Nederland op het gebied van watersysteem- en waterkeringenbeheer. De eigenaar van de AHN-dataset is Rijkswaterstaat en de coördinatie van het AHN is in handen van Het Waterschapshuis.⁹⁸

De geschiedenis van het AHN gaat terug tot het begin van de jaren negentig.⁹⁹ In een tijd dat laseraltimetrie nog in de kinderschoenen stond, werd voor het eerst een lasersysteem geïntroduceerd waarmee vanuit de lucht hoogtemetingen van het aardoppervlak konden worden gedaan. Deze nieuwe technologie leidde in 1996 tot een gezamenlijk initiatief van waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat om een digitaal hoogtebestand van Nederland te vervaardigen.

De inwinning van meetgegevens en de productie van AHN₁ vonden plaats tussen 1997 en 2004. Deze relatief lange periode van zeven jaar hing mede samen met het feit dat alleen in het bladloze seizoen en bij geschikt weer kon worden gevlogen. Bovendien was de meetapparatuur minder geavanceerd dan nu en moesten de gemeten hoogtepunten grotendeels handmatig worden geïdentificeerd.

Tussen 2007 en 2012 vonden de metingen voor AHN₂ plaats. In die jaren was er behoefte aan een verbeterde versie van het AHN voor een actueel beeld van veranderingen in het landschap, bijvoorbeeld vervorming van dijken en de veranderde loop van watergangen. Bij het maken van de derde versie (AHN₃) tussen 2014 en 2019 vonden opnieuw verbeteringen plaats, waaronder een verbeterde classificatie in vijf klassen: maaiveld, gebouwen, water, kunstwerken zoals bruggen, en de restklasse met bijvoorbeeld vegetatie. Het grootste verschil met het AHN₂ zat hem echter niet in de techniek en resolutie (paragraaf 6.5), maar in de (online) beschikbaarheid voor andere gebruikers. Om het gebruik ervan te bevorderen stelde de overheid in 2014 alle data kosteloos beschikbaar voor iedereen. Het AHN₃ is in 2019 opgeleverd. Voor de meeste recente versie (AHN₄) zijn de metingen in de periode 2020-2022 verricht. De data zijn beschikbaar via de AHN-viewer en kunnen ook via deze omgeving worden gedownload. De relatief korte productietijd (drie jaar) van AHN₄ komt onder andere doordat de meetvliegtuigen efficiënter konden vliegen. Voor AHN₁ bedroeg de vlieghoogte 400 m, terwijl voor AHN₄ op 1300 m werd gevlogen. Hierdoor is niet alleen de tijdsduur van het vliegen zelf sterk afgenomen (er hoeven minder banen te worden gevlogen), maar ook de tijd die besteed moet worden aan bewerking van de meetdata (het rekenen dat nodig is voor het aan elkaar 'plakken' van vliegstroken). Verder kan het nieuwe systeem tien keer zoveel metingen verrichten als het vorige.

Waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat maken gebruik van het AHN voor talrijke doeleinden. Een belangrijke daarvan is water- en waterkeringbeheer. Aan de hand van de (NAP-) hoogte en het hoogteverloop van het maaiveld kan worden bepaald of het water voldoende van het land kan stromen, hoe hoog het waterpeil in de sloten mag zijn, of het water in rivieren, uiterwaarden en sloten voldoende kan worden

⁹⁶ bron: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>.

⁹⁷ bron: <https://www.ahn.nl/ahn-making>.

⁹⁸ Het Waterschapshuis is gevestigd in Amersfoort en is verantwoordelijk voor de regie en uitvoering van activiteiten op het gebied van informatie- en communicatietechnologie.

⁹⁹ Onderstaand overzicht van de geschiedenis van het AHN is in belangrijke mate gebaseerd op Ter Veld 2020.

afgevoerd en of de dijken nog hoog en sterk genoeg zijn. Het AHN wordt daarnaast voor vele andere soorten beheer gebruikt, zoals het dagelijks beheer en onderhoud van dijken, het maken van bestekken voor groot onderhoud, 3D-karteringen, vergunningverlening en handhaving. Ook gemeenten, bedrijven en onderzoekers gebruiken de gedetailleerde hoogtegegevens.

Met het oog op actuele thema's als klimaatsverandering en waterveiligheid wordt de actualiteit van de hoogtedata steeds relevanter voor de gebruikers van het AHN. De frequentie van de updates is om deze reden verkort van zes tot drie jaar. Voor de komende jaren is een van de doelen om metingen uit verschillende bronnen samen te voegen in een 3D-basisbestand van Nederland en het realiseren van een levend hoogtemodel, dat wil zeggen een 3D-basisbestand waaraan gaandeweg hoogtedata (niet alleen AHN-data) kunnen worden toegevoegd.

6.4 AHN-producten

Van het AHN-bestand bestaan vier versies (AHN₁, AHN₂, AHN₃ en AHN₄), met verschillende nauwkeurigheid en resolutie. Het AHN bestaat uit een geclassificeerde puntenwolk.¹⁰⁰ Dit houdt in dat elk (gemeten) punt is toegekend aan een van de volgende klassen: maaiveld, bebouwing, water, kunstwerk of overig. De geclassificeerde puntenwolk ligt aan de basis van een aantal producten. De producten van AHN₃ zijn: een LAZ-puntenwolk, een digitaal terreinbestand (DTM: *digital terrain model*) en een digitaal hoogtebestand (DSM: *digital surface model*).

6.4.1 LAZ-puntenwolk

De LAZ-puntenwolk is een bestand waarin alle metingen (in onbewerkte vorm) beschikbaar zijn, inclusief alle kenmerken van dat punt, zoals intensiteit, klasse, vliegstrooknummer en tijdstip. LAZ kan door de meeste software rechtstreeks worden ingelezen.¹⁰¹ Omdat

LAZ-puntenwolken zware bestanden zijn, benutten de meeste gebruikers afgeleide producten. LAZ-puntenwolken zijn uitermate geschikt om extra analyses op de data uit te voeren, bijvoorbeeld om 3D-reconstructies van een bebouwde omgeving te genereren, en om volledig gebruik te maken van de classificatie van de data.

6.4.2 Digitaal terreinbestand

Van alle als 'maaiveld' geclassificeerde punten wordt een digitaal terreinbestand (DTM: *digital terrain model*) gemaakt. Door middel van de *squared inverse distance weighting*-methode wordt voor iedere cel van 50 x 50 cm een waarde berekend die het best de waarde van het centrum van deze cel representeert. Lege cellen krijgen een 'no-data'-waarde. Zodoende ontstaat voor het hele gemeten gebied een raster dat de hoogte van het maaiveld representeert. Dit raster bevat gaten op plekken waar geen maaiveld gemeten is, zoals in water en onder gebouwen. Van dit raster wordt vervolgens een 5 m-raster afgeleid. Voor iedere cel van 5 x 5 m wordt de gemiddelde waarde van alle 0,5 x 0,5 m cellen genomen als waarde, tenzij meer dan 60% van de 0,5 x 0,5 m-cellen een 'no-data'-waarde heeft; dan krijgt ook de 5 x 5 m-cel een 'no-data'-waarde. Deze rasterbestanden in GeoTiff-formaat zijn makkelijk te gebruiken in allerlei (GIS-)softwarepakketten.

6.4.3 Digitaal hoogtebestand

Naast het terreinbestand dat het maaiveld weergeeft, is er ook een bestand dat alle data representeert behalve de klasse 'water'. Dit digitale hoogtebestand (DSM: *digital surface model*) wordt op dezelfde wijze gemaakt als een DTM-bestand. Alleen worden dan niet alleen de maaiveldpunten meegenomen, maar ook gebouwen, kunstwerken en overige punten. Water blijft ook hier buiten beschouwing en wordt derhalve als 'no-data' gepresenteerd.

¹⁰⁰ De tekst over AHN is dit deel van het rapport is grotendeels ontleend aan www.ahn.nl/ahn-making.

¹⁰¹ LAZ is een afgeleide (gecomprimeerde) versie van LASer en wordt in deze gecomprimeerde vorm beschikbaar gesteld voor gebruikers van het AHN.

Tabel 6.1 Opnameperiode, dichtheid in aantal meetpunten en nauwkeurigheid van de hoogte van het AHN₁, AHN₂, AHN₃ en AHN₄

Versie	Periode	Aantal meetpunten	Nauwkeurigheid hoogte
AHN ₁	1996-2002	varieert tussen 1 punt per 16 m ² en 1 punt per 1 m ²	20 cm, voor minimaal 68,2% van de punten
			35 cm, voor minimaal 95,4% van de punten
			50 cm, voor minimaal 99,7% van de punten
AHN ₂	2007-2012	gemiddeld tussen 6 en 10 punten per 1 m ²	10 cm, voor minimaal 68,2% van de punten
			15 cm, voor minimaal 95,4% van de punten
			20 cm, voor minimaal 99,7% van de punten
AHN ₃	2014-2019	gemiddeld tussen 6 en 10 punten per 1 m ²	10 cm, voor minimaal 68,2% van de punten
			15 cm, voor minimaal 95,4% van de punten
			20 cm, voor minimaal 99,7% van de punten
AHN ₄	2020-2022	gemiddeld tussen 10 en 14 punten per 1 m ²	10 cm, voor minimaal 68,2% van de punten
			15 cm, voor minimaal 95,4% van de punten
			20 cm, voor minimaal 99,7% van de punten

Bron: www.ahn.nl.

6.5 Kwaliteitskenmerken

Sinds de eerste hoogtemetingen voor het AHN in 1996 is er veel veranderd aan de techniek en de specificaties. Op de website van het Actueel Hoogtebestand Nederland is een kwaliteitsbeschrijving van het AHN opgenomen.¹⁰² Daarin wordt voor de verschillende producten van het AHN (AHN₁, AHN₂, AHN₃ en AHN₄) aandacht besteed aan de volgende zes variabelen: tijdsverschil/inwinperiode, hoogtenauwkeurigheid, punt dichtheid, planimetrische nauwkeurigheid, van filtering naar classificatie en leverformaten. In dit rapport beperken we ons tot hoogtenauwkeurigheid en punt dichtheid (tabel 6.1). Beide variabelen zijn van toepassing op onbewerkte LiDAR-gegevens en zijn bepalend voor de resolutie van afgeleide digitale hoogtemodellen (*digital elevation model of DEM*).¹⁰³

6.5.1 AHN₁ (1997-2004)

Voor AHN₁ is in eerste instantie een punt dichtheid van één punt per 16 m² gehanteerd. In de loop van het AHN₁ nam de punt dichtheid toe. Er zijn ook gebieden beschikbaar waar ongeveer één punt per m² is ingewonnen.

6.5.2 AHN₂ (2007-2012) en AHN₃ (2014-2019)

Waar AHN₁ voor 99,7% van de punten een nauwkeurigheid van 50 cm heeft, hebben AHN₂ en AHN₃ voor 99,7% van de punten een nauwkeurigheid van 20 cm. De gemiddelde punt dichtheid voor beide versies ligt tussen de zes en tien punten per m². Daarmee zijn de ruimtelijke resoluties van AHN₂ en AHN₃ identiek aan elkaar.

6.5.3 AHN₄ (2020-2022)

Voor de meest recente versie van het AHN zijn data ingewonnen tussen 2020 en 2022, waarbij de hoogtenauwkeurigheid gelijk is gebleven aan die van de voorafgaande twee versies. Een belangrijk verschil heeft betrekking op het aantal meetpunten. Dit aantal bedraagt voor AHN₄ gemiddeld tussen tien en veertien punten per m², hetgeen een duidelijke toename betekent in vergelijking met AHN₂ en AHN₃ (tabel 6.1). De ruimtelijke resolutie is verder toegenomen en daarmee ook de kans op zichtbaarheid van (kleinere) vindplaatsen die zich 'verraden' door hoogteverschillen in het maaiveld. Van belang in relatie tot de kwaliteit is dat het

¹⁰² <https://www.ahn.nl/kwaliteitsbeschrijving>, geraadpleegd juli 2022.

¹⁰³ Voor een uitgebreide bespreking van alle zes rubrieken zie de website <https://www.ahn.nl/kwaliteitsbeschrijving>.

AHN behoort tot de categorie niet-beeldvormende opnames.¹⁰⁴ Dit betekent dat laseraltimetrie geen kant-en-klaar beeld genereert, maar dat een vertaling nodig is van de meetdata (het AHN-basisbestand) naar vlakdekkende hoogterasters of digitale oppervlaktemodellen. Dit vereist specialistische kennis van interpolatietechnieken in een GIS-omgeving. Daarnaast is, evenals bij de analyse van analoge en digitale luchtfoto's, kennis en ervaring van de waarnemer (de uitvoerder van archeologisch bureauonderzoek) van eminent belang voor signalering en herkenning van (bepaalde typen van) archeologische vindplaatsen. Ook bij het AHN zullen afwijkende, in de zin van onnatuurlijk ogende lijn- en cirkelvormige, vierkante en rechthoekige vormen het eerst in het oog springen. Dergelijke vormen wijzen op een antropogene ontstaanswijze en daarmee op elementen en structuren van (mogelijk) archeologische betekenis.

6.6 Archeologische toepassingen

6.6.1 Opsporen van vindplaatsen

In Nederland kwam met de introductie van AHN₁ in 2002 een belangrijk product van LiDAR voor archeologisch bureauonderzoek beschikbaar (tabel 6.2). Kennis over de (on)mogelijkheden van gebruik was in de beginperiode van het AHN logischerwijze nog niet aanwezig. In 2002 is een verkennende studie verricht om de toepassingsmogelijkheden van AHN₁ voor de archeologie te onderzoeken.¹⁰⁵ De resolutie van AHN₁ is in de regel niet toereikend voor het prospecteren van kleine archeologische fenomenen, zoals kuilen en grafheuvels, maar wel voor grote (lineaire) fenomenen en structuren, waaronder wegen, dijken, raatakkercomplexen en aardkundige verschijnselen, met inbegrip van paleolandschappen. Het waren juist deze fenomenen waarnaar in de beginjaren van het AHN de aandacht uitging en waarvan verscheidene voorbeelden werden gepresenteerd.¹⁰⁶ Hoewel in deze eerste jaren vooral basale visuele inspecties werden verricht, werden ook verkennende studies uitgevoerd met als doel het vergroten van de zichtbaarheid van archeologische vind-

¹⁰⁴ Willemse 2013.

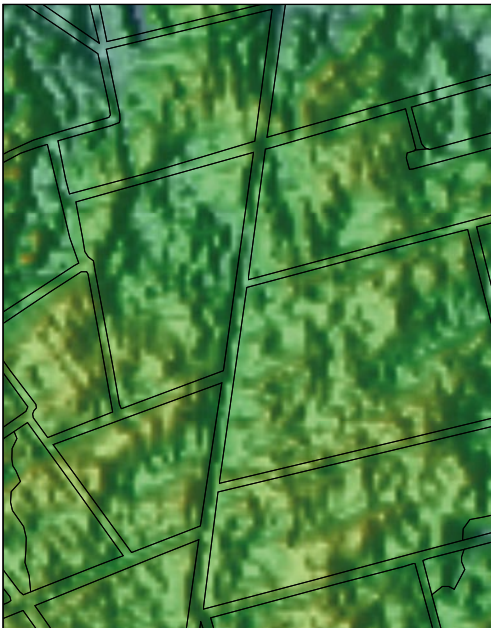
¹⁰⁵ Deze verkennende studie ontving in 2003 een subsidie van SENTER, onderdeel van het Ministerie van Economische Zaken.

¹⁰⁶ Sueur 2005; Van Zijverden & Laan 2005; Waldus & Van der Velde 2006; De Boer *et al.* 2008.

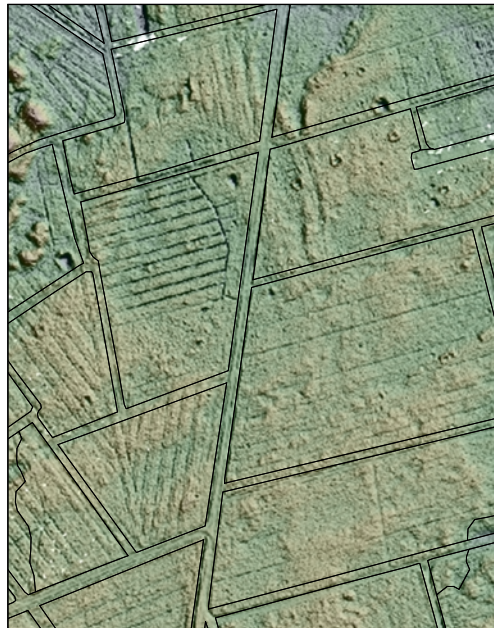
Tabel 6.2 Overzicht van in hoofdstuk 6 vermelde archeologische toepassingen van AHN₁ tot en met AHN₃, en selectie van relevante publicaties

Versie	Toepassingen	Literatuur
AHN ₁	West-Veluwe en Utrechtse Heuvelrug. Met behulp van visualisatietechnieken opsporen van afwijkingen in het natuurlijke reliëf van mogelijke archeologische betekenis, waaronder grafheuvels, Romeins marskamp, leemkuilen, raatakkers, paden en wegen	De Boer & Laan 2005; Willemse 2007; Van Zijverden & Laan 2005
	onderzoek van toepassingsmogelijkheden van AHN ₁	bijdragen in Waldus & Van der Velde 2006
	reconstructie en kenschets van het natuurlijke en historische (cultuur)landschap aan de hand van vijf timeslices	Van der Zee, Zuidhoff & De Boer 2009; Van der Zee & Zuidhoff 2012
AHN ₂	divers, als bron van bureauonderzoek en nadere duiding van gegevens verzameld tijdens IVO of opgraven. Ook presentaties en artikelen van vrijwilligers in archeologie	rapporten van archeologische bedrijven, universiteiten en overheden, ook presentaties en artikelen van vrijwilligers in de archeologie; zie ook Willemse 2013
AHN ₃	divers, als bron van bureauonderzoek en nadere duiding van gegevens verzameld tijdens inventariserend veldonderzoek of een opgraving	rapporten van archeologische bedrijven, universiteiten en overheden, ook presentaties en artikelen van vrijwilligers in de archeologie
	Nederweert: onderzoek van raatakkers door de Universiteit Groningen	Arnoldussen 2018, 2020
	Baarlo-de Bong, Venlo-Zaarderheiken: onderzoek raatakkers, grafheuvels door Universiteit Leiden	Fontijn <i>et al.</i> 2019
	Veluwe, <i>citizen science</i> -project van de Universiteit Leiden, de provincie Gelderland en de Stichting Erfgoed gericht op opsporen grafheuvels en raatakkers	Lambers, Verschoof-van der Vaart & Bourgeois 2019

Voor een overzicht van de kwaliteitskenmerken, zie tabel 6.1.



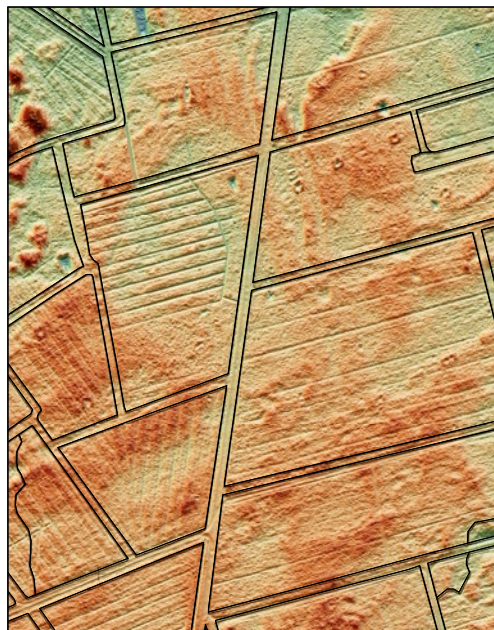
AHN1



AHN2



AHN2



AHN2

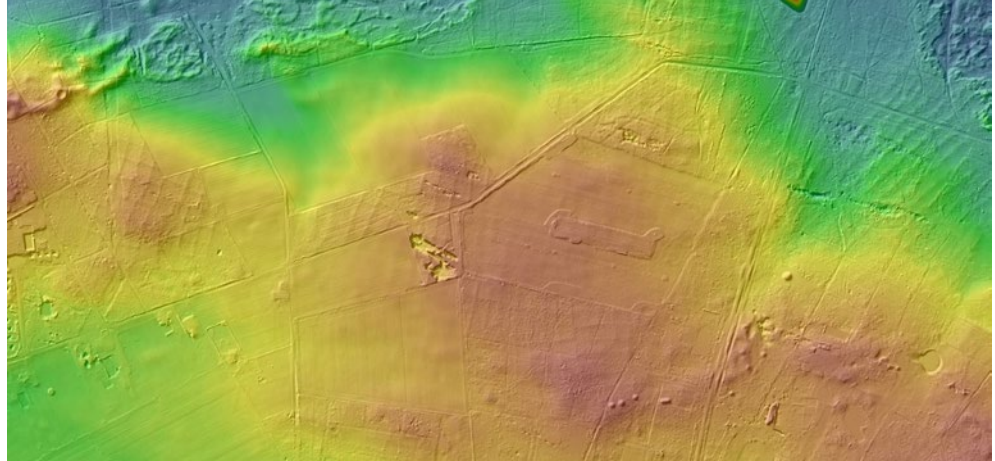
Afb. 6.2 Ruimtelijke resolutie van AHN2 (rastercelgrootte van 0,5 x 0,5 m) in vergelijking met AHN1 (rastercelgrootte van 5 x 5 m) ter hoogte van het legerkamp bij Oirschot. Linksboven een uitsnede van AHN1 met relatief weinig detail. De uitsneden rechtsboven en onder tonen verschillende bewerkingen van AHN2 en aanmerkelijk meer detail. Bij de verschillende bewerkingen is gebruikgemaakt van verschillende kleurenpaletten en verschillende richtingen van lichtval. Hierdoor zijn op het ene kaartbeeld details te zien, zoals kookkuilen en latrines, die op het andere niet of minder goed te zien zijn en *vice versa* (bron: Beex *et al.* 2017, afb. 2.9).

plaatsen op het AHN. Daarbij werd ook aandacht besteed aan geautoriseerde zoekopdrachten en visualisatietechnieken.

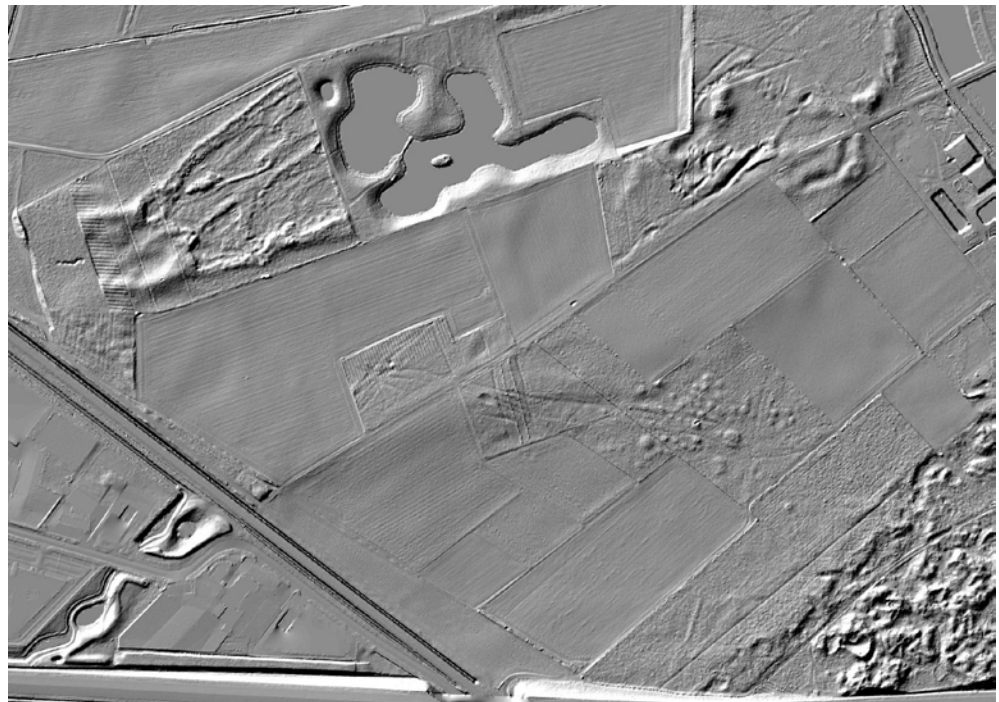
Een vroeg voorbeeld van patroonherkenning in het AHN1 richtte zich op cultuurhistorische elementen in de West-Veluwe en Utrechtse

Heuvelrug.¹⁰⁷ In de betreffende studie werd gebruikgemaakt van schaduwreliëfkaarten (in positieve en geïnverteerde beelden) en hellingklassenkaarten met toegevoegd optisch schaduwreliëf. Het leverde diverse heuvelstructuren en lijnvormige elementen op van mogelijk

¹⁰⁷ De Boer & Laan 2005.



Afb. 6.3 Het stuwwallandschap tussen Lunteren en Wekerom laat – naast uitgestrekte raatakkercomplexen – ook verschillende grafheuvelgroepen zien, zichtbaar gemaakt door een combinatie van *hillshade* en een kleurenraster (bron: AHN₃).



Afb. 6.4 In bospercelen op de Zaarderheiken bij Venlo ligt een grafheuvellandschap met bundels karrensporen verscholen. Door middel van *hillshade*-visualisatie zijn deze archeologische elementen duidelijk te zien (bron: AHN₃).

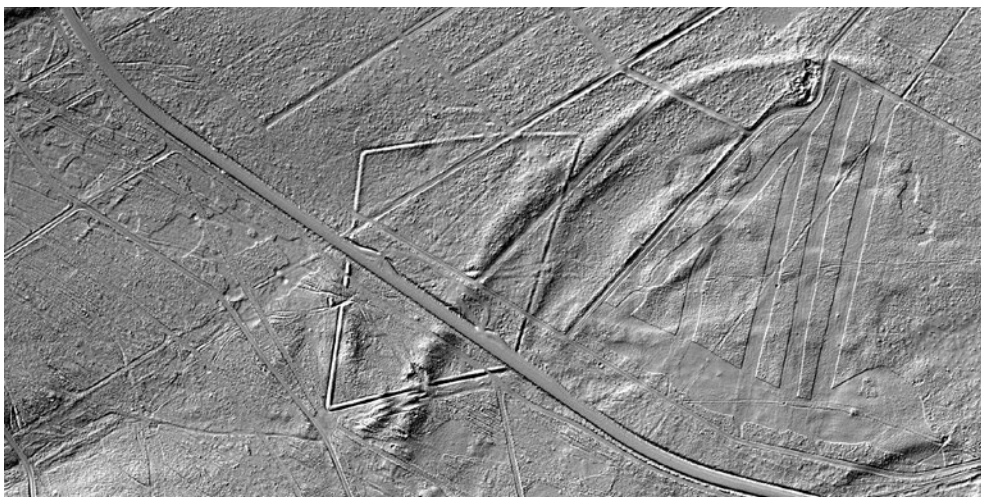
archeologische of historisch-geografische betekenis.

Met de komst van AHN₂ en AHN₃ nam de populariteit van het AHN onder archeologen verder toe (tabel 6.2). Enerzijds speelde sinds 2014 de gratis beschikbaarheid van AHN-beelden op het internet een rol. Anderzijds namen met het verschijnen van AHN₂ en AHN₃ de punt dichtheid

en de ruimtelijke resolutie toe en daarmee ook de mogelijkheden om kleinere objecten aan het aardoppervlak te onderscheiden (afb. 6.2).¹⁰⁸

De verdere ontwikkeling en toepassing van geavanceerde visualisatie- en analysetechnieken droegen eveneens bij tot steeds betere archeologische resultaten. Dankzij deze technieken, waaronder reliëfschaduwwerking (*hillshade*) en

¹⁰⁸ Willemse 2013, 10.



Afb. 6.5 Voorbeeld van een vierkante walstructuur (een Romeins marskamp) op de heide bij Ermelo en zichtbaar op een hillshade-bewerking van het AHN. Daarnaast zijn tal van karrensporen, greppels en stroken afgeplagde heide duidelijk herkenbaar (bron: AHN3).

dynamisch en statisch kleurenraaster, werd de (kans op) zichtbaarheid van archeologische fenomenen op het AHN vergroot en werden de gebruiksmogelijkheden voor archeologische prospectie verder geoptimaliseerd (afb. 6.2 en paragraaf 6.5). Deels gaat het daarbij om dichtbegroeide terreinen die niet of moeilijk toegankelijk zijn voor inventariserend veldonderzoek, zoals booronderzoek en proefsleuvenonderzoek. Goede voorbeelden zijn laat-prehistorische grafheuvels en raatakkers verscholen in bosgebieden op de hogere delen van de pleistocene zandgronden (afb. 6.3 en 6.4). Een voorbeeld van een vindplaats uit de Romeinse tijd betreft een marskamp op de Veluwe bij Ermelo, dat als een min of meer vierkante walstructuur op het AHN zichtbaar is (afb. 6.5). Uit verschillende studies blijkt dat juist in bosgebieden deze overblijfselen nog gedeeltelijk zijn bewaard en als subtiel reliëf kunnen worden waargenomen.¹⁰⁹ Dit in tegenstelling tot landbouwpercelen, waar het oorspronkelijke microreliëf sterk is genivelleerd of volledig is verdwenen.

Vandaag de dag gebruiken archeologische bedrijven en overheidsinstanties het AHN standaard als bron van bureauonderzoek conform de eisen die de KNA aan dit onderzoek stelt. Maar ook na de fase van bureauonderzoek wordt het AHN regelmatig geraadpleegd, om bijvoorbeeld gegevens die zijn verzameld tijdens inventariserende onderzoeken of opgravingen, beter te begrijpen. Ook universiteiten zijn intensieve gebruikers van

het AHN. Vanuit de Universiteit Leiden is onder meer onderzoek gedaan naar geautomatiseerde beeldherkenning (*machine learning*) van onontdekte grafheuvels en andere archeologische verschijnselen op het AHN.¹¹⁰ De Rijksuniversiteit Groningen had een meerjarenproject gericht op het opsporen van laat-prehistorische raatakkers in zand-Nederland met behulp van het AHN.¹¹¹ Op verschillende locaties is kleinschalig veldwerk uitgevoerd om de op het AHN waargenomen dambordstructuren te identificeren als overblijfselen van wallen van prehistorische akkercomplexen.

Behalve voor het opsporen van vindplaatsen kent het AHN ook andere toepassingen binnen de Nederlandse archeologie. Enkele belangrijke daarvan worden hieronder besproken.

6.6.2 Landschapsreconstructie en -kenschets

Een toepassing van het AHN richt zich op het karakteriseren (kenschetsen) van het natuurlijke landschap en hiermee verbonden archeologische en/of historisch-geografische structuren en elementen. In opdracht van de provincie Gelderland is een atlas samengesteld van op LiDAR-gebaseerde digitale hoogtemodellen om het gebruik ervan bij overheidsorganisaties en instituten te bevorderen.¹¹² Met behulp van visualisatietechnieken zijn voor vijf timeslices

¹⁰⁹ Zie bijvoorbeeld Arnoldussen & Scheele 2014.

¹¹⁰ Verschoof-van der Vaart 2022; zie ook Lambers, Verschoof-van der Vaart & Bourgeois 2019; Verschoof-van der Vaart & Lambers 2019.

¹¹¹ Arnoldussen 2018, 2020; Arnoldussen & Scheele 2014; Leenders & Arnoldussen 2021.

¹¹² Dit onderzoek is uitgevoerd door ADC ArchoProjecten, zie Van der Zee, Zuidhoff & De Boer 2009; Van der Zee & Zuidhoff 2012.

beelden gemaakt van karakteristieke (landschaps)elementen. Ze zijn, in samenhang met historische en topografische kaarten en foto's, vervolgens beoordeeld en geïnterpreteerd. Ten behoeve van de interpretatie is tevens gebruikgemaakt van geomorfologische, historische en archeologische kenmerken. De toegepaste werkwijze vormt een waardevol instrument voor de analyse van op LiDAR gebaseerde hoogtebeelden en het toekennen van bepaalde eigenschappen aan (historische) landschappen. Deze landschapskenschets (*landscape characterisation*) verschaft waardevolle input voor archeologisch en historisch onderzoek. Ook kan de nieuw verkregen en uiteenlopende informatie worden gebruikt voor besluitvorming over de conservering van, zorg voor en ontwikkeling van cultureel erfgoed.

6.6.3 Archeologische monitoring

In de afgelopen jaren is het AHN voor archeologische monitordoeleinden zeer bruikbaar gebleken. Een recent voorbeeld daarvan is het project Monarch (2019-2021) van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE). In dit project stond het uitvoeren van een nulmeting van alle wettelijk beschermde rijksmonumenten gelegen op land in Nederland centraal.¹¹³ De nulmeting is uitgevoerd door BAAC in opdracht van de RCE en richtte zich primair op het vaststellen van de fysieke staat van de rijksmonumenten. Het bevatte twee onderdelen waarbij op complexniveau gegevens over de fysieke staat zijn verzameld: een vooronderzoek ter voorbereiding van het veldonderzoek en het veldwerk zelf door middel van visuele inspectie. Ook zijn boringen gezet op archeologische rijksmonumenten die niet zichtbaar zijn aan het maaiveld en gelegen in delen van Nederland waar holocene afzettingen aan of dicht aan het oppervlak liggen. Uit de evaluatie van het project blijkt dat informatie van het AHN (samen met gegevens afgeleid van bijvoorbeeld digitale luchtfoto's) op goede wijze sturing kan geven aan de uitvoeren werkzaamheden in het veld. Een voorbeeld is het opstellen van een adequaat boorplan van aan het maaiveld zichtbare rijksmonumenten, waarbij rekening wordt gehouden met reliëfkenmerken (vorm, wel of geen

afgegraven of overbouwde delen, etc.) van de hierin gelegen complexen.

Op basis van het zichtbare reliëf kan het AHN ook een waardevolle bron zijn voor het vastleggen en indien nodig corrigeren van administratieve begrenzingen van monumenten en de hierin gelegen complexen. Met laatstgenoemde verbeteringslag wordt bereikt dat op kaartmateriaal aangegeven contouren van monumenten en complexen (beter) overeenkomen met de werkelijke situatie in het veld. Deze werkwijze is vooral waardevol gebleken voor complexen die bij aanvang van het project als niet-begrensd waren aangemerkt. Dankzij een analyse van het AHN gevolgd door visuele veldinspectie zijn begrenzingen van diverse complexen, waaronder kasteelterreinen, grafheuvels en vliedbergen, nu nauwkeuriger bekend en op kaart vastgelegd.

6.6.4 Citizen science

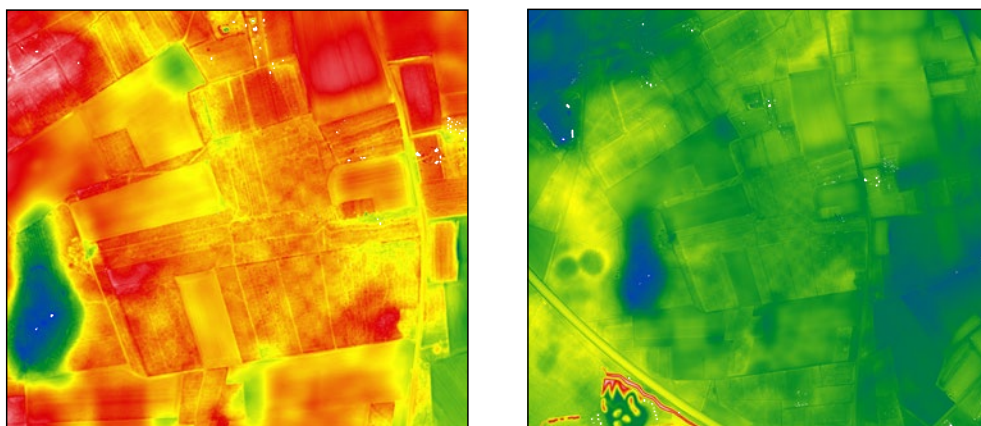
Een actuele ontwikkeling betreft de toepassing van het AHN in projecten met een grote mate van participatie van archeologische vrijwilligers en andere geïnteresseerden (burgerwetenschap, *citizen science*).¹¹⁴ Een belangrijk initiatief in dit verband is het *citizen science*-project Erfgoed Gezocht van de Universiteit Leiden in samenwerking met de provincie Gelderland en de Stichting Erfgoed Gelderland. Het project is in 2019 gestart en richtte zich op het opsporen van uiteenlopende archeologische fenomenen (grafheuvels, raatakkers, karrensporen, houtskoolmeilers en grindwinningskuilen) op de Veluwe met behulp van het AHN.¹¹⁵ Tweeduizend vrijwilligers hebben achter hun eigen computer digitaal de Veluwe afgespeurd op zoek naar in het oog springende (afwijkende) reliëfkenmerken die wijzen op de aanwezigheid van deze fenomenen. Daarmee is de archeologische dataset van de Veluwe in potentie sterk vergroot. De belangstelling hiervoor was dusdanig groot en de resultaten dermate positief, dat dit initiatief een vervolg heeft gekregen op de Utrechtse Heuvelrug.¹¹⁶ Ook voor andere delen van Nederland, waaronder Drenthe en Limburg, vinden voorbereidingen voor soortgelijke projecten plaats.

¹¹³ Mauro 2022.

¹¹⁴ Lambers, Verschoof-van der Vaart & Bourgeois 2019.

¹¹⁵ <https://www.universiteitleiden.nl/citizensciencelab/projecten/erfgoed-gezocht>.

¹¹⁶ <https://www.landschaperfgoedutrecht.nl/ik-wil-ontdekken/erfgoed-gezocht/>.



Afb. 6.6 Voorbeeld van een visualisatie met een dynamisch kleuren raster van het AHN3, gegenereerd door de AHN-viewer. Op de visualisatie links is het dambordpatroon van een raatakkercomplex te zien bij Riethoven in de Brabantse gemeente Bergeijk. Wanneer wordt uitgezoomd, is het regelmatige dambordpatroon niet meer te zien (visualisatie rechts). De reden hiervan is dat in het uitgezoomde gebied het verschil tussen de minimale en maximale waarde groter is. Daardoor worden de hoogteverschillen ter plaatse van het raatakkercomplex als het ware overstemd (bron: AHN3).

6.6.5 Overige toepassingen

Last but not least speelt het AHN inmiddels standaard een rol bij het opstellen van gespecificeerde archeologische verwachtingen, het actualiseren van gemeentelijke cultuurhistorische en/of archeologische inventarisatiekaarten, en bij het beoordelen van ruimtelijke plannen.¹⁷⁷ Een in 2018 opgestelde handleiding voor het vervaardigen van gemeentelijke archeologische inventarisatiekaarten maakt op meerdere plekken melding van het AHN. In deze handleiding wordt het AHN beschouwd als verplichte bron voor het onderscheiden van (archeologisch) relevante landschappelijke zones en voor het opsporen van archeologische vindplaatsen (grafheuvels, raatakkers, verkavelingen, verdedigingswerken, etc.).¹⁷⁸

6.7 Visualisaties

J.W. de Kort

Om de gebruiksmogelijkheden van het AHN te vergroten, kunnen visualisaties worden toegepast die ook voor archeologen van belang zijn. De AHN-viewer heeft een aantal standaardvisualisaties (*hillshade* en dynamisch en statisch kleuren raster voor het AHN2, AHN3 en AHN4).¹⁷⁹ Daarnaast is een aantal visualisaties te importeren in de viewer (*slope*, *aspect* en een

multidirectional hillshade). In deze paragraaf bespreken en tonen we de meerwaarde van het gebruik van visualisatietechnieken van het AHN3 voor archeologische prospectie. Dit doen we aan de hand van een voorbeeld van een raatakkercomplex bij Riethoven (gemeente Bergeijk).

6.7.1 Kleuren raster

Het AHN is een rasterbestand waarvan elke cel een (hoogte)waarde heeft. Zonder aanvullende opmaak zal het rasterbestand worden weergegeven in grijs tinten. Deze waarden kunnen door het toekennen van een kleuren raster anders gevisualiseerd worden. Als dit raster dynamisch is, kan – afhankelijk van de gekozen beeldgrootte (of zoomfactor) – het kleuren raster zich aanpassen aan de maximale en minimale waarde die zich binnen het beeld bevindt (afb. 6.6). Door in te zoomen kan men de verhouding tussen globale variatie en lokale variatie aanpassen. Vervolgens kan een *local histogram stretch* over het zichtbare deel van het raster worden gemaakt. Hiermee kan de lokale variatie in reliëf worden verduidelijkt door de kleurenschaal te verdelen over de minimale en maximale waarde die binnen het kaartbeeld voorkomt. Voor raatakkercomplexen en andere grote archeologische structuren is deze werkwijze (verder inzoomen) vaak nodig om ze als zodanig te kunnen herkennen op de AHN-beelden.

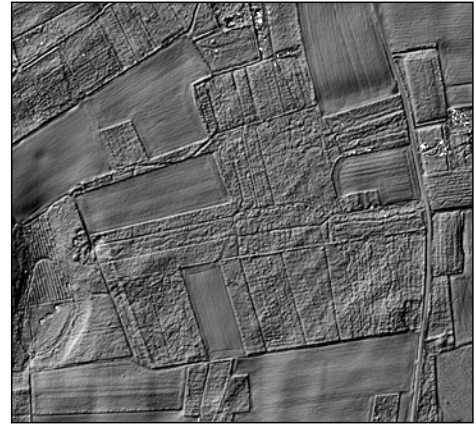
¹⁷⁷ Zie bijvoorbeeld de gemeentelijke cultuurhistorische inventarisatiekaart van de gemeente Venlo uit 2015.

¹⁷⁸ Anoniem 2018.

¹⁷⁹ <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>.

6.7.2 Hillshade

Hillshade (of *shaded relief*, in Nederlands: schaduwwreliëf) is een vorm van visualisatie die zonder al te veel moeite leesbaar is en door iedereen eenvoudig te gebruiken (afb. 6.7). Met een kleurenlegenda wordt alleen het verschil in hoogte gevisualiseerd, maar met een *hillshade* worden ook andere aspecten van het reliëf verbeeld, zoals de hellingshoek (hoe steil de helling is) en de hellingsrichting (in welke richting ze helt). *Hillshade* kan worden gemanipuleerd door de hoek van de lichtval en de hoogte van de lichtbron te variëren. Lineaire vindplaatsen, zoals wegen, wallen en greppels, kunnen moeilijk zichtbaar zijn wanneer hun oriëntatie overeenkomt met de hoek van de lichtval. Dit is te ondervangen door meerdere *outputs* te maken, met verschillende oriëntaties van de lichtval. Deze zijn in één beeld te combineren (*multidirectional* en PCA).¹²⁰ Kleine hoogteverschillen worden beter zichtbaar met een lagere plaatsing van de lichtbron.



Afb. 6.7 Voorbeeld van een *hillshade*-visualisatie van het AHN3. Het patroon van de raatakkers dat goed zichtbaar is op de visualisatie met een dynamisch kleuren raster (afb. 6.6), is hierop aanzienlijk minder goed herkenbaar. De wallen met een oriëntatie haaks op de lichtval (noordoost-zuidwest) zijn wel zichtbaar. De wallen waarvan de oriëntatie overeenkomt met de hoek van de lichtval (noordwest-zuidoost) blijven onzichtbaar (bron : AHN3).

6.7.3 Slope

Met *slope* wordt de hellingshoek (hoe steil de helling is) van een terrein bedoeld. In aanvulling op *shaded relief* is *slope* een goede visualisatie in sterk reliëfrijke terrein. *Slope* of gradiënt kan uitgedrukt worden in graden of in percentages. Het verschil tussen verdiepte delen en hogere delen is met deze visualisatie echter moeilijk te onderscheiden (afb. 6.8).



Afb. 6.8 Voorbeeld van een *slope*-visualisatie. Het regelmatige patroon van het raatakkercomplex dat goed zichtbaar is op de visualisatie met een dynamisch kleuren raster (afb. 6.6), is op deze *slope*-visualisatie veel minder goed herkenbaar. Het greppelpatroon in de bospercelen is wel beter herkenbaar (bron: AHN3).

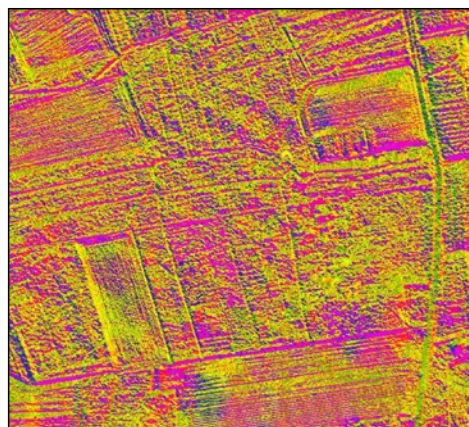
6.7.4 Aspect

Met *aspect* wordt de hellingsrichting (in welke richting de helling helt) bedoeld. Met de functie *aspect* wordt de richting van de maximale mate van verandering in waarde van elke cel naar de omliggende cellen bepaald en in een kleurenschema gevisualiseerd (afb. 6.9). Voor het opsporen van prehistorische raatakkers en andere archeologische fenomenen is deze vorm van visualisatie niet erg bruikbaar.

6.7.5 Local relief model

Voor de meeste bureauonderzoeken van kleine gebieden zal de AHN-viewer voldoende zijn. Maar in gebieden met veel (natuurlijk) reliëf kan het moeilijk zijn om bepaalde archeologische fenomenen op te sporen. Daarom is het aan te raden de AHN-gegevens te bewerken in een

¹²⁰ *Principal component analysis* (PCA) is een methode om complexe, multivariate datasets te vereenvoudigen.



Afb. 6.9 Voorbeeld van een *aspect*-visualisatie. Het regelmatige vakkenpatroon van de raatakker dat goed zichtbaar is op de dynamisch kleurenrastervisualisatie (afb. 6.6), is ook op deze visualisatie waar te nemen, maar niet als een heel duidelijk dambordpatroon (bron: AHN₃).

GIS-programma of visualisaties te genereren met een GIS-tool. Zo wordt het mogelijk gegevens zelf nog weer anders te visualiseren. Een van deze visualisatietechnieken is *trend removal* of het *local relief model*.

Een bewerking van het AHN met het *local relief model* heeft als voordeel dat de visualisatie minder wordt beïnvloed door het reliëf van het natuurlijke en/of door de mens ingerichte landschap.¹²¹ Het onderliggende reliëf wordt als het ware vlakgetrokken, waardoor kleine lokale verschillen beter zichtbaar worden. De filterradius moet, afhankelijk van de mate van reliëf, worden aangepast. Vooral complextypen op hellingen of complextypen met een lineaire of andere langwerpige vorm die zich uitstrekken over een reliëfrijk landschap, zijn met deze visualisatie goed op te sporen (afb. 6.10).

¹²¹ Hesse 2010.



Afb. 6.10 Voorbeeld van een visualisatie met het *local relief model*, gegenereerd met behulp van Relief Visualization Toolbox (RTV). Het dambordachtige patroon van het raatakkercomplex is eenvoudig te herkennen. Ook wanneer wordt uitgezoomd (rechts), blijven de wallen van de raatakkers zichtbaar. Dit in tegenstelling tot de visualisatie met het dynamische kleurenraster in afb. 6.6 (bron: AHN₃).

6.8 Casestudy's LiDAR

In deze paragraaf worden drie casestudy's gepresenteerd waarin hoogtegegevens van het maaiveld zijn gebruikt voor het opsporen en verder in kaart brengen van archeologische verschijnselen. Daaronder bevinden zich twee Vlaamse voorbeelden. Voor beide casestudy's is gebruikgemaakt van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (DHMV). Dit product is vergelijkbaar met het AHN en kent vooralsnog twee versies. Van de eerste generatie van het DHMV (DHMV1) laten de brondata een precisie toe van rasters van 4 m². De tweede versie van het digitale hoogtemodel (DHMV2) heeft een rasterresolutie van 0,25 m², vele malen preciezer dan de eerste versie.

Hilversum-Hoerneboegse Heide. Prehistorische raatakkers en grafheuvels op bewerkte AHN-beelden

J.W. de Kort (RCE)

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Noord-Holland
 Gemeente: Hilversum
 Plaats: Hilversum
 Toponiem: Hoerneboegse Heide
 RD-coördinaten: 139.750/468.100
 ARCHIS-onderzoekmelding: 54778
 Rijksmonumentnummers: 45545 en 45546
 Grondgebruik: heide

Kernpublicatie

Theunissen & De Kort 2014

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: stuwwallen
 Landschapszone: hellingen
 De Hoerneboegse Heide maakt onderdeel uit van de Utrechtse Heuvelrug. Dit stuwwallenlandschap van het Gooi is ontstaan tijdens de voorlaatste ijstijd, het saalien, toen het landijs vanuit het oosten de sedimenten opstuwde. Door latere erosie zijn in de flankdelen smeltwaterafzettingen ontstaan en op sommige plaatsen

is ook nog een dunne laag keileem aanwezig. Tijdens de laatste ijstijd zijn pakketten dekzand afgezet, met als resultaat een glooiend landschap.

Geraadpleegde beelden

AHN2

Opnamejaar: 2010

Deze gegevens zijn in eerste instantie bewerkt door R. Wortelboer. Vanwege het reliëfrijke karakter van het gebied dat grotendeels bepaald wordt door de stuwwal, zijn kleine hoogteverschillen en flauwe hellingen (in dit geval een raatakker of *Celtic field*) nauwelijks te zien. De meest gebruikte methode is dat een schaduwreliëf (*hillshade*) wordt berekend, eventueel gecombineerd met een kleurschakering. Om het flauwe reliëf zichtbaar te maken, is het AHN-bestand bewerkt, zodat lokale hoogteverschillen wel duidelijk gevisualiseerd kunnen worden (*local relief model*, afb. 6.11).

Wat zien we?

Naast het raatakkercomplex is op de visualisatie van het AHN2 de tankgracht aan de zuidzijde van Hilversum te zien, naast bundels karrensporen en natuurontwikkeling in de vorm van stroken geplagde heide (afb. 6.12).

De aanwezige grafheuvels zijn in deze visualisatie minder goed herkenbaar. Vanwege hun, in vergelijking tot de raatakkers, kleine omvang en scherpe begrenzing van het reliëf van de heuvellichamen worden ze weergegeven als zwarte punten. Ze zijn beter te herkennen op een visualisatie door middel van schaduwreliëf (afb. 6.13).

Wat is de archeologische interpretatie?

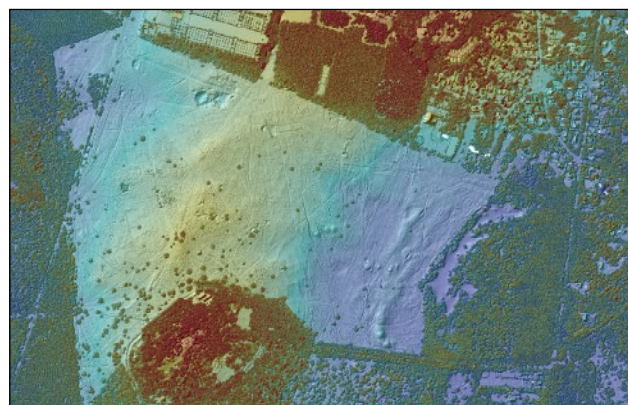
Door het gebied van de Hoerneboegse Heide met het *local relief model* te visualiseren, werd een dambordvormige patroon zichtbaar en zo kwam een raatakkercomplex aan het licht. De andere verschijnselen (de grafheuvels, karrensporen en tankgracht) waren op de *hillshade*-bewerking zichtbaar en al bekend.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

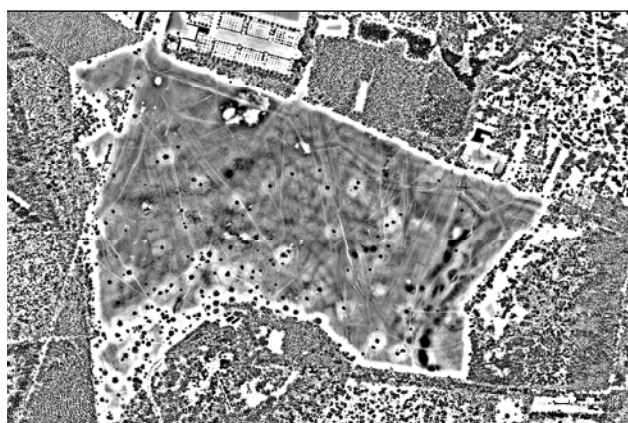
De wallen van de raatakker en de delen daartussen zijn onderzocht door middel van booronderzoek. Met de veldtoets is aangetoond dat er inderdaad een prehistorisch akkersysteem op de Hoerneboegse Heide aanwezig is. Uit het boren werd duidelijk dat op de locatie van de



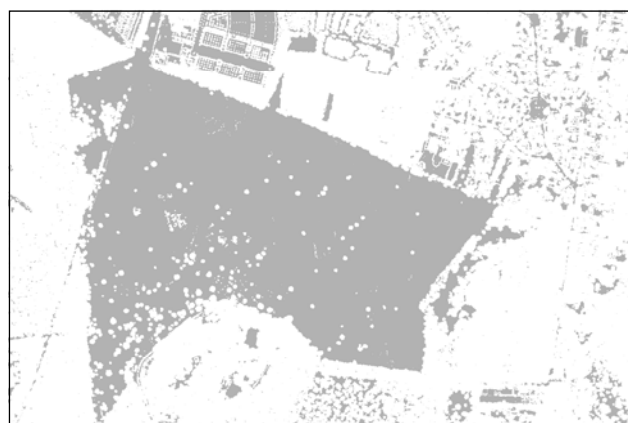
a



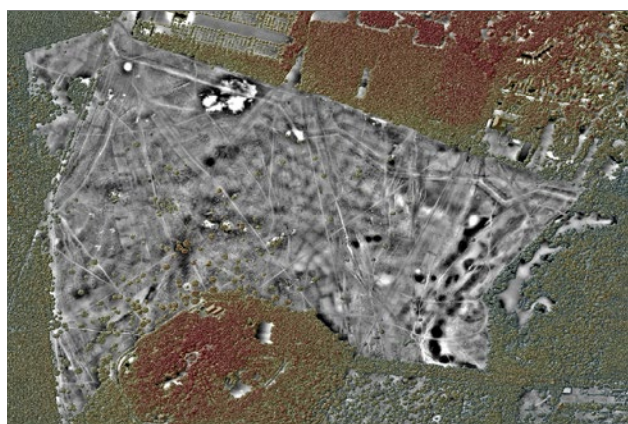
b



c

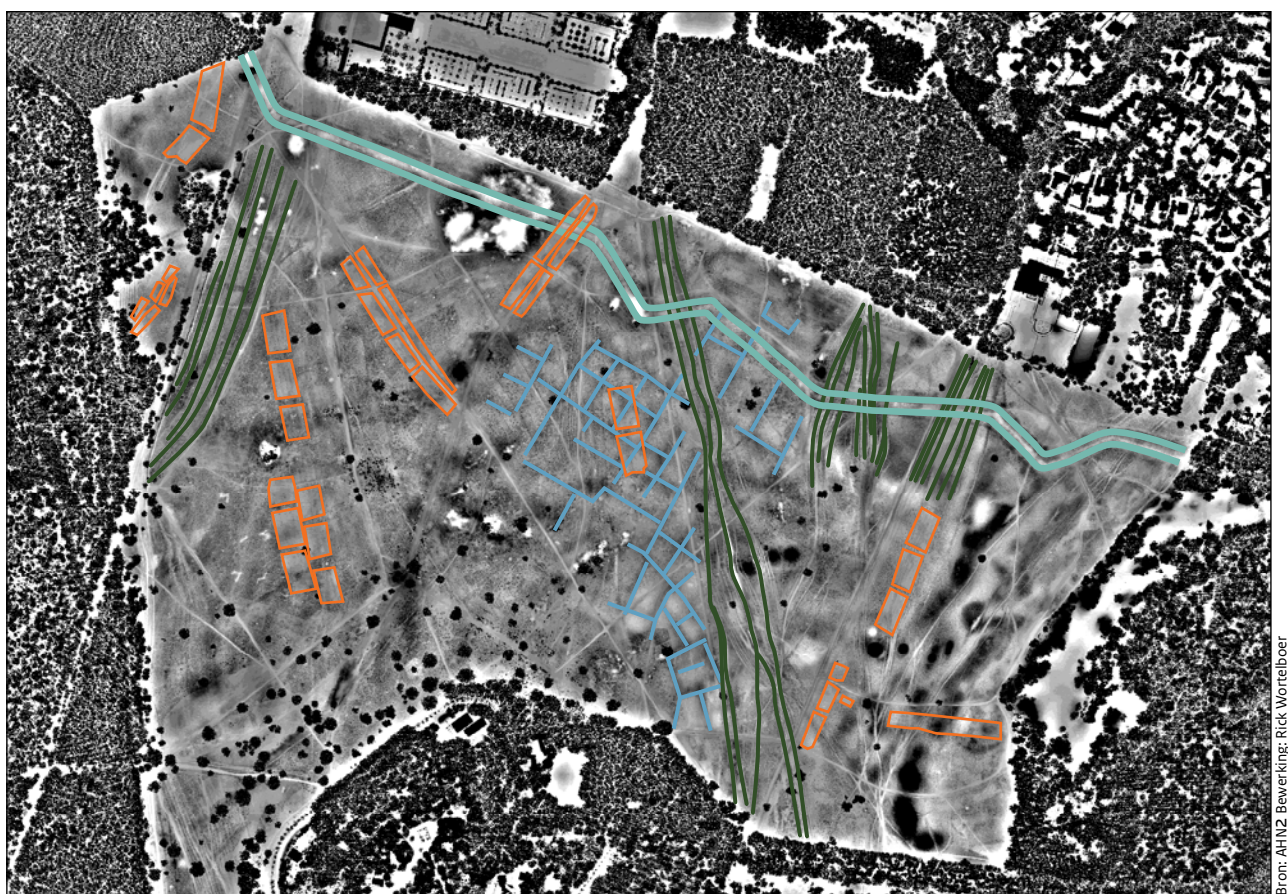


d



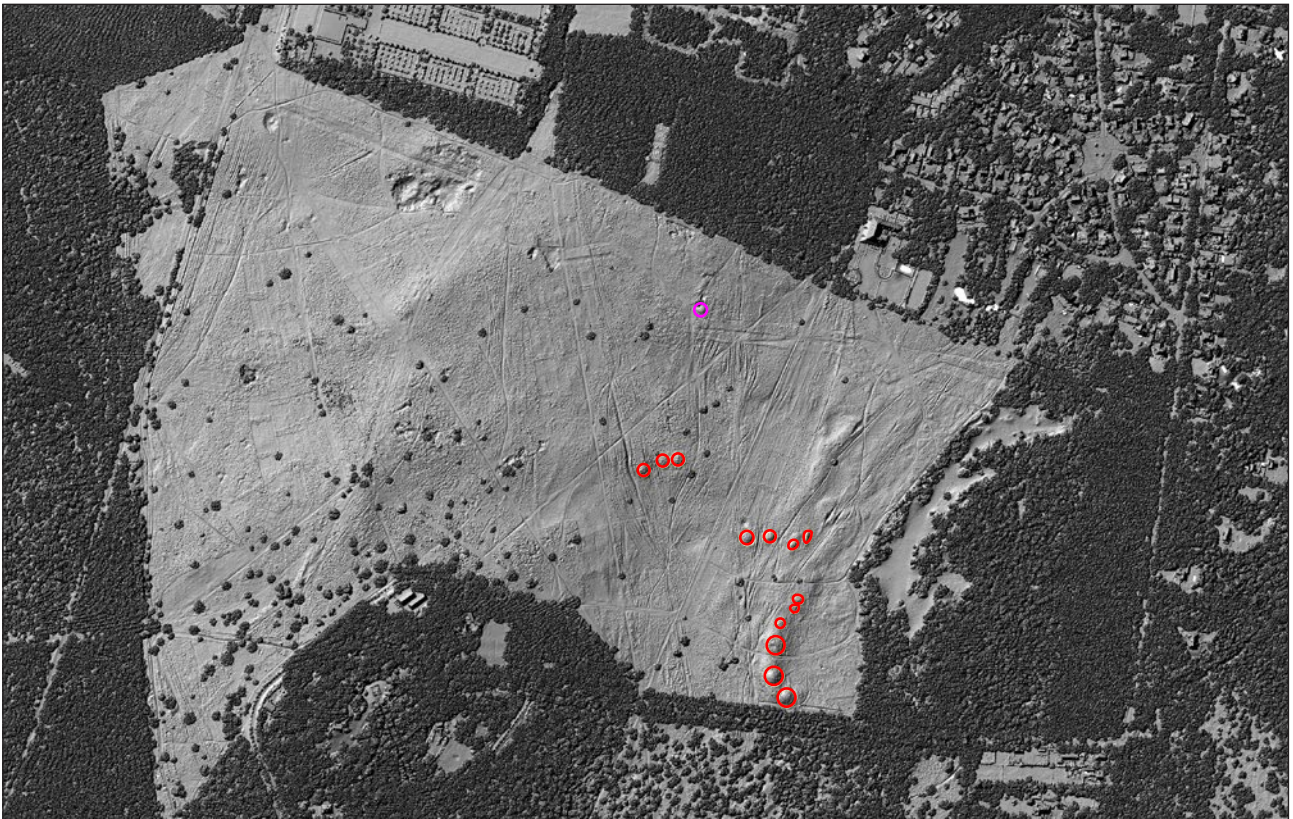
e

Afb. 6.11 Verschillende bewerkingen van het AHN2 leveren verschillende beelden op: a bewerking schaduwreliëf; b bewerking kleurenschakering; c de relatieve hoogteberekeningen; d gebieden met flauwere hellingen; e het eindresultaat met de relatieve hoogteverschillen (bron: Theunissen & De Kort 2014, afb. 12).



 Antitankgracht
  Bundels karrensporen
  Afgeplagde heide
  Wal raatakker

Afb. 6.12 Bewerkt beeld van het AHN2 van de Hoorneboegse Heide, ten zuiden van Hilversum (door R. Wortelboer). Op het onderste beeld zijn de herkende sporen en patronen voorzien van een interpretatie (bron: Theunissen & De Kort 2014, afb. 2).



Afb. 6.13 Een uitsnede van het AHN2 van de Hoorneboegse Heide, met de twee grafheuvelgroepen. De roze heuvel is de meest noordelijke (bron: Theunissen & De Kort 2014, afb. 9).

verwachte wallichamen een begraven bodem aanwezig is. Dit pakket bevat kleine fragmenten handgevormd aardewerk dat zeer waarschijnlijk uit de ijzertijd dateert. De visuele inspectie wees daarnaast uit dat er op de wandelpaden op bepaalde afstanden grindconcentraties aanwezig zijn. Na het inmeten bleek dat deze samenhangen met de wallichamen die op de AHN-beelden zichtbaar zijn. Monsters van sediment afkomstig uit en onder de wallichamen bleken uitsluitend houtskoolfragmenten te bevatten.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Afhankelijk van het soort reliëf dienen verschillende visualisaties gemaakt te worden, zodat zoveel mogelijk informatie in het reliëf herkend kan worden. Eén vorm van visualisatie, bijvoorbeeld met een dynamisch kleuren raster, kan ertoe leiden dat zaken over het hoofd worden gezien, die met een andere visualisatie wel zichtbaar gemaakt kunnen worden. Daarbij zal goed nagedacht moeten worden over de eigenschappen van het terrein (mate van reliëf) en de verwachte archeologische sporen en structuren (vorm, omvang, wel of geen ophogingen). In dit geval ging het om een stuwvallandschap waarvan de helling met een *local relief model* is aangepast, zodat kleine lokale verschillen beter zichtbaar werden.
- Verder was het nuttig om datgene wat zich op het AHN2 aftekent, in het veld te markeren en zo te proberen dat te correleren aan verschijnselen aan het oppervlak. Wallen van een raat-akkercomplex zijn in een bebost gebied of een landschap met hoge heide vaak niet zichtbaar, maar de paden laten vaak wel een regelmatig, golvend reliëf zien. Op de Hoorneboegse Heide waren de (voormalige) wallen herkenbaar aan de grindconcentraties op regelmatige afstand van elkaar.

Leuven-Heverleebos. Herinventarisatie van prehistorische grafheuvels

E. Meylemans (Agentschap Onroerend Erfgoed, Brussel)

Administratieve gegevens

Land: België
 Provincie: Vlaams-Brabant
 Gemeente: Leuven/Oud-Heverlee
 Plaats: Oud-Heverlee
 Toponiem: Heverleebos
 Kaartblad 1:25.000: niet van toepassing
 Coördinaten: 172.284/170.141 (Lambert72);
 latitude 50.841250 N, longitude 4.685136 E
 (decimale graden)
 ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
 Grondgebruik: bos

Kernpublicaties

Baeté *et al.* 2009; Meylemans, De Bie & Goeminne 2021

Landschappelijke ligging

Archeologische Landschappenkaart van Nederland: niet van toepassing
 Leemstreek. Ecoregio van de zuidoostelijke heuvelzone. Boven-Dijlebekken
 Het Heverleebos ligt op een licht hellend leem-plateau, ten zuiden van Leuven. Dit plateau helt naar het zuiden sterk af naar het dal van de Vaalbeek. Ten westen daarvan ligt het stroomdal van de Dijle.

Geraadpleegde opnames

Verwerking met *multidirectional hillshade* van LiDAR-beelden (rastercelgrootte 0,25 m²) van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (2020). Opnameperiode: winter 2014.

Wat zien we?

Het Heverleebos en het nabijgelegen Meerdaalwoud vormen samen een van de grootste boscomplexen van Vlaanderen. Doordat deze gebieden reeds lang als bos in gebruik zijn, bevatten ze een voor Vlaanderen uniek en goed bewaard archeologisch bodemarchief, met bekende sites van de prehistorie tot in de nieuwe tijd. Vooral sinds het ter beschikking komen van het eerste Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (DHMV) in de periode 2004-2005

was er vernieuwde aandacht voor dit erfgoed. Zo is er in het kader van een masterthesis een archeologische inventaris opgesteld en zijn er studies verschenen over grote antropogene circulaire en ovale depressies en erosiegeulen. In 2009 verscheen het boek *Miradal*, dat een overzicht biedt van dit erfgoed in Heverleebos en Meerdaalwoud.¹²²

Uit deze overzichten blijkt dat er in het Heverleebos rond 1900 minstens 24 grafheuvels bekend en gelokaliseerd waren. Op basis van de eerste generatie van het DHMV konden in 2005 elf ervan herkend en gelokaliseerd worden. Ondertussen kwam een nieuwe versie van het digitaal hoogtemodel (DHMV2) beschikbaar. Dit instrument maakt het mogelijk topografische terreinmodellen op te stellen met een raster-resolutie van 0,25 m², vele malen preciezer dan het eerste DHMV, waarvan de brondata een precisie toelieten van rasters van 4 m². Met behulp van het nieuwe DHMV2 blijken nu nagenoeg alle in de negentiende eeuw bekende grafheuvels te kunnen worden gelokaliseerd. Daarnaast werden op basis van deze nieuwe versie nog een aantal niet eerder op oude kaarten aangeduide grafheuvels herkend, wat het aantal (vermoedelijke) grafheuvels op 29 brengt (afb. 6.14 en afb. 6.15). Naast het identificeren van deze grafheuvels maakte deze hogeresolutieverwerking het ook mogelijk in grote mate van detail de staat van deze grafheuvels en eventuele schade te herkennen (bijvoorbeeld rijsporen, plunder- en andere kuilen, etc.).

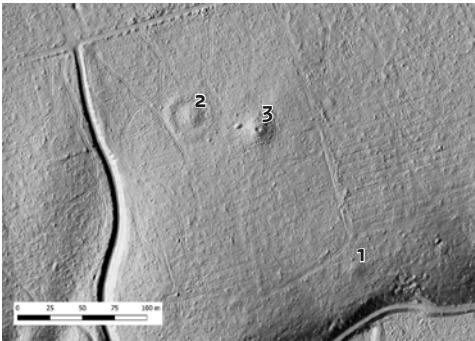
Wat is de archeologische interpretatie?

De heuvels vormen wellicht de kernen van verschillende grafvelden, die zich tussen en rond de heuvels uitstrekken. De juiste omvang van deze sites is nog niet duidelijk en kan alleen via verder terreinonderzoek vastgesteld worden. In de eerste plaats wijst dit op een enorm uitgestrekt, rijk en goed bewaard prehistorisch cultuurlandschap, waarin naast de funeraire sites ook sporen van nederzettingen, landbouw, etc. kunnen worden verwacht.

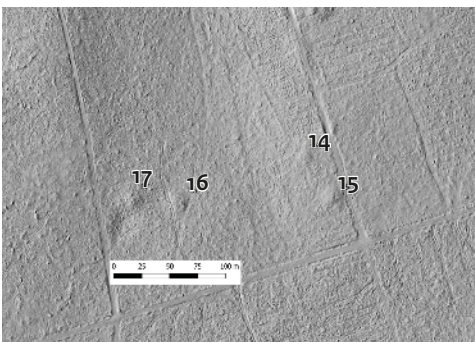
Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Het agentschap Onroerend Erfgoed inspecteerde deze locaties op 5 februari 2019, 25 juni 2019 en 15 januari 2020 en besteedde daarbij ook aandacht aan de impact van het (huidige) bosbeheer op de aanwezige relictten. Deze

¹²² Baeté *et al.* 2009.



Afb. 6.14 Enkele grafheuvels (nummer 1 t/m 3) in het Heverleebos op een beeld in *multidirectional hillshade*. Heuvel 2 is een ringwalheuvel. Naast de heuvels zijn duidelijk de sporen van recent bosbeheer zichtbaar, alsook een plundergat in heuvel 3 (bron: agentschap Informatie Vlaanderen & agentschap Onroerend Erfgoed).



Afb. 6.15 Enkele grafheuvels (nummer 14 t/m 17) in het Heverleebos op een beeld in *multidirectional hillshade*. Heuvel 16 is aangetast aan beide zijden door rijsporen in het kader van bosbeheer (bron: agentschap Informatie Vlaanderen & agentschap Onroerend Erfgoed).

terreinbezoeken toonden aan dat de relicten, mits kennis bestaat van hun aanwezigheid dankzij het DHMV₂, duidelijk herkenbaar zijn in het landschap, maar ook dat (sub)recent bosbeheer een duidelijke impact heeft gehad op hun huidige toestand (afb. 6.16 en afb. 6.17).

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Deze (her)inventarisatie van de grafheuvels van het Heverleebos toont het enorme potentieel aan van de hogeresolutieverwerking van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen voor onderzoek en beheer van het archeologisch erfgoed in Vlaanderen. In de eerste plaats wijst dit voor het Heverleebos op een enorm uitgestrekt, rijk en goed bewaard prehistorisch cultuurlandschap, waarin naast de funeraire sites ook sporen van nederzettingen, landbouw, etc. kunnen worden verwacht.
- Met de bosbeheerders bezochten medewerkers van het agentschap Onroerend Erfgoed een aantal van de monumenten ter plaatse om de problematiek van het beheer te bespreken. Dit legde een aantal problemen en aandachtspunten bloot, maar leverde vooral ook enkele denkrichtingen op voor toekomstig beheer. De grafheuvels van het Heverleebos en hun omgeving kenden nagenoeg nog geen verder evaluerend terreinonderzoek. In de toekomst moet zeker aandacht worden besteed aan dergelijk onderzoek om de begrenzing van het gebied met grafheuvels nader te bepalen en om de grafheuvels te karakteriseren en te dateren.



Afb. 6.16 Zicht op de ringwalheuvel, heuvel 2 (foto: agentschap Onroerend Erfgoed).



Afb. 6.17 Impact van rijsporen op de ringwal van heuvel 2 (foto: agentschap Onroerend Erfgoed).

Kanne-Caestert.

Een oppidum uit de ijzertijd

E. Liagre (BAAC Vlaanderen)

Administratieve gegevens

Land: België
 Provincie: Limburg
 Gemeente: Riemst
 Plaats: Kanne
 Toponiem: Caestert
 Coördinaten: 242.800/167.200 (Lambert72),
 latitude 50.807831 N, longitude 5,685433 E
 (decimale graden)
 Locatie: het plateau ligt in het grensgebied van
 Vlaanderen, Wallonië en Nederland.
 CAI-locaties:
 - 21130 [hoogtenederzetting Plateau van Caestert
 en mergelgroeven | Inventaris Onroerend
 Erfgoed](#)
 - 304848 [hoogtenederzetting Plateau van
 Caestert en mergelgroeven | Inventaris
 Onroerend Erfgoed](#)
 Grondgebruik: bos en grasland

Kernpublicaties

Liagre 2020, 2022

Overige literatuur

Roosens 1975a, 1975b, 1976; Verhoeven 2008,
 2011

Landschappelijke ligging

Het hooggelegen Plateau van Caestert is gevormd
 door insnijding door de rivieren de Maas en de
 Jeker. De ondergrond bestaat uit kalksteen
 ('Limburgse mergel') met daarbovenop latere
 afzettingen van zand, maasgrind en löss.

Geraadpleegde beelden

LiDAR-beelden en Digitaal Hoogtemodel
 Vlaanderen II (2015)
 Inwinningsjaren: tussen 2013 en 2015
 Ruwe LiDAR-gegevens in LAS-formaat zijn
 omgezet naar een digitaal terreinmodel (DTM),
 waarna verschillende visualisatiemethodes zijn
 gebruikt. Die beelden zijn eerst geïnterpreteerd
 door de uitvoerder en daarna zijn de resultaten
 vergeleken met de uitkomsten van eerder
 uitgevoerd onderzoek. In de jaren zeventig heeft
 H. Roosens, de toenmalige directeur van de
 Nationale Dienst voor Opgravingen, in het

noorden en zuiden van het plateau dertien
 sleuven gegraven, gericht op de wal- en gracht-
 structuren van de versterkte nederzetting.¹²³ In
 2008 is een aantal van deze oude sleuven
 opnieuw opgelegd en onderzocht.¹²⁴

Wat zien we?

De visualisaties in een GIS-omgeving (QGIS) zijn
 geïnventariseerd en geïnterpreteerd, als eerste
 stap om de aanwezigheid vast te stellen van
 verstoorde gebieden, zoals mergelgroeves,
 industrieterreinen en anderszins. Deze zijn als
 zodanig aangemerkt, getekend en in een aparte
 vectorlaag aangegeven (afb. 6.18). Daarnaast zijn
 ook de opgravingsleuven en werkputten in dit
 overzicht geplaatst.
 Opvallend is de aanwezigheid van een groot
 aantal dolines. Dat zijn ronde depressies in het
 landschap, ontstaan door de oplossing van kalk
 in de ondergrond.
 Vervolgens zijn de visualisaties op anomalieën
 beoordeeld, waarbij een onderscheid is gemaakt
 tussen negatieve (holle) en positieve (bolle)
 elementen (afb. 6.19). Ook deze zijn in een
 afzonderlijke vectorlaag getekend. Lineaire
 reliëfverschillen als opgeworpen wallen (bol) en
 uitgegraven grachten (hol) zijn kenmerkend voor
 dit soort versterkingen uit de ijzertijd. De
 resultaten werden getoetst aan luchtfoto's om
 tot een betere interpretatie te komen en werden
 daarna vergeleken met de uitkomsten van
 voorgaand onderzoek.

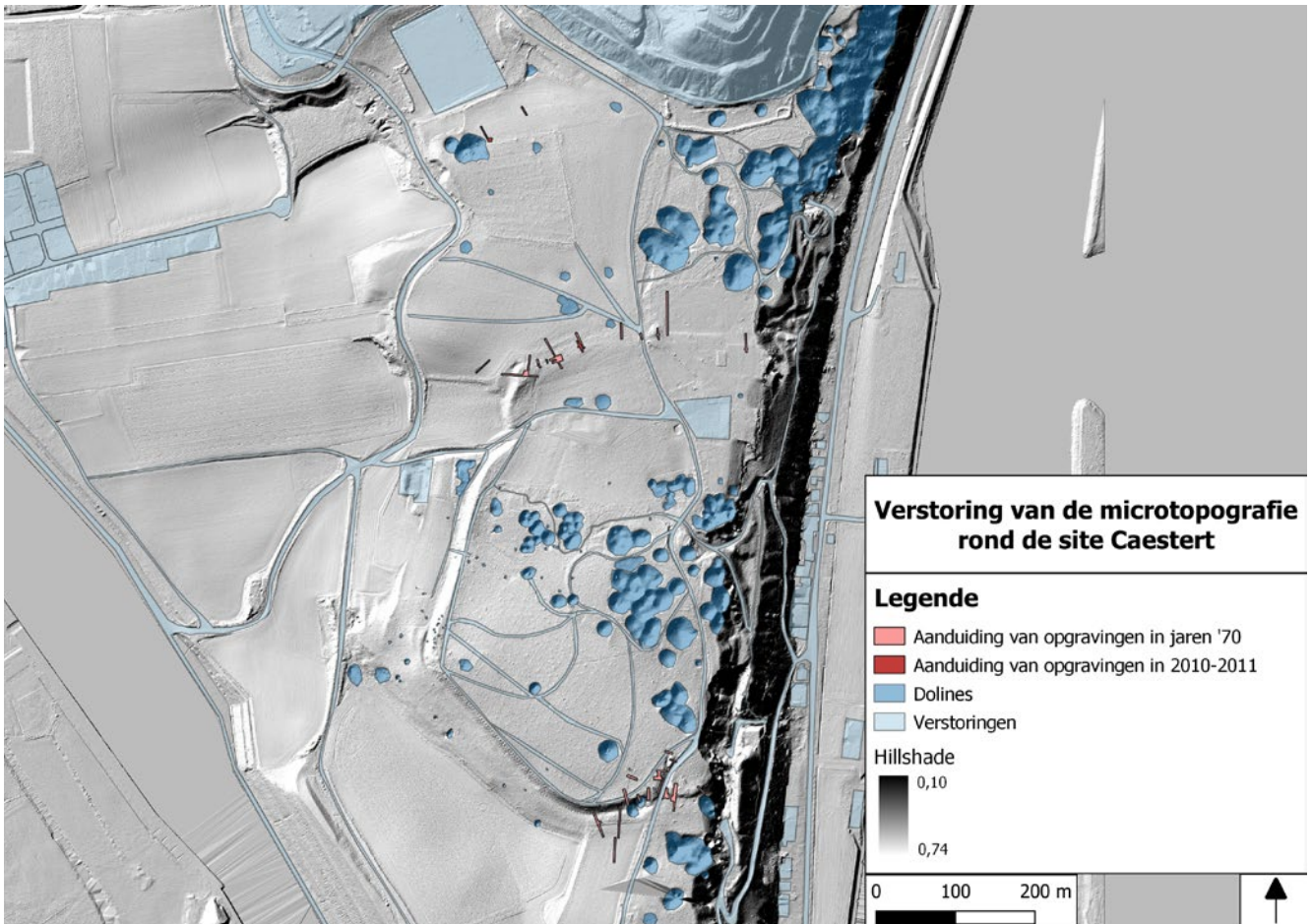
Wat is de archeologische interpretatie?

Het Plateau van Caestert was door het
 voorgaande onderzoek door Verhoeven al goed
 in beeld gebracht en geduid.¹²⁵ De relatie met de
 door hem herkende archeologische verschijn-
 selen was dan ook makkelijk te leggen.
 In het zuiden van het plateau is een wal-en-
 grachtstructuur (A) duidelijk waarneembaar
 (afb. 6.19). De wallen buigen in het zuidoosten af
 naar binnen toe en vormen een ingang van het
Zangentor-type (B). Een steilrand lijkt parallel te
 lopen aan de zuidelijke verdedigingswerken.
 Mogelijk vormt deze een onderdeel van de
 verdedigingswerken. Een tweede, wat kleiner
 gracht bevindt zich nog wat zuidelijker (letter C).
 Vermoedelijk gaat het om een erosiegeultje,
 maar een verband met de verdedigingswerken
 wordt niet uitgesloten. Wat de achtergrond is
 van de rechthoekige structuur (D) is vooralsnog
 onbekend. De verdedigingswerken lopen door in

¹²³ Roosens 1975a, 1975b, 1976.

¹²⁴ Verhoeven 2008, 2011.

¹²⁵ Verhoeven 2008, 2011.



Afb. 6.18 Hillshade-beeld van het Plateau van Caestert met daarop aangegeven recente verstoringen (groeves, industrieterreinen, etc.), natuurlijke dolines alsook de opgravingslocaties van voorgaand onderzoek (bron: Liagre 2020, fig. 52).

noordelijke richting met enkele onderbrekingen door paden en een erosiegeul, maar de greppel die door Verhoeven is vastgesteld, is niet waargenomen (E).¹²⁶ Een soortgelijke ingang naar het zuidoosten van het plateau bevindt zich aan de westzijde ter hoogte van de huidige Caestertweg (F). Ten westen van deze ingang bevindt zich een steile heuvelrug, die door Roosens als een mogelijke 'voorburcht' of veekraal is geïnterpreteerd.¹²⁷ Verder naar het noorden ligt een steile heuvelrug (G) die over lijkt te gaan in een wal. De elementen komen grotendeels overeen met de locatie van een wal en palissade, zoals aangegeven door Verhoeven, maar de vraag rijst waarom er twee verschillende verdedigingswerken zouden zijn gebouwd. Bovendien is er de wal- en greppelstructuur (H) die het plateau in tweeën deelt. Hoewel de grachtvullingen in de

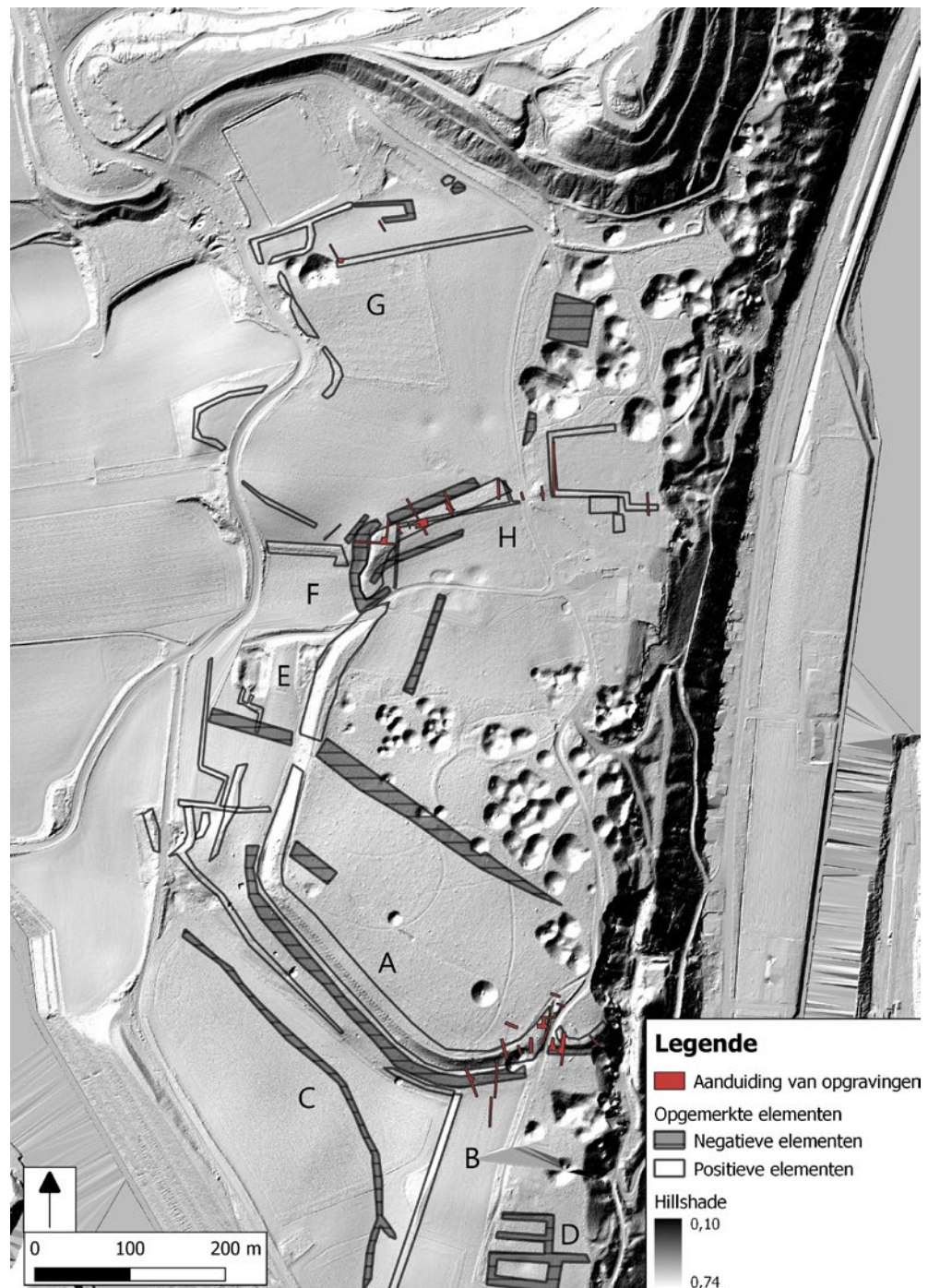
middeleeuwen zijn gedateerd, is niet uit te sluiten dat de wal (en mogelijk ook de greppel) een oudere oorsprong hebben en uit de ijzertijd dateren. Als dat zo is, zou de noordelijke zone, binnen de verdedigingswerken (G), een veekraal kunnen zijn of een deel van een nederzetting.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Er heeft geen recent veldwerk plaatsgevonden om de waargenomen verschijnselen van deze studie te toetsen. Het uitgebreide waarderingsonderzoek dat door RAAP is uitgevoerd (2008-2011) – met proefsleuven, geofysisch onderzoek, metaaldetectie en veldinspectie – mag wel als een belangrijke, eerdere validatieslag worden beschouwd.

¹²⁶ Verhoeven 2011, 21-80.

¹²⁷ Roosens 1975a, 1975b, 1976.



Afb. 6.19 Hillshade-beeld van het Plateau van Caestert met daarop herkende negatieve en positieve elementen alsook de opgravingslocaties van voorgaand onderzoek (bron: Liagre 2020, fig. 53).

Wat zijn belangrijke leermomenten?

Onderzoek op basis van de LiDAR-beelden heeft een aantal voordelen. Het stelt de onderzoeker in staat om:

- anomalieën te relateren aan en/of te combineren met eerder opgegraven of onderzochte zaken;
- potentiële sporen te identificeren die niet eerder werden opgemerkt in archeologisch onderzoek.

Ook bieden LiDAR-beelden de mogelijkheid om beter inzicht te krijgen in:

- de verschillende gebruikslagen van een deel van een (plateau)landschap;
- de plaats van de site in het landschap;
- verstoorde zones in het onderzochte gebied en daarmee in potentieel interessante zones voor verder archeologisch onderzoek.

7 Remote sensing-beelden in combinatie met andere bronnen

Meer zien: de meerwaarde van het combineren van kaartbronnen

In de afgelopen twee decennia zijn steeds meer (kaart)bronnen van archeologisch bureauonderzoek digitaal via internet beschikbaar gekomen. Het raadplegen en analyseren van deze bronnen, eventueel samen met analogoos kaartmateriaal, wordt standaard toegepast in bovengenoemd bureauonderzoek. Het biedt een eerste inzicht in de landschappelijke, archeologische en andere cultuurhistorische eigenschappen van een onderzoeks- of plangebied. Deze informatie kan vervolgens worden gebruikt voor het opstellen van de gespecificeerde archeologische verwachting, het sluitstuk van archeologisch bureauonderzoek. Geografische informatiesystemen (GIS-software) zijn bij uitstek geschikt om digitale kaartbronnen samen te brengen en in samenhang te analyseren. Door bronnen, in de vorm van kaartlagen, over elkaar heen te projecteren, kan het gebruik ervan worden geoptimaliseerd. De eerste inzichten van het bureauonderzoek kunnen op deze wijze worden versterkt, aangepast of aangevuld met nieuwe informatie. Voorwaarde voor goed gebruik in een GIS is wel dat de digitale

bronnen een ruimtelijke component hebben; ze moeten gegeoreferenciert zijn. Het op efficiënte wijze combineren van ruimtelijke bronnen kan ook voor archeologische remote sensing aanzienlijke meerwaarde hebben. Het biedt de mogelijkheid om bevindingen van de analyse van luchtfoto's en sensorbeelden te toetsen aan kaartmateriaal en andere ruimtelijke data, en waar nodig aan te vullen. Daarmee kunnen op remote sensing-beelden waargenomen *crop marks*, *soil marks* en/of *shadow marks* archeologisch beter worden geïdentificeerd. Wel moet er rekening mee worden gehouden dat op historische topografische kaarten vooral relatief jonge cultuurhistorische objecten, elementen en structuren staan afgebeeld. Het ontbreken van een 'match' tussen bijvoorbeeld op luchtfoto's waargenomen *crop marks* en een op historische kaarten afgebeeld gebouw betekent niet dat de *crop marks* geen archeologische betekenis hebben. Mogelijk bevinden zich op de betreffende locatie de resten van een gebouw dat (beduidend) ouder is dan de periode waarin de historische kaarten zijn gemaakt, of is destijds de keuze gemaakt om het gebouw niet af te beelden.

7.1 Inleiding

Een belangrijk kenmerk van hedendaags archeologisch bureauonderzoek is het gebruik van een brede waaier aan digitale bronnen. Daarbij gaat het voor ruimtelijke data vooral om het Actueel Hoogtebestand Nederland, luchtfoto's en satellietbeelden, maar ook om landschapskaarten, archeologische kaarten en historische topografische kaarten.¹²⁸ In dit hoofdstuk staat het combineren van remote sensing-beelden met genoemde kaartbronnen en hiermee verbonden kwaliteitsaspecten centraal. Aan de hand van twee voorbeelden wordt de meerwaarde van GIS-software besproken voor het in samenhang analyseren en presenteren van digitale kaartlagen, inclusief remote sensing-beelden. Het hoofdstuk sluit af met drie casestudy's waarin luchtfoto's en satellietbeelden zijn gebruikt in combinatie met andere typen kaartbronnen.

7.2 Remote sensing-beelden en kaartbronnen

7.2.1 Landschapskaarten

Bekende voorbeelden van landschapskaarten zijn de Archeologische Landschappenkaart van Nederland, geologische kaarten, geomorfologische kaarten en bodemkaarten. Deze kaarten zijn voor heel Nederland beschikbaar op schaal 1:50.000, terwijl voor specifieke regio's of onderzoeksgebieden vaak ook meer gedetailleerd kaartmateriaal kan worden geraadpleegd. Een goed voorbeeld hiervan zijn de bodemkaarten schaal 1:5000, 1:10.000 of 1:25.000 die tussen 1955 en 1965 zijn vervaardigd door de Stichting voor Bodemkartering voor diverse ruilverkavelingsgebieden in Nederland. In het kader van archeologisch bureauonderzoek en

¹²⁸ Volgens de kwaliteitseisen van de KNA, Protocol 4002 Bureauonderzoek.

het sluitstuk hiervan, de gespecificeerde archeologische verwachting, zijn vooral gedetailleerde kaarten van belang, bijvoorbeeld met een schaal van 1:10.000 of 1:5000, of met een 25 cm-grondresolutie, dat wil zeggen lokale of regionale kaarten met een voor archeologisch onderzoek relevant schaalniveau. Voor het combineren van remote sensing-beelden met landschapskaarten (bijvoorbeeld om de aardkundige context van vindplaatsen beter vast te stellen) verdienen kaarten met een vergelijkbare schaal of grondresolutie verreweg de voorkeur. Daarbij kan het gaan om al bestaande landschapskaarten of nieuwe kaarten van een bepaald onderzoeks- of plangebied die zijn vervaardigd op basis van archeologisch veldwerk (in de meeste gevallen verkennend en/of karterend booronderzoek).

7.2.2 Archeologische kaarten in Archis

Het raadplegen van archeologische (verspreidings)kaarten met bekende vindplaatsen tijdens archeologisch bureauonderzoek vindt in de regel via Archis plaats, het digitale informatiesysteem van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Archis is een belangrijke en actuele informatiebron om een eerste inzicht te krijgen in de aanwezigheid, aard, datering en verspreiding van archeologische vindplaatsen in een bepaald onderzoeks- of plangebied. Op remote sensing-beelden zichtbare tekens (*marks*) van mogelijk archeologische betekenis kunnen worden getoetst aan de hand van gegevens van Archis. Evenals bij historische topografische kaarten (zie onder) kan er sprake zijn van positieve en negatieve ‘matches.’ In het eerste geval kunnen gegevens van Archis worden gebruikt voor het (nader) duiden (aard, datering, complextype, etc.) en vastleggen van op luchtfoto’s en/of satellietbeelden waargenomen tekens. Bij een negatieve ‘match’ biedt Archis geen toetsingskader. Nader archiefonderzoek, het raadplegen van het AHN, historische kaarten en/of validatie in de vorm van een visuele veldinspectie of inventariserend veldonderzoek dienen in dat geval meer duidelijkheid te verschaffen over de archeologische betekenis van de waargenomen anomalieën.

7.2.3 Historische topografische kaarten

Sinds het begin van de negentiende eeuw worden topografische kaarten van het grondgebied van Nederland gemaakt. Belangrijke kenmerk van historische topografische kaarten is dat ze gedetailleerd, uniform en betrouwbaar zijn. Bovendien zijn ze landsdekkend of omvatten ze een flink deel van Nederland. Voor sommige, kleinere gebieden bestaat ouder en eveneens gedetailleerd kaartmateriaal, al dan niet in gepubliceerde vorm. Die kaarten tonen meestal bezittingen, rechten of grenzen. Voor archeologen is deze laatste categorie van historische kaarten ook relevant vanwege de hoge mate van detail en de vaak betrouwbare weergave van historische objecten, elementen en structuren. Voorbeelden hiervan zijn de kaartreeksen van Jacob van Deventer (ca. 1575) en Blaeu (ca. 1650).

Beide categorieën historische kaarten kunnen van grote betekenis zijn voor het duiden van op remote sensing-beelden waargenomen vegetatieverkleuringen (*crop marks*) of andere anomalieën van (mogelijk) archeologische betekenis. Hiervan is sprake als er een positieve ‘match’ bestaat in de locatie van enerzijds een anomalie zichtbaar op een luchtfoto of satellietbeeld (bijvoorbeeld *crop marks* in de vorm van een rechthoek), en anderzijds van een op een historische kaart afgebeeld vlakelement (bijvoorbeeld een stenen huis uit de late middeleeuwen). In dat geval wordt de archeologische betekenis van de betreffende *crop marks* bevestigd door informatie van historisch kaartmateriaal.

Een negatieve ‘match’ betekent niet automatisch dat de waargenomen *crop marks* geen archeologische betekenis hebben. Historische kaarten laten een momentopname zien. In algemene zin zijn alleen op dat moment bestaande en daarmee relatief jonge cultuurhistorische elementen en structuren (uit de nieuwe tijd) afgebeeld. Bovendien leert de ervaring dat niet alle relevante objecten en elementen werden weergegeven tijdens de vervaardiging van historische kaarten. Het gaat vaak om een selectie. Ook hebben historische topografische kaarten een relatief geringe tijpsdiepte van 200 jaar of minder. Mogelijk is er sprake van een bouwwerk of greppelstructuur

met een (aanmerkelijk) oudere datering dan de geraadpleegde historische kaart(en) en is dat de reden dat ze op deze kaart(en) niet staan afgebeeld. De gebruiker moet er dus rekening mee houden dat het overzicht van cultuurhistorische objecten en elementen (in de vorm van op de kaart afgebeelde punten, lijnen en vlakken) onvolledig is.

Een ander aandachtspunt betreft de (geometrische) nauwkeurigheid van historische kaarten ten opzichte van de huidige topografie. Bij historische kaarten moet altijd worden gekeken naar het doel waarvoor de kaart is gemaakt. Dat geeft een eerste indicatie over het weergegeven dan wel weglaten van bepaalde cultuurhistorische elementen en structuren. Ook ouderdom en maker spelen een rol bij de keuze voor een bepaalde kaart voor wat betreft de betrouwbaarheid van de erop weergegeven elementen en structuren. Militaire en (pre)kadastrale kaarten hebben vaak de grootste precisie.

Een voorbeeld zijn historische perceelbegrenzingslijnen (lijnelementen). Als op een gedigitaliseerde historische kaart wordt ingezoomd, kan het zijn dat de hierop zichtbare perceelbegrenzingslijnen niet exact samenvallen met actuele perceelgrenzen. De reden kan zijn dat het een kadastrale kaart betreft, waarop de perceelsgrenzen het eigendomsrecht of de belastingopbrengst weergeven, en niet noodzakelijk de veldafscheidingen door bijvoorbeeld hagen of wallen. Ook kan een perceel kadastraal zijn gesplitst of zijn samengevoegd.

Nauwkeurighedsverschillen in (militair-)topografische kaarten kunnen zijn ontstaan door verschillen in schaal en nauwkeurigheid van de bronnen die ten grondslag liggen aan (afzonderlijke delen van) deze kaarten.

7.3 Het combineren van kaartbronnen in GIS

7.3.1 Inleiding

In deze paragraaf staat het combineren van verschillende typen kaarten in een GIS-omgeving centraal. De afkorting GIS staat voor geografisch informatiesysteem. Hiermee kunnen gegevens over geografische objecten (zogenoemde geo-informatie) worden opgeslagen,

beheerd, bewerkt, geanalyseerd, geïntegreerd en gepresenteerd. De kracht van een GIS is het combineren en visualiseren van ruimtelijk informatiebronnen in de vorm van digitale kaartlagen. Door middel van een GIS kunnen kaarten van een specifiek gebied of een specifieke locatie eenvoudig en op overzichtelijke wijze zichtbaar worden gemaakt en met elkaar worden vergeleken (afb. 7.1). Een belangrijk hulpmiddel daarbij is het (gedeeltelijk) transparant maken van een of meer kaartlagen (zie onder). Ook kunnen extra kaartlagen en bijbehorende data in de loop der tijd worden toegevoegd. Het inwinnen van actuele ruimtelijke informatie kan plaatsvinden via veldwerk, maar ook met behulp van bijvoorbeeld satellieten of drones.

7.3.2 Kwaliteitsaspecten GIS

De toepassing van GIS-overlay is een belangrijk en vaak noodzakelijk hulpmiddel om ruimtelijke informatie van verschillende kaartlagen optimaal met elkaar te kunnen vergelijken. Voor alle bronnen geldt in principe dat de op kaart afgebeelde informatie locatie gebonden moet zijn. Een goede georeferentie (bestaande uit x- en y-coördinaten en eventueel ook een z-coördinaat) is dus een noodzakelijke voorwaarde. Onder georefereren wordt het vastleggen van een object in een ruimtelijk referentiesysteem op het aardoppervlak verstaan. Voorbeelden hiervan zijn het stelsel van meridianen en parallellen (latitude-longitudestelsel) op wereldniveau of het Rijksdriehoekstelsel (RD-stelsel) binnen Nederland. Als voorbeeld: een luchtfoto of satellietbeeld van een specifiek object of gebied is voorzien van georeferentie als de digitale elementen via een coördinaatsysteem met hun locatie in de ‘echte’ wereld zijn verbonden. Alleen luchtfoto’s of satellietbeelden die voorzien zijn van georeferentie, kunnen in een GIS-omgeving worden gebruikt.¹²⁹ Dit is van belang voor de exacte plaatsbepaling in het Rijksdriehoekstelsel en daarmee voor validatie in het veld en integratie met ander, van georeferentie voorzien beeldmateriaal, zoals het AHN en historisch kaartmateriaal. Voor het gebruik van een luchtfoto in een rapport – bijvoorbeeld ter illustratie – is georeferentie in de regel niet nodig.

¹²⁹ De gebruiker kan natuurlijk de gebruikte luchtfoto’s of satellietbeelden ook zelf georefereren. Dat geeft een extra controlestap op nauwkeurigheid.

Huidige topografie

Cultuurhistorie en archologie

Topografie 1832

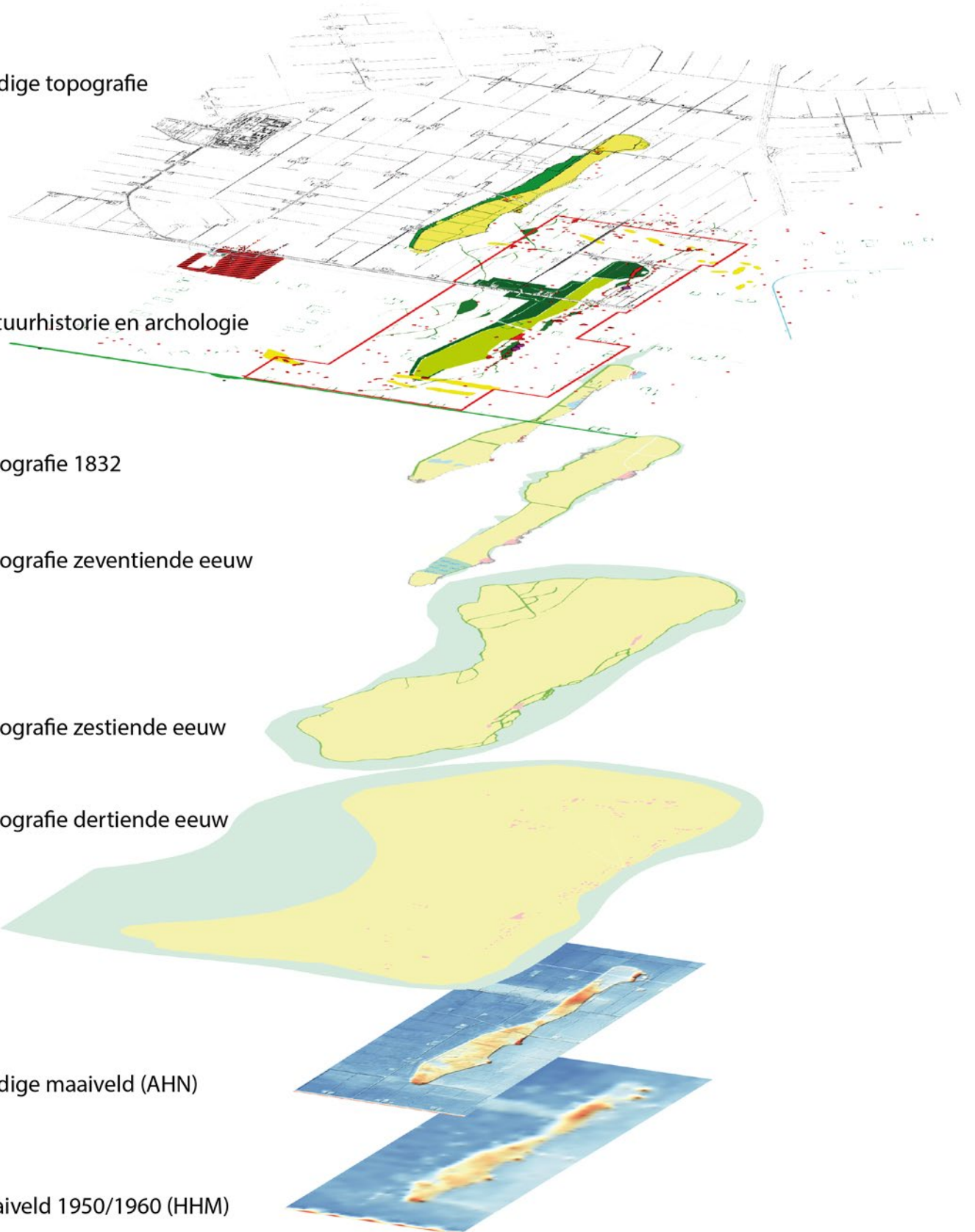
Topografie zeventiende eeuw

Topografie zestiende eeuw

Topografie dertiende eeuw

Huidige maaiveld (AHN)

Maaiveld 1950/1960 (HHM)



Afb. 7.1 Combineren van kaartlagen voor werelderfgoedste Schokland in een GIS (bron: M. Kosian).



Afb. 7.2 Schermafbeelding van de viewer 'Limburg 1804-2018', opgezet door Hartmann. Te zien is een uitsnede van de Tranchotkaart rond 1804 – deels transparant tegen de achtergrond van de moderne topografie – van het gebied ter hoogte van Roermond en Horn aan weerszijden van de Maas (bron: www.lgog.nl).

7.3.3 Voorbeelden

In deze paragraaf bespreken we twee voorbeelden van gecombineerd gebruik van digitale kaartbronnen met behulp van een GIS. Beide voorbeelden hebben gemeen dat ook het AHN is opgenomen. In het eerste voorbeeld uit Limburg gaat het ook om satellietbeelden.

Limburgse kaarten digitaal

Het eerste voorbeeld betreft een online te raadplegen en te gebruiken tool die is gemaakt voor een groot deel van het grondgebied van de provincie Limburg.¹³⁰ In deze viewer zijn zes historische kaarten, satellietbeelden, het AHN en vijf hedendaagse kaarten als digitale kaartlagen opgenomen (tabel 7.1).

Door middel van het aanklikken van blokjes (kaartbronnen) in de balk boven in het scherm kunnen twee kaarten worden geselecteerd die vervolgens exact over elkaar worden geprojecteerd (afb. 7.2). Met behulp van een schuifje centraal in de balk kan de transparantie van een van de geselecteerde kaarten worden ingesteld. In de bijhorende publicatie worden aan de hand van een voorbeeld, kasteel Oost ten noorden van Eijsden, de toepassingsmogelijkheden van de applicatie en de wijze van combineren van

Tabel 7.1 Overzicht van kaartbronnen die zijn opgenomen in de digitale cartografietool voor Limburg en die daar over elkaar heen kunnen worden geprojecteerd (Hartmann 2018).

Kaarttype	Naam en jaar/periode van verschijnen kaart
Landschapskaarten	bodemkaart
	geomorfologische kaart
	AHN
Historische kaarten	AHN schaduw
	AHN kleur
	Tranchotkaart uit 1804
	kadastrale Minuutplans van 1832/1843
	Netteplans van rond 1840
Hedendaagse topografische kaarten	Topografisch Militaire Kaart van rond 1850 inclusief een ingekleurde versie
	Bonnekaart uit het begin van de twintigste eeuw
	Top10 2005
	Kadaster 2005
Satellietbeelden	Open Street Maps
	Bing

kaartlagen inzichtelijk gemaakt.¹³¹ Deze tool verschaft een goed beeld van veranderingen in de lay-out van het kasteel en zijn directe omgeving gedurende de periode 1804-2018.

De specifiek voor de provincie Limburg ontwikkelde tool is niet alleen van belang voor historisch onderzoek, maar vooral ook voor het heden-

¹³⁰ https://lgog.nl/themas/landschapsgeschiedenis/digitale-cartografie_geraadpleegd_juli_2022; Hartmann 2018.

¹³¹ Hartmann 2018.



landschappelijke elementen

- rivierduin
- terp
- historische dijk

elementen op de kadastrale minuut (1832)

- bebouwing
- palendijk

Afb. 7.3 Kaart met landschappelijke elementen van de werelderfgoed site Schokland, gecombineerd met de kadastrale minuut uit 1832 en hierop zichtbare cultuurhistorische elementen (bebouwing en palendijk) (bron: M. Kosian).

daagse landschaps-, monumenten- en erfgoedbeheer. Ontwikkelaar van de tool Jan Hartmann schrijft hierover: ‘Vanwege de grote mate van detail en precisie waarmee oude kaarten over de huidige situatie kunnen worden gedrapeerd en via internet kunnen worden opgevraagd voor ieder gewenst punt ontstaan nu prachtige mogelijkheden om cultureel landschappelijk erfgoed in het heden te integreren en exploitabel te houden.’¹³²

Historisch geografisch informatiesysteem Schokland

Het tweede voorbeeld van gecombineerd gebruik van digitale kaartlagen in een GIS-omgeving heeft betrekking op de werelderfgoed site Schokland. Dit voormalige eiland in de Zuiderzee maakt sinds de drooglegging van de Noordoostpolder in 1942 deel uit van het vasteland van de tegenwoordige provincie Flevoland. Ten behoeve van onderzoek van het historische landschap en een zorgvuldige omgang met de aardkundige en cultuurhistorische waarden daar heeft de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed een historisch geografisch

informatiesysteem (HGIS) ontwikkeld.¹³³ In dit systeem zijn kaartlagen en datasets opgenomen, gegroepeerd naar vijftien thema's (waaronder archeologie, cultuurhistorische elementen, bodemgegevens en geomorfologische gegevens). Ze kunnen in samenhang worden bekeken, geanalyseerd en geïnterpreteerd. AHN1, AHN2 en AHN3 en het historisch hoogtemodel Nederland maken eveneens deel uit van het systeem. Door middel van integratie van verschillende kaartbronnen en datasets (*multi-layered approach*) zijn verscheidene chronologische reconstructies van Schokland gemaakt. Ze geven inzicht in ontwikkelingen door de tijd in bijvoorbeeld landschappelijke elementen, historische bebouwing en andere cultuurhistorische elementen, waaronder terpen en dijken (afb. 7.3). In het HGIS is het AHN specifiek gebruikt als basis van het monitoren van klink, en voor het bepalen van de specifieke ligging van cultuurhistorische elementen als (deels verdwenen) terpen en dijken in het huidige landschap. In het informatiesysteem zijn geen luchtfoto's of satellietbeelden opgenomen.

¹³² Hartmann 2018, 69.

¹³³ Van Lanen, Van Beek & Kosian 2022.

7.4 Casestudy's remote sensing in combinatie met andere bronnen

Alkmaar-Oudorperpolder.
Toegangsweg tot kasteel de Nieuwburg
N. de Jong-Lambregts (gemeente Alkmaar) met medewerking van Saricon BV.

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Noord-Holland
 Gemeente: Alkmaar
 Plaats: Alkmaar
 Toponiem: Oudorperpolder
 Rijksmonumentnummer: 45037
 RD-coördinaten: 113.247/516.950
 ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
 Rijksmonumentnummers: 45036 en 45037
 Grondgebruik: grasland

Kernpublicatie

Lambregts & Gruben 2020

Overige bronnen

Kaart van Simon Eikelenberg uit 1708
 Kadastrale minuut van 1821

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: strandvlakten
 Landschapszone: duinen en strandwallen
 Het onderzoeksgebied is gelegen in de Oudorperpolder. Vroeger werd de polder aan de noord- en zuidzijde begrensd door twee meren, die in later tijd zijn ingepolderd. In de dertiende eeuw is hier al sprake van een verbindingsweg, de Munnikenweg, richting West-Friesland. In die tijd werd gesproken van 'gebroken land'. De huidige interpretatie is dat sommige delen van de polder wellicht in bepaalde jaargetijden drassig zijn geweest.

Geraadpleegde beelden

RAF-luchtfoto's
 Opnamejaar: 1943, 1944, 1956
 Opnameseizoen: divers
 Type opname: overboord

Luchtfoto's (digitaal, kleur) Google Earth
 Opnamejaar: divers
 Opnameseizoen: divers
 Type opname: overboord

AHN-data
 AHN3, 0,5 m
 Weergave: hillshade

Satellietbeelden
 Opnamejaar: 2018
 Opnameseizoen: zomer (juli-augustus)
 Type opname: TripleSat 80 cm, RGB

Wat zien we?

Op de satellietbeelden (afb. 7.4) uit de periode juli-augustus 2018 is – ongeveer vanaf de toegang tot het kasteel de Nieuwburg in het weiland direct ten zuidwesten ervan – een verdiepte lijn te zien die in zuidwestelijke richting naar de Munnikenweg loopt. Op de luchtfoto's uit de Tweede Wereldoorlog (afb. 7.5) is deze lijn ook duidelijk te herkennen.¹³⁴ Op de AHN3-hillshade-weergave is ook nog enig reliëf zichtbaar (afb. 7.6). Met behulp van de ruwe AHN3 0,5 m-data is met behulp van de 3J's-tool in QGIS een 3D-model gemaakt (afb. 7.7). Met deze tool kan het verticale reliëf worden opgerekt, waardoor het microreliëf meer nadruk krijgt. Op deze manier kunnen kleine hoogteverschillen beter in kaart gebracht worden. Op het 3D-model is een langgerekte verhoogde structuur aanwezig die dwars door het weiland tussen de Munnikenweg en het kasteel loopt.

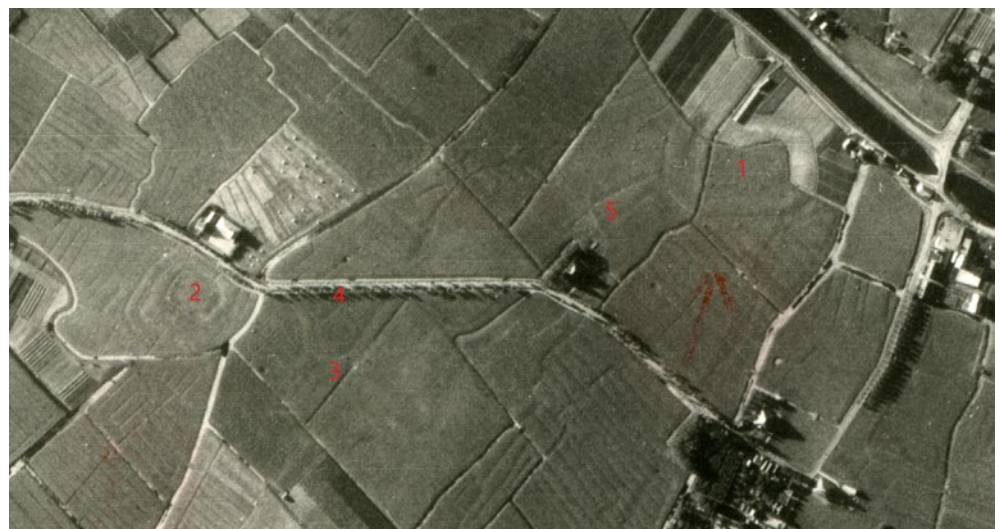
Wat is de archeologische interpretatie?

Met het oog op de archeologische interpretatie is het nodig kort iets te vermelden over de Oudorperpolder. In de dertiende eeuw vormde dit gebied een belangrijke schakel tussen het strandwallengebied van Kennemerland en de drassige landen van West-Friesland, met name ook omdat precies tussen deze twee gebieden of regio's een oost-west georiënteerde doorgangsroute tussen twee grote meren, het Vroonermere en het Zwijnsmeer, aanwezig was (afb. 7.8). Dit is ten dele het tracé van de huidige Munnikenweg, al is dat in het derde kwart van de negentiende eeuw flink veranderd doordat een groot deel van de oorspronkelijke krommingen in de weg is rechtgetrokken (afb. 7.9). Deze route vormde dus de invalsroute in het gebied van de West-Friezen. Tot voor kort werd ervan uitgegaan dat graaf

¹³⁴ Saricon BV heeft ondersteuning geboden met betrekking tot de georeferencierte luchtfoto's uit de Tweede Wereldoorlog



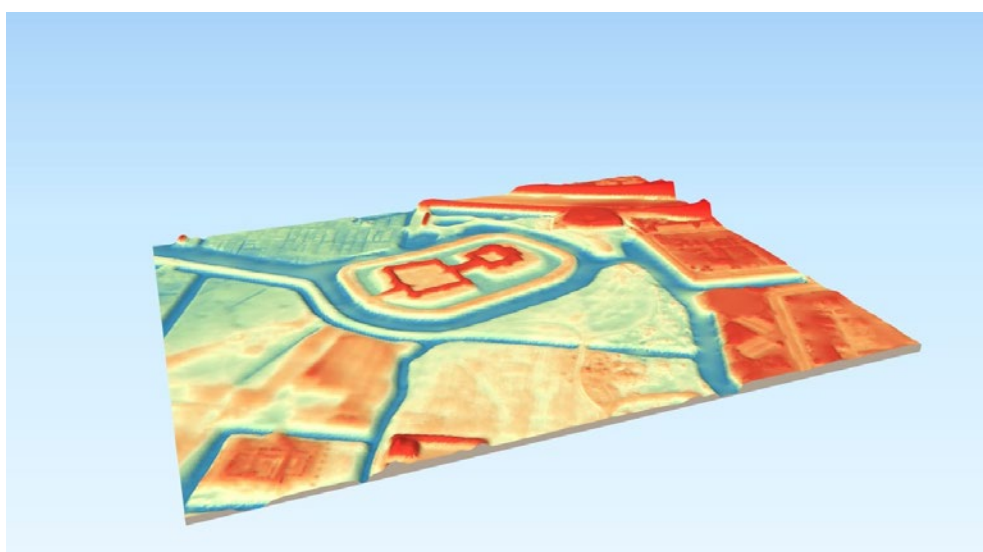
Afb. 7.4 Uitsnede uit het satellietbeeld van juli-augustus 2018. Rechtsboven zijn de contouren van kasteel de Nieuwburg te zien. Direct ten zuidwesten van de huidige toegangsweg tot dit kasteel is in het weiland een duidelijke lijn zichtbaar in zuidwestelijke richting. Mogelijk is dit een deel van de oude toegangsweg. Linksonder is het terrein van kasteel de Middelburg te zien, dat aan de noordzijde begrensd wordt door de Munnikenweg. Deze weg kan in de afbeelding schuin in oostelijke richting worden vervolgd (bron: www.satellietdataportaal.nl).



Afb. 7.5 Uitsnede uit een luchtfoto van de Royal Air Force (RAF) uit 1943. Op de foto was door de Engelsen al een rode pijl gezet bij de resten van kasteel de Nieuwburg (nr. 1). Helemaal midden links (nr. 2) zijn de resten van kasteel de Middelburg duidelijk waar te nemen, evenals het oude verloop van de Munnikenweg (nr. 3) in het rechts hiervan gelegen weiland. Let op de ronde versterking (nr. 4) die precies in de oksel van de kronkel van het verloop van deze weg te zien is (onder het cijfer 4). Centraal op de foto staat een boerderij en links (nr. 5) van deze boerderij is duidelijk een reliëf te zien dat in de richting van de linkerkant van het kasteelterrein loopt. De bovenkant van de foto is gericht op het noorden (bron: Kadaster D/842_3067)



Afb. 7.6 Uitsnede uit AHN3. Ten zuidwesten van het kasteelterrein van de Nieuwburg, rechtsboven in de afbeelding, is een in zuidwestelijke richting verlopende, lineaire structuur door het weiland in de richting van de Munnikenweg zichtbaar (bron: Actueel Hoogtebestand Nederland).

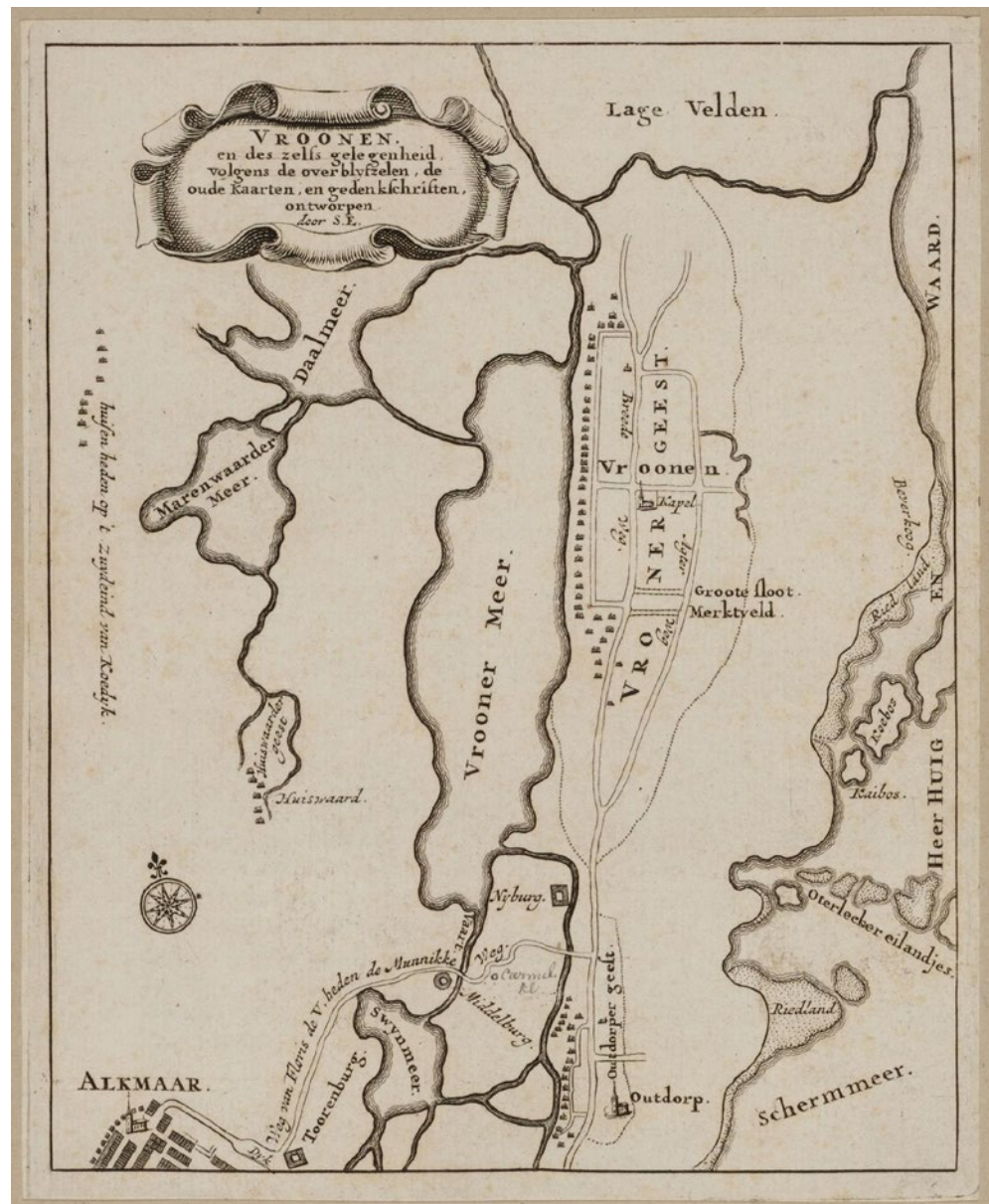


Afb. 7.7 Driedimensionaal model op basis van de AHN3 0,5 m-data. Duidelijk zijn centraal in het model in donkerrood de contouren van kasteel de Nieuwburg te zien. In het weiland links ervan is duidelijk de verhoogde toegangsweg te zien, maar ook talrijke andere structuren.

Floris V deze weg in 1272 had aangelegd, maar nadere studie naar de bronnen leert dat wellicht zijn vader, rooms-koning Willem II, de grondlegger van deze weg was. Mogelijk kent de weg een nog hogere ouderdom en heeft Floris V de weg aangepast.

In deze polder waren twee kastelen aanwezig die naar men aannam door Floris V waren opgericht. Inmiddels heeft onderzoek uitgewezen dat in ieder geval kasteel de Nieuwburg al een midden-dertiende-eeuwse oorsprong kent. Kasteel de Middelburg had een oudere voorganger in het naastgelegen weiland,

precies daar waar zich een kromming in het oude tracé van de Munnikenweg bevond. Kasteel de Middelburg bevond zich direct naast de Munnikenweg, terwijl kasteel de Nieuwburg hier een heel eind vanaf lag. Een toegangsweg naar het kasteel is echter nooit aangetoond. Sinds 2018 zijn beide kastelen onderwerp van nieuw onderzoek geworden en zijn allerlei bronnen bekeken om de omvang van de kasteelterreinen te kunnen bepalen. Naast geofysisch onderzoek is ook remote sensing ingezet om extra informatie te kunnen verkrijgen. Door bestudering van luchtfoto's uit het interbellum en de Tweede



Afb. 7.8 Kaart van Simon Eikelenberg uit 1708, waarop de kastelen 'Toorenburg', 'Middelburg' en 'Nyborg' zijn aangegeven. Ze liggen aan de 'weg van Floris V heden de Munnikenweg', de invalsroute naar West-Friesland en de twee meren waartussen de Munnikenweg liep (bron: collectie Regionaal Archief Alkmaar/PR 1003235).

Wereldoorlog kon onder meer de (twaalfde-eeuwse?) voorganger van kasteel de Middelburg aangetoond worden. Maar ook sporen in het weiland direct ten zuidwesten van kasteel de Nieuwburg leverden verrassende inzichten op. De op deze afbeeldingen waar te nemen structuur in het weiland is te interpreteren als de nog niet eerder geïdentificeerde toegangsweg tot kasteel de Nieuwburg vanaf de Munnikenweg, of zelfs het primaire verloop van de Munnikenweg door of langs de Nieuwburg.

Dit zal onderzoek verder moeten uitwijzen. De weg zal zich in het landschap gemanifesteerd hebben als een verhoogde structuur, vermoedelijk ten behoeve van de afwatering, geflankeerd door sloten aan beide zijden. Door de tijd heen is het reliëf in de polder sowieso op een groot aantal plaatsen sterk afgenomen, waardoor de weg niet meer goed waarneembaar was. De kastelen in de Oudorperpolder zijn in 1517 verwoest door Grote Pier en zijn in de jaren daarna afgebroken. Van kasteel de Nieuwburg is



Afb. 7.9 Luchtfoto in transparant over de kadastrale minuut van 1821. Links midden is kasteel de Middelburg te zien, alwaar de weg eerst een zeer bochtig verloop kende; in het derde kwart van de negentiende eeuw kreeg deze weg een ander verloop. In rode lijn rechtsboven is de voortzetting van deze weg in de richting van kasteel de Nieuwburg aangegeven. Dit deel van de weg is geïdentificeerd op basis van diverse bronnen van remote sensing.

bekend dat het terrein opnieuw werd verkaveld en uitgegeven. De toegangsweg zal daarna ook buiten gebruik geraakt zijn. Ondersteunend bewijs hiervoor is dat op de vroegste kaarten uit het midden van de zestiende eeuw alleen nog de ruïne wordt aangeduid. De verbindingsweg is niet weergegeven.

Met behulp van alle geraadpleegde bronnen kan er dus een reconstructie worden gemaakt van de dertiende-eeuwse infrastructuur in deze polder. Tegelijkertijd laten deze beelden nog veel meer interessante structuren zien rondom kasteel de Nieuwburg, die zeker nog nader (niet destructief) onderzoek behoeven.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Naar aanleiding van de op luchtfoto's, satellietbeelden en het AHN waargenomen verschijnselen

en de gegevens van het 3D-model heeft er (nog) geen validerend veldwerk plaatsgevonden om de interpretatie van de luchtfoto's en het 3D-model te toetsen. Mogelijk kan dat in de toekomst nog met geofysisch onderzoek gebeuren.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Het gebruik van meerdere bronnen is altijd aan te raden. De ene bron laat net iets anders zien dan de andere en samen geven ze een gelaagd beeld van een situatie. Zeker het gebruik van luchtfoto's uit en vóór de Tweede Wereldoorlog geeft vaak een nog redelijk onverstoord beeld van de situatie.
- Het raadplegen van het AHN is zeker informatief, maar het maken van een 3D-model levert nog veel meer informatie op, doordat je het reliëf kunt manipuleren.

Lichtenvoorde-Harreveld. Burgerparticipatie in de luchtfotografie *H. van Londen (UvA)*

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Gelderland
 Gemeente: Oost-Gelre
 Plaats: Lichtenvoorde
 Toponiem: Het Harreveld
 RD-coördinaten: 233.076/444.934
 ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
 Grondgebruik: grasland, akkerland

Kernpublicatie

Van Londen *et al.* 2019

Overige bronnen en literatuur

<https://www.oudheidkundelichtenvoorde.nl/node/50>
 Derks, Bootsma & Crols 2006; Nijs & Manschot-Tijdink 1994; Stortelder 2021

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: noordelijk zandgebied
 Landschapszone: dekzandruggen en rivierduinen
 Het dekzandlandschap wordt gekenmerkt door landbouwgronden en verspreid liggende dorpjes. Oude cultuurgronden (esdekken) zijn te vinden op de hoger gelegen zandrug tussen Harreveld en Zieuwent. De woeste gronden van de Harreveldse Heide liggen westelijk daarvan. Deze gronden zijn pas in de laatste eeuw ontgonnen.¹³⁵

Geraadpleegde beelden

Luchtfoto (digitaal, kleur)
 Opnamejaar: 2018
 Opname seizoen: zomer
 Type opname: overboord
 De foto is genomen vanuit een zweefvliegtuig met een mobiele telefoon (door A. Bakker).

Satellietbeeld

Opnamejaar: 2018
 Opname seizoen: zomer (augustus)
 Type opname: TripleSat 80 cm, RGB

Wat zien we?

De analyse van de luchtfoto (afb. 7.10) heeft een bijzondere achtergrond. Tijdens de droge zomer van 2018 ontstond een spontane samenwerking tussen zweefvliegers van de Noordoostpolder en een groep archeologen van de Universiteit van Amsterdam (UvA). De zweefvliegers hadden opnames gemaakt van oude landschappelijke structuren. De UvA stelde een e-mailadres open voor het insturen van opnames en leverde een handleiding als richtlijn voor het nemen van foto's. Er werd een database ingericht. Zo kwam er een project tot stand met *citizen science* als insteek. M. Schelvis en I. Korver, masterstudenten van de UvA, analyseerden de beelden. J. Waagen hielp met de inrichting van de database en de analyse van het beeldmateriaal. Er bevinden zich ca. 200 beelden in de database. De foto biedt inzicht in de verdwenen verkaveling behorend bij het Harreveld, de locatie van de havezate Harreveld, met de voormalige pachtboerderijen Manschot, Wiegas en Op 't Hulshof.

De sporen die zijn waargenomen vanuit het zweefvliegtuig, bleken herkenbaar te zijn op het satellietbeeld. Deze zijn geïnterpreteerd, ingedeeld in clusters (clusters 1 en 2) en vergeleken met historische kaarten. De sporen blijken in ieder geval ouder dan de kaart uit 1830 waarop sommige (maar niet alle) sporen staan. Op de luchtfoto en het satellietbeeld zijn oude verkavelingsstructuren (clusters 1 en 2) en wegenpatronen (cluster 2) te zien (afb. 7.10 tot en met afb. 7.13). De luchtfoto (afb. 7.10) is genomen met een mobiele telefoon vanuit een zweefvliegtuig en biedt vanzelfsprekend niet de kwaliteit van gespecialiseerde technieken van remote sensing. Desondanks gaf deze foto voldoende aanleiding om de sporen terug te zoeken op satellietbeeld uit dezelfde periode (augustus 2018) en deze verder te onderzoeken.

Goed zichtbaar in het landschap is het kruispunt van een voormalig stuk weg (afb. 7.12, cluster 1). Als de ingetekende sporen van beide clusters op de satellietbeelden over de historische kaart worden gelegd (afb. 7.13), blijkt dat de oude verkaveling gerelateerd lijkt aan de havezate Harreveld (ca. 1450-1800) (cluster 1) en drie grote voormalige – meer oostelijk gelegen – pachtboerderijen, te weten Manschot, Wiegas en Op 't Hulshof (cluster 2). Deze drie beschikten samen over 57 ha grond. De oudste vermelding van het toponiem Harreveld dateert uit ca. 1200; de

¹³⁵ Derks, Bootsma & Crols 2006, 59.



Afb. 7.10 Foto van de zandrug bij Lichtenvoorde, in de zomer van 2018 met een mobiele telefoon genomen vanuit een zweefvliegtuig. Op een groot aantal percelen zijn oude verkavelingsstructuren zichtbaar. Ofschoon de foto niet de kwaliteit heeft van beelden verkregen door gespecialiseerde technieken van remote sensing, gaf deze voldoende aanleiding om de sporen op te zoeken op satellietbeeld (foto: A. Bakker).



Afb. 7.11 Verdwenen sporen van landinrichting zijn ingetekend op het satellietbeeld van Lichtenvoorde/Harreveld. Het satellietbeeld is gebruikt om de sporen op de luchtfoto 's 'recht' te krijgen (bron: Van Londen *et al.* 2019, 16).



Afb. 7.12 De sporen zijn ingedeeld in clusters. Cluster 1 betreft Harreveld met in het midden de locatie van de havezate Harreveld. Cluster 2 betreft Lichtenvoorde met de locatie van de drie pachtboerderijen (bron: Van Londen et al. 2019).



Afb. 7.13 De sporen zijn gelegd over de historische kaart van Lichtenvoorde en Harreveld (De Grote Historische Atlas deel 3, 1830-1855, kaartnummer 103). De oude verkaveling hoort waarschijnlijk bij de zestiende-eeuwse pachtboerderijen Manschot, Wiegas en Op 't Hulshof. Deze waren in bezit van de heren van de havezate Harreveld (bron: Van Londen et al. 2019).

boerderijen kunnen op basis van genealogieën teruggevoerd worden tot in de zestiende eeuw.¹³⁶ De foto brengt juist de oude cultuurgronden op de zandrug in beeld die pal ten westen van Lichtenvoorde liggen. Door de droogte viel de lichtgekleurde zandrug meer op dan normaal. De schaalgrootte van de foto past goed bij de omvang van dat oude cultuurlandschap. Het AHN bleek geen goede bron, omdat de sporen zich niet onderscheiden door hoogteverschil.

Wat is de archeologische interpretatie?

De landinrichting is niet archeologisch onderzocht en geldt wellicht eerder als historisch-geografisch landschapselement, dat zich goed leent om met oude kaarten te analyseren. De havezate Harreveld is daarentegen wel archeologisch onderzocht in de jaren negentig van de vorige eeuw. Vooral de gracht leverde een vrucht aan vondstmateriaal op.¹³⁷ De drie boerderijen zijn net als de havezate gesloopt, maar het historische cultuurlandschap ligt er nog, zij het begraven.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Met een aantal hulpmiddelen is gezocht naar de precieze plaats van de oude sporen. Dat begon met de fotobestanden zelf. Moderne fototoe-

stellen en telefoons registreren de lengte- en breedtegraden, waardoor de regio te achterhalen is. Daarnaast is Google Maps gebruikt, zodat gebouwen, wegen en rivieren vergeleken konden worden. De sporen op de foto's konden vanaf dat moment worden getraceerd op de satellietbeelden en het AHN. De sporen waren niet zichtbaar op het AHN, maar wel op de satellietopnames uit dezelfde periode waarin de piloot zijn opname maakte. De stappen van validatie zijn weergegeven in de opeenvolgende afbeeldingen. Er heeft geen toets in het veld plaatsgevonden.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

Het belangrijkste leermoment is dat ook niet-professioneel genomen luchtfoto's waardevolle informatie kunnen opleveren over verdwenen landschappen. Het rectificeren van de hoek was een eenvoudige handeling vanwege de beschikbare satellietbeelden uit dezelfde tijd waarin de piloot de opname maakte. Op deze manier kunnen zweefvliegers waarnemingen aanleveren. Dat betekent dat burgerparticipatie in de luchtfotografie heel goed mogelijk is. Bovendien leveren dergelijke luchtfoto's een schaal op die het mogelijk maakt grotere landschappelijke structuren te identificeren.

¹³⁶ Stortelder 2021, 3.

¹³⁷ Nijs & Manschot-Tijdink 1994.

Gennep-Genneperhuis. Onderzoek van de Staats-Spaanse linie *J. van Doesburg (RCE)*

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Limburg
 Gemeente: Gennep
 Plaats: Gennep
 Toponiem: Circumvallatielinie Genneperhuis
 RD-coördinaten: 195.819/413.235;
 195.881/413.475; 196.207/413.348;
 196.001/413.169
 ARCHIS-onderzoekmelding: 30114
 Grondgebruik: grasland, akkerland, bebouwd

Kernpublicaties

Van Doesburg & Müller 2011.

Overige bronnen en literatuur

Google Earth
 Narratieve kaart van de circumvallatielinie rond Gennep, van C.J. Visscher uit 1645, verschenen in *Belgium sive Germania inferior* (Amsterdam).
 Kaart met circumvallatielinie en de aftocht van de Spaanse troepen eind juli 1641. Kopergravure uit *Nassouwer Heldens Pronktoneel, gecierdt door de onovertreffelijke daadden, van de Alder-Dappersten en Kloek-modigsten Frederik Henderik, en Wilhelm II*, uitgegeven door Jan Jansz. op 't Water, in Amsterdam in 1663.
 Kaart *Belägerung vesten Schloss und Statt des Gennep*, uit de tweede helft van de zeventiende eeuw.
 De stad Gennep. Oudgekleurde gravure uit *Thoneel der Steden ende Sterckten van 't Vereenight Nerdelandt. Gheteekent door Io. Peeters ende ghemaect met sterck water door C. Bovvats* uit 1672.
 Anonieme kaart van de circumvallatielinie rond Gennep uit het midden van de zeventiende eeuw (collectie J. Wessels).
 Van Dinter 1998; Orbons 2008; Polman 2010; Projectteam *et al.* 2009.

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: Maasdal
 Landschapszone: uiterwaarden

Geraadpleegde beelden

Multispectrale luchtfoto's
 Opnamejaar: 2007
 Opnameseizoen: zomer (augustus)
 Type opname: multispectrale luchtfoto's (blauw, groen, rood en nabij-infrarood)
 Ecoflight heeft in augustus 2007 multispectrale luchtfoto's gemaakt van de verschillende deelgebieden. Het onderzoek is uitgevoerd in zeven deelgebieden (1 t/m 7) verspreid over de gehele linie. Hiervoor is gebruikgemaakt van multispectrale luchtfoto's met een detailniveau van 25 cm. Voor de analyse van de luchtfoto's zijn op perceelniveau de contrasten geoptimaliseerd met verschillende methoden. Vervolgens is gekeken of in de beelden sporen van de grachten, wallen of kampementen van de circumvallatielinie konden worden herkend.

Wat zien we?

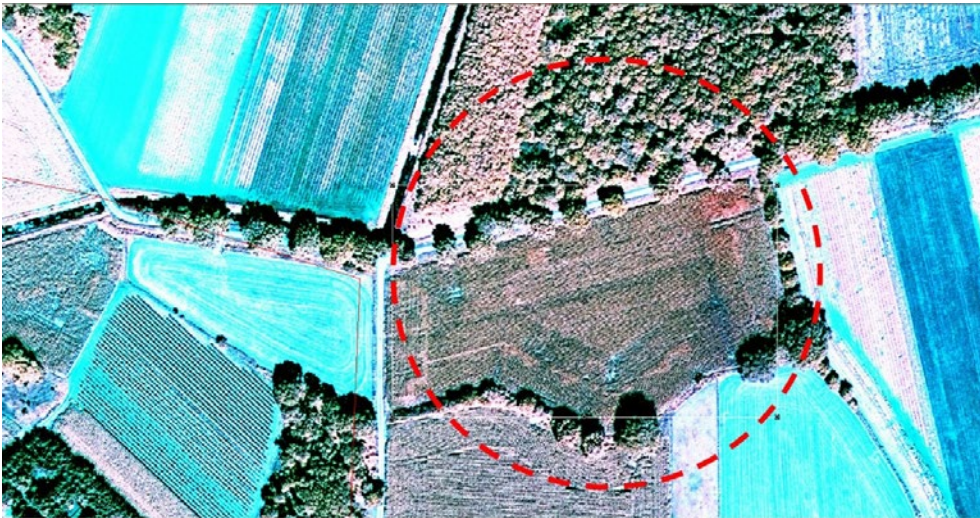
In twee van de zeven deelgebieden zijn structuren waargenomen die met de circumvallatielinie zouden kunnen samenhangen. In de overige niet. De twee deelgebieden met structuren worden hieronder besproken.

Deelgebied 2 Middelaar-Bloemstraat

Een eenvoudige perceelsgebonden contrast-optimalisatie laat hier een duidelijke driehoekige vorm in de vegetatie zien (afb. 7.14, in cirkel). Deze vorm is niet veroorzaakt door het volgen van de vorm van het perceel tijdens het maaien, maar houdt verband met het voorkomen van archeologische structuren in de ondergrond. Op Google Earth-opnames wordt de afwijkende oriëntatie van de maaibanen bevestigd. Ze maken ook duidelijk dat in de kale grond geen sporen van de driehoekige vorm zichtbaar zijn (afb. 7.15).

Deelgebied 5 Oeffelt-De Melder en Het Venneke

Een eenvoudige perceelsgebonden contrast-optimalisatie rondom dit gebied laat een ster-vormige structuur in de vorm van meerdere lijnen zien (afb. 7.16, in cirkel). Niet geheel duidelijk is of de donkere vlek rechts van de ster-vormige structuur verband houdt met deze structuur of veroorzaakt wordt door lokale vernatting van de bodem. Op het AHN en op Google Earth-opnames zijn geen significante hoogtevariaties of sporen van de ster-vormige structuur zichtbaar.



Afb. 7.14 Eenvoudige perceelsbonden contrastoptimalisatie van een multispectrale luchtfoto van deelgebied 2 (bron: Van Doesburg & Müller 2011, afb. 39a).



Afb. 7.15 Google Earth-opname van deelgebied 2 uit 2008 (bron: Van Doesburg & Müller 2011, afb. 39b).



Afb. 7.16 Eenvoudige perceelsbonden contrastoptimalisatie van een multispectrale luchtfoto van deelgebied 5 (bron: Van Doesburg & Müller 2011, afb. 40a).



Afb. 7.17 Uitsnede uit de kaart van C.J. Visscher uit 1645 van deelgebied 2. Om de relatie met de hoekige vorm van de crop marks beter te kunnen leggen, is de kaart 180° gedraaid (bron: Van Doesburg & Müller 2011, afb. 39c).



Afb. 7.18 Uitsnede uit de kaart van C.J. Visscher uit 1645 van deelgebied 5. Om de relatie met de hoekige vormen van de crop marks beter te kunnen leggen, is de kaart 180° gedraaid (bron: Van Doesburg & Müller 2011, afb. 40b).



Afb. 7.19 Liniegreppel in deelgebied 6 in het opravingsvlak van een van de proefsleuven. De greppel tekent zich vooral door de brokkelige vulling af.



Afb. 7.20 Gedeelte van de liniegreppel in het profiel in deelgebied 6 met specifieke vorm en laagopbouw.

Wat is de archeologische interpretatie?

Op basis van de kaart van C.J. Visscher uit 1645 wordt vermoed dat in deelgebied 2 een gedeelte van het kampement van graaf Frederik Hendrik in de linie is waargenomen, namelijk de wal en grachten van een driehoekig bastion aan de westzijde van het kamp (afb. 7.17, in cirkel). In deelgebied 5 is sprake van een gedeelte van een hoornwerk aan de buitenkant van de linie, bestaande uit een wal en dubbele gracht (afb. 7.18, in cirkel).

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Voor de deelgebieden waar sporen/structuren zijn waargenomen (de deelgebieden 2 en 5), is geen veldtoets uitgevoerd. De reden hiervoor is dat voor de percelen waarin deze fenomenen liggen, geen betredingstoestemming is verkregen om de resultaten in het veld te toetsen. In de deelgebieden waar geen duidelijk sporen/structuren van de linie zijn waargenomen, is wel een veldtoets uitgevoerd. Deze

bestond in deelgebied 6 uit een weerstandsonderzoek, gevolgd door een booronderzoek, een veldkartering met metaaldetectie en proefsleuven. Hierbij is een dubbele liniegreppel gevonden (afb. 7.19).

De liniegreppels hebben allemaal min of meer dezelfde breedte, diepte en vorm. De breedte varieert van 2,8 tot 3,4 m en de diepte varieert van 1,5 tot 1,7 m (11,00-11,90 m NAP).

De greppels hebben een vrij steile insteek met een binnenhoek variërend van 50° tot 65° en een vlakke bodem. Ook de opbouw en de samenstelling van de vulling vertonen grote overeenkomsten. De greppels kennen twee of drie vullingslagen (afb. 7.20). De onderste vulling bestaat meestal uit een zandig pakket, waarin horizontale, humeuze banden aanwezig zijn. De bovenste vulling bestaat over het algemeen uit zandige klei, vermengd met kleibrokken. De opbouw van de vulling en de samenstelling van de verschillende lagen van de greppels zeggen ook iets over het gebruik van het systeem en postdepositionele processen. Het

systeem is in minimaal twee fasen opgevuld. In de onderste dunne vulling zijn veel humeuze banden aangetroffen, die min of meer parallel aan de insteek in de vulling liggen. Dit verschijnsel wijst erop dat de greppels langzaam zijn dichtgeslibd met materiaal dat van de aanwezige wallen is afgespoeld, bijvoorbeeld door betreding door mens en dier en bij hevige regenbuien. Dit proces heeft zich enkele malen herhaald, gezien de verschillende humeuze banden. De bovenste dikke vulling is duidelijk anders van samenstelling (afb. 7.20). De aanwezigheid van verspitte kleibrokken suggereert het doelbewust dichtstorten van de sporen in een korte periode. De greppels bevatten geen dateerbaar vondstmateriaal.

In de andere deelgebieden zijn lagen aangeboord die kunnen worden toegeschreven aan sporen van de linie, vooral greppels. Deze hebben een opvallende vulling met brokken klei. In delen van de deelgebieden 2 en 4 is ook een veldkartering met metaaldetectie uitgevoerd. Deze leverden geen aanwijzingen voor elementen van de linie of gevechtshandelingen op. Het overgrote deel van de vondsten moet als

stadsvuil voor bemesting van de akkers worden geïnterpreteerd. In deelgebied 4 zijn al in 2001-2002 proefsleuven gegraven. Hierbij is een deel van de dubbele liniegracht aangetoond. De opbouw hiervan komt overeen met die in deelgebied 6.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- De toepassing van multispectrale luchtfoto's binnen de archeologie staat nog in de kinderschoenen. Het jaargetijde waarin de opnames worden gemaakt, lijkt van grote invloed te zijn op de uitkomsten. De keuze voor het jaargetijde is afhankelijk van verschillende factoren, waarvan bodemsoort en -vochtigheid, grondgebruik en begroeiing en de te verwachten archeologische resten enkele voorbeelden zijn. Meer onderzoek is nodig.
- Bij uitvoering van een dergelijk non-destructief verkennend onderzoek moet een veldtoets in de vorm van boringen en proefsleuven, eventueel met een weerstandonderzoek als tussenfase, zijn gegarandeerd. Alleen op deze wijze kan worden getoetst wat er op de multispectrale luchtfoto's te zien is.

Deel III - Inventariserend veldonderzoek

Drone remote sensing: vliegende start in de archeologie

In de Nederlandse archeologie wordt sinds 2012 steeds meer gebruikgemaakt van drones. Door bevestiging van een camera of sensoren onder een drone kunnen vanaf een bepaalde hoogte gedetailleerde opnames van archeologische locaties worden gemaakt. Voor prospectie gaat het daarbij om digitale luchtfoto's (RGB-beelden), infraroodbeelden, multispectrale beelden en zeer gedetailleerde digitale hoogtemodellen. Ze bieden informatie die relevant kan zijn voor het opsporen en nader onderzoeken van archeologische resten. Een groot voordeel is dat met drones zeer gericht, meermaals en onder verschillende weersomstandigheden kan worden gevlogen. Mede dankzij de geringe vlieghoogte kunnen beelden van zeer hoge resolutie worden verkregen in zowel het zichtbare als het niet-zichtbare spectrum. Een drone kan worden ingezet voor het registreren van verschillen in gewasgroei (*crop marks*) of thermische verschillen in de bodem

als indicatie voor de aanwezigheid van bijvoorbeeld muurresten of opgevulde greppels in de ondergrond. Door met een drone te vliegen boven onbegroeide akkers of gebieden waarvan de bovengrond is afgegraven, kunnen *soil marks* in kaart worden gebracht.

Behalve voor prospectie worden drones ook voor andere archeologische doelen ingezet. Met behulp van een camera bevestigd aan een drone kunnen verticale opnames van opgravingsvlakken worden gemaakt, met als doel een zeer nauwkeurige documentatie van archeologische resten in het horizontale vlak. Een andere belangrijke toepassing is het verzamelen van sensordata voor het maken van 3D-modellen van complexe archeologische structuren met behulp van fotogrammetrie. *Last but not least* raken drones steeds meer ingeburgerd voor het creëren van fraaie overzichtsbeelden (foto, film) van opgravingen en het omliggende landschap. Deze kunnen worden ingezet voor publieksvoorlichting over de betreffende opgraving.

8.1 Inleiding

In de voorafgaande hoofdstukken hebben we aandacht besteed aan bronnen of beelden van remote sensing die kunnen worden gebruikt tijdens het uitvoeren van archeologisch bureau-onderzoek. In dit derde deel van het rapport verschuiven we onze aandacht naar veldonderzoek met nieuw beschikbaar gekomen technologie, ofwel het verzamelen van data met behulp van een drone (of: UAV, *unmanned aerial vehicle*, of RPA, *remotely piloted aircraft*). Drone remote sensing is een belangrijk, actueel onderwerp van archeologische prospectie, dat steeds meer aan populariteit wint.¹³⁸ Door het bevestigen van camera's en sensoren aan drones kunnen vanuit de lucht beelden in het zichtbare en niet-zichtbare spectrum worden verkregen die relevant (kunnen) zijn voor het documenteren, opsporen, nader onderzoeken, monitoren en visualiseren van archeologische resten. De achterliggende technieken van remote sensing die daarbij een rol spelen, zijn niet anders dan we eerder bespraken voor vliegtuigen en satellieten.

Producten van drone remote sensing die kunnen worden gebruikt voor archeologische doeleinden, zijn digitale luchtfoto's (RGB-beelden), infraroodbeelden, multispectrale en hyperspectrale beelden en digitale hoogtemodellen. In vergelijking met satellieten en vliegtuigen kent het gebruik van drones voordelen, waaronder de veel kleinere meetafstand tussen de dronesensoren en het aardoppervlak.

Dit hoofdstuk begint met een korte historische terugblik en bespreking van kwaliteitskenmerken van drone remote sensing. Vervolgens wordt ingegaan op archeologische toepassingen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de presentatie van twee Nederlandse casestudy's.

8.2 Korte historische terugblik

Als voorganger van de drone kunnen vliegers of hetelucht- en heliumballonnen worden beschouwd, waaraan een camera werd bevestigd voor het maken van analoge luchtfoto's. Aan het einde van de negentiende eeuw

¹³⁸ Voor het schrijven van dit hoofdstuk zijn de volgende bronnen gebruikt: Verhoeven 2013; Van der Veen 2019; lezing van J. Waagen tijdens Archeologieplatform van de RCE op 21 oktober 2021 met als titel 'De potentie van drone remote sensing in de Nederlandse archeologie'.



Afb. 8.1 Droneopnames van het laat-prehistorische grafveld De Busjop bij Heythuysen in Midden-Limburg in september 2021.

werd de eerste archeologische luchtfoto gemaakt door G. Boni (1859-1925), een Italiaanse archeoloog gespecialiseerd in Romeinse architectuur. Hij fotografeerde met een camera vanuit een heliumballon het *Forum Romanum*. Een veel recenter Nederlands voorbeeld is het gebruik van een heliumballon voor archeologische opnames vanuit de lucht bij het onderzoek naar het laat-prehistorische grafveld De Busjop bij Heythuysen in Midden-Limburg.¹³⁹ Ook tijdens de opgraving van het massapaardengraf in Borgharen vlakbij Maastricht zijn met behulp van een ballon luchtfoto's genomen.¹⁴⁰ Beide onderzoeken, uitgevoerd in respectievelijk 2011 en 2010, tonen aan dat de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) en archeologische bedrijven destijds nog geen gebruik maakten van drones tijdens archeologisch veldwerk. Deze situatie is in de afgelopen jaren drastisch veranderd. Zo zijn in september 2021 in opdracht van de RCE ten behoeve van een promotiefilmpje over archeologische prospectie droneopnames gemaakt van de bronstijdgrafheuvels van De Busjop (afb. 8.1). De eerste testen met drones tijdens archeologische opgravingen volgden kort na de onderzoeken naar De Busjop en Borgharen. Sinds 2012

worden drones uitgerust met camera's voor het maken van verticale foto's van opgravingsvlakken. Door met de drone over het opgravingsvlak te vliegen, kunnen haarscherpe foto's worden gemaakt. Dat maakt het documenteren (meten, tekenen en vastleggen) van archeologische sporen en structuren in het horizontale vlak accurater en sneller. Met behulp van drone-3D-fotogrammetrie is het nu ook mogelijk om complexe archeologische structuren als geometrisch correcte modellen vast te leggen en te visualiseren in 3D-beelden.¹⁴¹

Op het gebied van archeologische prospectie heeft de Universiteit van Amsterdam in de afgelopen vijf jaren geëxperimenteerd met drone remote sensing (zie paragraaf 8.4). Daarmee zijn in Nederland belangrijke stappen gezet bij het gebruik van drones voor archeologische doeleinden. Steeds meer archeologische bedrijven, overheidsinstanties en universiteiten hebben inmiddels de beschikking over een of meer drones. Desondanks neemt drone remote sensing in de hedendaagse Malta-archeologie nog altijd een marginale plaats in. De inzet van drones is zeker geen standaardonderdeel van opdrachten voor inventariserend veldonderzoek die archeologische bedrijven in het kader van

¹³⁹ De foto's zijn in 2011 gemaakt door R. Faun in het kader van een veldwerkproject van de RCE, zie Theunissen *et al.* 2013, 74.

¹⁴⁰ Loonen & Van de Graaf 2013.

¹⁴¹ Ook voor de documentatie van scheepswrakken onder water is fotogrammetrie, maar dan zonder de inzet van drones, inmiddels een belangrijk hulpmiddel geworden, zie Opdebeek, Manders & De Hoop 2020.

een ruimtelijke ontwikkeling uitvoeren. Een vermelding van drones in de protocollen bureauonderzoek, inventariserend veldonderzoek en opgraven ontbreekt in de vigerende versie van de KNA (versie 4.1, vastgesteld in 2018).¹⁴² Evenmin heeft de opkomst van de drone geleid tot een reeks van artikelen, zoals we die wel na de introductie van AHN1 hebben gezien (hoofdstuk 6). Slechts twee artikelen in de *Archeobrief*, gepubliceerd in 2013 en 2016, besteden aandacht aan dronearcheologie in Nederland.¹⁴³

8.3 Kwaliteitskenmerken

De introductie van drones in archeologisch veldwerk in Nederland sluit naadloos aan bij de grote technologische vernieuwingen die zich in de afgelopen decennia op het gebied van sensoren, digitale inwinning en verwerking van data hebben voorgedaan. Drones hebben als groot voordeel dat voor elke gewenste locatie (ruimtelijke resolutie) en elke gewenste frequentie (temporele resolutie) sensormetingen kunnen worden verricht. Ze kunnen op verschil-

lende hoogtes worden ingezet voor het maken van beelden van een (verwachte) archeologische vindplaats met een grote mate van detail (hoge resolutie). Ook het seizoen, het tijdstip en de weersomstandigheden van de dronevlucht kunnen door de archeologen zelf worden bepaald. Bovendien hebben drones, in vergelijking met vliegtuigen en satellieten, een lage vlieghoogte, met als belangrijk voordeel dat er minder verzwakking of vervorming van de meetsignalen door atmosferische storingen optreedt. De korte afstand van de drone tot het aardoppervlak maakt het mogelijk om kwalitatief hoogwaardige data (van zeer hoge resolutie) in te winnen (afb. 8.2). Door rekening te houden met externe factoren, zoals weersomstandigheden, is het mogelijk om metingen te verrichten onder de voor archeologische prospectie meest gunstige omstandigheden. Daarmee wordt de kans aanmerkelijk vergroot dat archeologische fenomenen kunnen worden opgespoord, mits zij zich aan het aardoppervlak manifesteren in de vorm van *crop marks*, *soil marks* of *shadow marks*. Minder goede externe omstandigheden, zoals te veel zon, wind en regen, kunnen een negatieve invloed hebben op de kwaliteit van de data die met een drone worden ingewonnen.

¹⁴² In de KNA zijn ook geen kwaliteitseisen ten aanzien van drone remote sensing opgenomen. Ook ontbreekt een leidraad, die voor veel andere methoden van inventariserend onderzoek wel is opgesteld.

¹⁴³ Verhoeven 2013; Van der Mijle-Meijer & Stokkel 2016.



Afb. 8.2 Droneluchtfoto uit de zomer van 2022 van een maisperceel waar een mogelijke voorganger van het huidige kasteel Diepenheim (provincie Overijssel) heeft gestaan. Grachten en andere structuren tekenen zich als donkergroene gewasverkleuringen (*crop marks*) in de mais af (foto: A. Speelman).

Ten slotte dient erop te worden gewezen dat luchtfoto's op zich geen meetkundig correcte afbeeldingen zijn, ongeacht of ze zijn genomen vanuit een satelliet, vliegtuig of drone en ongeacht de kwaliteit of resolutie ervan. Er treedt altijd een zekere vertekening op, zelfs bij luchtfoto's die loodrecht (verticaal) van boven zijn genomen. Dat bemoeilijkt de exacte plaatsbepaling van objecten. Met behulp van fotogrammetrie zijn vanuit overlappende foto's *orthofoto's* en *orthomaps* te maken, die wel een geometrische correcte weergave bieden (kadertekst 'Dronefotogrammetrie' in paragraaf 8.4). Hiervoor is specialistische kennis en juiste software vereist. Pas dan is er sprake van een bruikbaar product voor onder andere toepassing in een GIS-omgeving.

8.4 Archeologische toepassingen

Wie het internet afstruint, kan zien dat internationaal de ontwikkelingen op het gebied van drone remote sensing bijzonder snel gaan en dat het aantal toepassingen gestaag toeneemt. Deze tendens is ook van toepassing op archeologisch veldwerk, waarbij drones een steeds belangrijkere rol gaan spelen (tabel 8.1). Het heeft geleid tot archeologische inzichten die volledig nieuw zijn of een welkome aanvulling vormen op resultaten van inventariserend veldonderzoek. Ook worden experimenten uitgevoerd met specifieke toepassingen. Zo is een nieuwe ontwikkeling in de archeologische prospectie het automatisch detecteren van concentraties van

oppervlaktevondsten (vaak aardewerkscherven) op dronebeelden met een hoge resolutie met behulp van *automated machine learning*.¹⁴⁴ In de afgelopen jaren heeft het 4D Research Lab van de Universiteit van Amsterdam (UvA) binnen archeologische projecten drone remote sensing toegepast om de bruikbaarheid ervan voor prospectiedoeleinden in Nederland te verkennen. De studies hebben voornamelijk een experimenteel karakter en richten zich op de toepassing van verschillende technieken van drone remote sensing. In Siegerswoude-Middenwei heeft de UvA tijdens veldonderzoek van de RCE infraroodthermografie (warmtebeelden) ingezet bij het onderzoek naar een laat-middeleeuwse nederzetting. De doelstelling van het onderzoek was om met behulp van een drone met een thermische camera warmteverschillen te meten als aanwijzing voor archeologische fenomenen in de ondiepe ondergrond. Archeologisch objecten of structuren kunnen een andere warmtestraling hebben ten opzichte van de omringende, natuurlijke bodem. De resultaten wijzen erop dat infraroodthermografie een veelbelovende techniek is voor het opsporen van archeologische resten.¹⁴⁵ Een andere ontwikkeling die relevant is voor archeologische prospectie, is het maken van hoogtemodellen met behulp van dronefotogrammetrie. Van het onderzoeksgebied in Siegerswoude-Middenwei zijn vele honderden, deels overlappende luchtfoto's in zeer hoge resolutie gemaakt die met fotogrammetrie zijn samengebracht tot een orthofoto. Door toepassing van de visualisatietechniek *hillshade* is een rechthoekige structuur gedetecteerd die

¹⁴⁴ Orengo & Garcia-Molsosa 2019. Dit type onderzoek vertoont vooralsnog de nodige beperkingen die voortkomen uit verschillende factoren, zoals specifieke bodemomstandigheden, kenmerken van het aardewerk (donkere bodem en rood aardewerk) en specifieke weersomstandigheden (wel of niet net geregend).

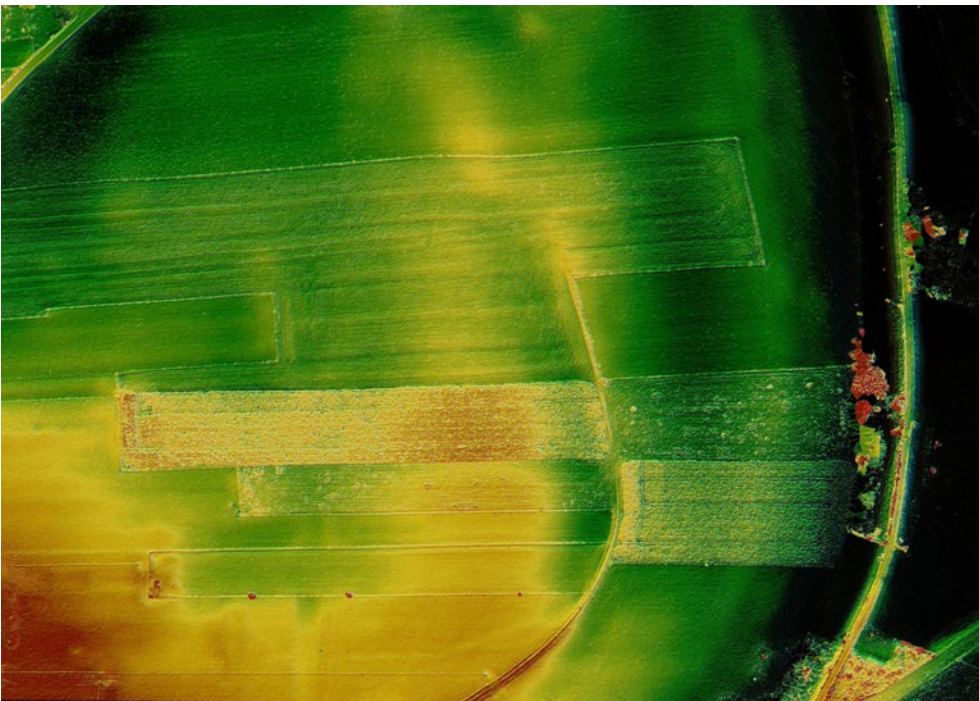
¹⁴⁵ Van Doesburg *et al.* 2022.

Tabel 8.1 Overzicht van de in hoofdstuk 8 vermelde archeologische toepassingen van drone remote sensing en bijbehorende publicaties

Periode	Opnames	Toepassingen	Literatuur
2018	dronebeelden in het zichtbare spectrum (RGB-beelden)	Vught-De Gement: naar aanleiding van informatie van luchtfoto's genomen vanuit een vliegtuig, zijn met behulp van een drone greppelstructuren (in de vorm van <i>crop marks</i>) behorende tot de verdedigingslinie uit 1629 van Frederik Hendrik nader in kaart gebracht	deze publicatie (casestudy)
2018	dronebeelden in het zichtbare en niet-zichtbare spectrum (infrarood)	Siegerswoude-Middenwei: kartering, waardering en monitoring van een laat-middeleeuwse vindplaats	Van Doesburg <i>et al.</i> 2022; deze publicatie (casestudy)
2021-2022	dronebeelden in het zichtbare en niet-zichtbare spectrum (infrarood)	Maasband: 'eindmeting' van verdwijnend historisch cultuurlandschap	
2022	dronebeelden in het zichtbare deel van het spectrum	Oost-Maarland: methode- en kennisontwikkeling ter plaatse van de laat-middeleeuwse Hof van Maarland	Orbons 2022; deze publicatie (hoofdstuk 9)
2022	dronebeelden in het zichtbare deel van het spectrum	Zeevolde: documentatie van een scheepswrak tijdens een opgraving in de Flevopolder (fotogrammetrie)	



Afb. 8.3 Drone remote sensing in het gebied van een toekomstige hoogwatergeul in de Grensmaaslocatie Maasband (gemeente Stein). De foto is gemaakt tijdens de tweede vlucht in augustus 2022.



Afb. 8.4 Een van de resultaten van de eerste dronevlucht (december 2021) van het onderzoek in Maasband. De afbeelding toont een zeer gedetailleerd digitaal hoogtemodel (DEM) van het centrale deel van het Grensmaasplangebied Maasband waarover een *multiple hillshade* en een *slope model* is geprojecteerd (bron: J.Waagen, 4D Research Lab).

op het AHN-beeld nauwelijks zichtbaar is. Het droneonderzoek in Siegerswoude-Middenwei kan worden beschouwd als goede en leerzame testcase voor de (on)mogelijkheden van infraroodthermografie en fotogrammetrie met behulp van een drone in archeologische landschapskartering (zie casestudy Siegerswoude-Middenwei, paragraaf 8.5). Meer recentelijk (2021 en 2022) hebben het experimentele droneonderzoek in Siegerswoude-Middenwei en de toepassing van hoogwaardige sensoren een vervolg gekregen

langs de Limburgse Maas. In Maasband (gemeente Stein) heeft het 4D Research Lab in opdracht van de RCE op twee verschillende momenten (december 2021 en augustus 2022) een testgebied van 15 ha in kaart gebracht met dezelfde technieken van remote sensing die zijn toegepast in Siegerswoude-Middenwei. Het droneonderzoek is vooruitlopend op het afgraven van een grotendeels intact historisch cultuurlandschap in verband met de aanleg van een hoogwatergeul in het kader van het project De Maaswerken (afb. 8.3 en afb. 8.4).

Archeologische monitoring

Toepassingen van drone remote sensing voor archeologische monitoring zijn vooralsnog schaars in Nederland. Zo zijn er geen drones ingezet in het project Monarch van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (2019-2021), dat tot doel heeft een nulmeting te doen van alle wettelijk beschermde rijksmonumenten die op land liggen.¹⁴⁶ Voor het vaststellen van de fysieke staat van de rijksmonumenten is gebruikgemaakt van andere methoden, namelijk bureauonderzoek, visuele inspectie en booronderzoek. De potentie van drone remote sensing voor dit doel is echter groot. Met behulp van een drone met een digitale camera of hoogwaardige sensoren kunnen gedurende opeenvolgende jaren vanuit de lucht veranderingen worden vastgelegd en gevolgd in de fysieke staat van aan het oppervlak zichtbare archeologische vindplaatsen. Incidentele droneopnames tonen de mogelijkheden en meerwaarde hiervan onomstotelijk aan, bijvoorbeeld voor de Drentse hunebedden en het vastleggen van beschadigingen en verstoringen ten gevolge van vandalisme (afb. 8.5).

Documentatie van archeologische resten in een opgravingsvlak

Hoewel deze toepassing niet onder archeologische prospectie valt en duidelijk een andere doelstelling heeft, maken we hier kort melding van drone remote sensing als nieuw hulpmiddel bij de documentatie van opgravingsvlakken en hierin aangetroffen archeologische resten. Tot slechts enkele jaren geleden was de gangbare praktijk om in opgravingsputten aangetroffen sporen en structuren digitaal met GPS of een Total Station in te meten. Doel ervan was (conform de kwaliteitseisen van de KNA) het ruimtelijk vastleggen van deze sporen en structuren in allesporenkaarten met het oog op verdere analyse en interpretatie tijdens de uitwerking. In aanvulling hierop werden ook regelmatig foto's gemaakt vanaf de putrand of de storthopen van uitgegraven grond langs de put met als doel het opgravingsvlak fotografisch vast te leggen. Er kleefte echter een groot nadeel aan het gebruik van oblique foto's die met deze werkwijze worden verkregen: omdat ze onder een hoek vanaf de zijkant van de put worden genomen, geven ze een vertekend beeld van het vlak. Om een opgravingsvlak loodrecht van



Afb. 8.5 Dronefoto van hunebed D15 bij Loon. De foto is in 2016 genomen vanaf 20 m hoogte. Van het portaal is de deksteen afgeschoven als gevolg van vandalisme (foto: J. Stöver).

¹⁴⁶ Mauro 2022.

boven vast te leggen, moesten voorheen foto's worden gemaakt vanuit de bak van de graafmachine of vanaf een fototoren. Ook kwam het voor dat vliegers voor dit doeleinde werden ingezet. Dankzij de drone is dat niet meer nodig. De introductie van drones in archeologisch veldwerk heeft het digitaal documenteren van opgravingsvlakken aanmerkelijk vergemakkelijkt en versneld. Een pionier was de archeologische dienst van de gemeente Den Haag, die vanaf 2012 tijdens enkele grootschalige opgravingen de toepassingsmogelijkheden van de drone voor dit doel heeft verkend en verbeterd. Daarbij ging het in eerste instantie om het inwinnen van luchtfoto's om te checken of eventueel vage, nauwelijks zichtbare grondsporen waren gemist en of wel waargenomen sporen op de juiste wijze waren ingekrast.

Met het beschikbaar komen van fotogrammetrie werd de inzet van droneluchtfotografie verder uitgebreid en verbeterd (zie kadertekst 'Dronefotogrammetrie'). Tijdens een opgraving aan de Rotterdamsebaan in Den Haag (2014-2016) werden honderden droneluchtfoto's genomen. Door die digitaal aan elkaar te koppelen, werd een overzichtsfoto verkregen

van het (op dat moment) totale opengelegde vlak. Belangrijke randvoorwaarde hierbij was dat de overzichtsfoto dagelijks aangevuld moest worden. Ook moesten de individuele luchtfoto's zijn voorzien van georeferentie (in Rijksdriehoekscoördinaten) en een relatief hoge resolutie hebben.

Met behulp van drone-3D-fotogrammetrie is het mogelijk om aan de hand van foto's een 3D-model te maken van complexe archeologische sporen en structuren. Het grote voordeel hiervan is de zeer nauwkeurige weergave van deze sporen en structuren. Bovendien hoeft niet alle registratie meer in het veld te gebeuren. Het verrichten van metingen aan sporen of vondsten uit een opgraving kan ook op een later tijdstip achter de computer worden verricht. In de zomer van 2022 heeft de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed fotogrammetrie toegepast voor de documentatie van een klein scheepswrak in Zeewolde (afb. 8.6). Ook onder water is fotogrammetrie, maar dan zonder de inzet van drones, inmiddels een belangrijk hulpmiddel geworden.¹⁴⁷

¹⁴⁷ Opdebeek, Manders & De Hoop 2020.



Afb. 8.6 Dronefotogrammetrie tijdens de opgraving van een vijftiende-eeuws waterschip bij Zeewolde in de zomer van 2022. Met behulp van een drone is een prachtig en gedetailleerd beeld verkregen van de opgegraven resten van het waterschip.

Dronefotogrammetrie: precisiewerk voor optimale opgravingsdocumentatie

Fotogrammetrie is een digitale techniek waarmee deels overlappende digitale luchtfoto's nauwkeurig en geometrisch correct worden samengebracht tot één (overzichts) foto. Door het bevestigen van een hoge-resolutiefotocamera aan een drone kunnen hogeresolutieluchtfoto's van opgravingsvlakken worden gemaakt, die vervolgens met speciale software worden bewerkt. Hiermee is

het mogelijk om zichtbare archeologische sporen en structuren op snelle en efficiënte wijze in kaart te brengen. Belangrijke randvoorwaarde is dat de luchtfoto's loodrecht van boven en met een zekere mate van overlap worden genomen. Ook dienen ze te zijn voorzien van georeferentie (in Rijksdriehoekscoördinaten). Voor een goed gebruik moeten de luchtfoto's verder een hoge resolutie hebben.

Publieksbereik

Beelden van drone remote sensing hebben een belangrijke meerwaarde als middel van analyse van archeologisch veldonderzoek. Uit het oogpunt van publieksbereik en presentatie van dit veldonderzoek is eveneens een grote winst behaald. Drones raken steeds meer ingeburgerd voor het creëren van fraaie overzichtsbeelden (foto en film) van opgravingen, hierin aanwezige resten en het omliggende landschap vanuit de lucht (afb. 8.1). Fotogrammetrie is een belangrijke tool, niet alleen voor het documenteren, maar ook voor het visualiseren van complexe archeologische structuren aan de hand van 3D-modellen. Deze modellen en

3D-reconstructies zijn uitermate geschikt voor expositiedoeleinden voor een groot publiek.

Methode- en kennisontwikkeling

Drone remote sensing wordt pas in de laatste tien jaar en vaak op experimentele basis toegepast in archeologische prospectie. De potentie ervan is echter enorm groot en dit geldt in het bijzonder voor droneonderzoek met als doel methode- en kennisontwikkeling. Gezien het belang ervan komt dit onderwerp in een apart hoofdstuk aan de orde, aan de hand van het meerjarige droneonderzoek dat J. Orbons naar de Hof van Maarland ten noorden van Eijsden in Zuid-Limburg uitvoert (zie hoofdstuk 9).

8.5 Casestudy's drone remote sensing

Vught-De Gement.
Vestingwerken van het Beleg van
's-Hertogenbosch in 1629
G.J.J. Timmermans (gemeente Vught) en
E. Rensink (RCE)

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Noord-Brabant
 Gemeente: Vught
 Plaats: Vught
 Toponiem: De Gement
 RD-coördinaten: 146.252/409.116
 ARCHIS-onderzoekmelding: niet van toepassing
 Grondgebruik: grasland, akkerland (mais en
 braakliggend)

Bronnen en literatuur

<https://www.bd.nl/s-hertogenbosch/droogte-brengt-linie-uit-1629-tevoorschijn-we-kunnen-de-kaarten-opnieuw-gaan-tekenen~a197040c/>
<https://www.s-hertogenboschopdekaart.nl/linie1629/8-hollandsche-dijk/pointofinterest/detail>
 Van der Heijden 2001

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: Roerdalslenk
 Landschapszone: dekzandvlakte
 De liniedijk doorsnijdt een gebied waar vroeger sprake was van hoog- en laagvenen en moerassen (De Gement). De dijk moest om deze reden op palen gefundeerd worden. De grachten langs de dijk werden gevoed met water van de rivier de Dommel. Hiertoe werd ten zuiden van 's-Hertogenbosch de rivier afgedamd en werd een stelsel van kanalen gegraven dwars door de Vughtse Heide. Via deze kanalen kon het water de grachten van de liniedijk bereiken.

Geraadpleegde beelden

RAF-luchtfoto's
 Op RAF-foto's uit de periode van de Tweede Wereldoorlog zijn her en der nog sporen van de Hollandsche Dijk te zien.

Opnamejaar: 1943-1947
 Opnameseizoen: divers
 Type opname: overboord

Luchtfoto's (digitaal, kleur)
 Opnamejaar: 2018
 Opnameseizoen: zomer
 Type opname: overboord

Dronebeelden (digitaal, kleur)
 Opnamejaar: 2018
 Opnameseizoen: zomer
 Type opname: niet van toepassing

Wat zien we?

Het initiatief voor het onderzoek naar dit terrein ontstond tijdens een inspectievlucht door het Waterschap Aa en Maas. Pilot J. Jacobsen nam ten noorden van Vught de contouren van oude vestingwerken waar en fotografeerde ze (afb. 8.7 en afb. 8.8). Dankzij de extreme droogte tekenden voormalige grachten zich onverwacht vanuit de lucht als verkleuringen in het gras en de mais af. Naar aanleiding van berichtgevingen door Omroep Brabant heeft de gemeente Vught aan AGEL adviseurs opdracht gegeven om samen met Alfadrone een dronevlucht uit te voeren om de verdedigingswerken uit 1629 verder in kaart te brengen (afb. 8.9 en afb. 8.10). De dronevlucht moest in ieder geval nog tijdens de periode van droogte uitgevoerd worden. De beelden zijn ingewonnen en gekarteerd in het Rijksdriehoekstelsel (RD-stelsel). Op basis van de orthofoto en puntenwolk zijn de verkleuringen gekarteerd met behulp van het softwareprogramma dg DIALOG. De beelden zijn door de archeologische dienst gebruikt om de exacte ligging te bepalen van de grachten die tot de zeventiende-eeuwse verdedigingslinie behoren. De ingemeten beelden zijn gedeeld met vrijwilligers van De Groene Vesting en worden momenteel samengevoegd met de gehele linie uit 1629. Een groot deel van de Hollandsche Dijk is hiermee gekarteerd en gekoppeld aan de overige beschikbare informatie over de linie. Op de luchtfoto's en dronebeelden (afb. 8.7 tot en met afb. 8.10) zijn hoofdzakelijk lijnvormige elementen als donkergroene verkleuringen in gras- en maispercelen zichtbaar. Deze *crop marks* zijn het resultaat van een andere vochtthoudding van de bodem, waardoor op deze plaatsen het gras en de mais beter groeien en gezonder/



Afb. 8.7 Foto genomen vanuit een vliegtuig, op 8 augustus 2018. De contouren van de vestingwerken uit de tijd van het beleg van 's-Hertogenbosch door Frederik Hendrik tekenen zich af als donkergroene banen in het gewas (foto: J. Jacobsen, Waterschap Aa en Maas).



Afb. 8.8 Door de extreme droogte in de zomer van 2018 tekenen de contouren van de vestingwerken zich af als donkergroene banen in het Bossche Broek (foto: J. Jacobsen, Waterschap Aa en Maas).

groener zijn. Deze locaties vallen samen met voormalige, door de mens uitgegraven greppels, waar de bodemcondities net iets gunstiger (vochtiger) zijn dan in de drogere delen van de percelen. Buiten de gras- en maispercelen zijn de lijnen verder te vervolgen en tekenen zij zich af

als duidelijk donkerder gekleurde *soil marks*.

Wat is de archeologische interpretatie?

De *crop marks* en *soil marks* vormen de contouren van vestingwerken en mogelijk ook aangelegde waterwerken uit de tijd van het beleg van



Afb. 8.9 Een dronefoto van een maisperceel waarin de voormalige grachten zich duidelijk aftekenen als donkergroene lijnen (foto: gemeente Vught).



Afb. 8.10 Een blik vanuit een drone op een ander maisperceel waarin de voormalige grachten duidelijk zichtbaar zijn omdat het gewas daar groener en hoger is (foto: gemeente Vught).

's-Hertogenbosch door Frederik Hendrik in 1629. Als voorbereiding op de belegering van de stad legde Frederik Hendrik een meer dan 40 km lange verdedigingslinie rond de stad aan.¹⁴⁸ De linie bestond uit een aaneenschakeling van dijken en grachten die werden beschermd door tientallen uitkijkposten, schansen, hoornwerken en redoutes. Een groot deel van deze elementen is nog altijd in het landschap aanwezig. Op sommige locaties zijn ze op het AHN zichtbaar als subtiele, lijnvormige hoogteverschillen, terwijl op andere locaties (bijvoorbeeld in de Gement/Rijskampen) niets op het AHN te zien is. Op weer andere locaties zijn overblijfselen duidelijk zichtbaar in de vorm van oude dijken

en restanten van fortificaties.

De Hollandsche Dijk was de bijnaam van de circumvallatielinie tussen Vught en Engelen. De dijk vormde hét sluitstuk van de linie van Frederik Hendrik. In het laagste gedeelte van de Gement werd in 1629 met man en macht gewerkt aan het sluiten van de linie, die als een ring rondom de stad lag. Met takkenbossen, pluggen en aarde werd de Hollandsche Dijk opgeworpen, vernoemd naar de Hollanders die bij de aanleg werden ingezet. Direct na het beleg werd de dijk weer afgebroken. Dit werd gedaan om het natuurlijke watersysteem te herstellen én om te voorkomen dat de dijk vervolgens tegen de Staatsen werd gebruikt.

¹⁴⁸ Van der Heijden 2001.

De linie van 1629 is onderdeel van de Zuiderwaterlinie, de langste en meeste benutte waterlinie van Nederland, en loopt dwars door Brabant. De Zuiderwaterlinie ligt tevens op een geologische overgang van zandgrond naar kleigrond. De Gement is een inudatievlak geweest tijdens de belegering, ook omdat er sprake is van kwelwater (water dat zich door de overgang van zand naar klei omhoog drukt). Het beloop van de dijk was tot 1957 nog zichtbaar aan de hand van het slotenpatroon. Door de ruilverkaveling van de Gement zijn alle sporen echter uitgewist. Dankzij de luchtfoto's en gedetailleerde hoogtekarten kon dit beloop volledig worden gereconstrueerd.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Naar aanleiding van de luchtfoto's en drone-beelden heeft er (nog) geen validerend veldwerk plaatsgevonden om de interpretatie van de luchtfoto's en dronebeelden te toetsen. Het college van B en W van de gemeente Vught heeft in het *Uitvoeringsprogramma 2021-2026*. Een *nieuwe start* opgenomen dat het in 2023 zal onderzoeken of de Hollandsche Dijk weer zichtbaar gemaakt kan worden. Een van de

gedachtes daarbij is deze toekomstige visualisatie te koppelen aan de klimaatopgave door het plaatsen van zonnepanelen en/of windturbines op het voormalige linietracé. Zo zouden verschillende beleidsdoelen gerealiseerd kunnen worden, daarbij rekening houdend met de kwetsbaarheid van de (natuur)gebieden waar de linie doorheen loopt.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- Hoewel er veel historisch (kaart)materiaal beschikbaar is over het beleg en de inname van de stad tijdens de Tachtigjarige Oorlog, leverden de luchtfoto's nieuwe informatie op. Het was nu mogelijk de linie beter te positioneren en preciezer ruimtelijk vast te leggen.
- Er is na de melding van de ontdekking direct opgeschaald om meer en betere foto's te maken om de ontdekking goed over het voetlicht te kunnen brengen. Het inmeten van de sporen liet enige tijd op zich wachten in verband met beperkte budgetten. Een leerpunt daarbij is dat het verstandig is het belang van de vondst direct kenbaar te maken bij het bestuur, zodat er hogere prioriteit gegeven kan worden aan het inmeten.

Siegerswoude-Middenwei.
Thermisch infrarood remote sensing van
een laat-middeleeuwse nederzetting
J. Waagen (UvA) en M. van der Heiden (RCE)

Administratieve gegevens

Land: Nederland
 Provincie: Friesland
 Gemeente: Opsterland
 Plaats: Siegerswoude
 Toponiem: Middenwei
 RD-coördinaten: 213.784,5/568.631,2
 ARCHIS-onderzoekmelding: 4735433100
 Grondgebruik: grasland

Kernpublicatie

Van Doesburg *et al.* 2022

Overige bronnen

Kaart van het Opsterland uit de Schotanus-Halma-atlas uit 1718
 Actueel Hoogtebestand Nederland, versie 3

Landschappelijke ligging

Landschap volgens Archeologische Landschappenkaart
 Hoofdlandschap: keileemgebied
 Landschapszone: keileemvlakte
 De keileemvlakten in oostelijk Opsterland zijn voornamelijk bedekt met veld- en laarpodzolgronden. In het onderzoeksgebied bevat de veldpodzolbodem een kenmerkende en zeer humeuze zwarte bovengrond. Onderzoek wijst uit dat grote delen van dit dekzandlandschap in de tiende eeuw waren bedekt met veen.

Geraadpleegde beelden

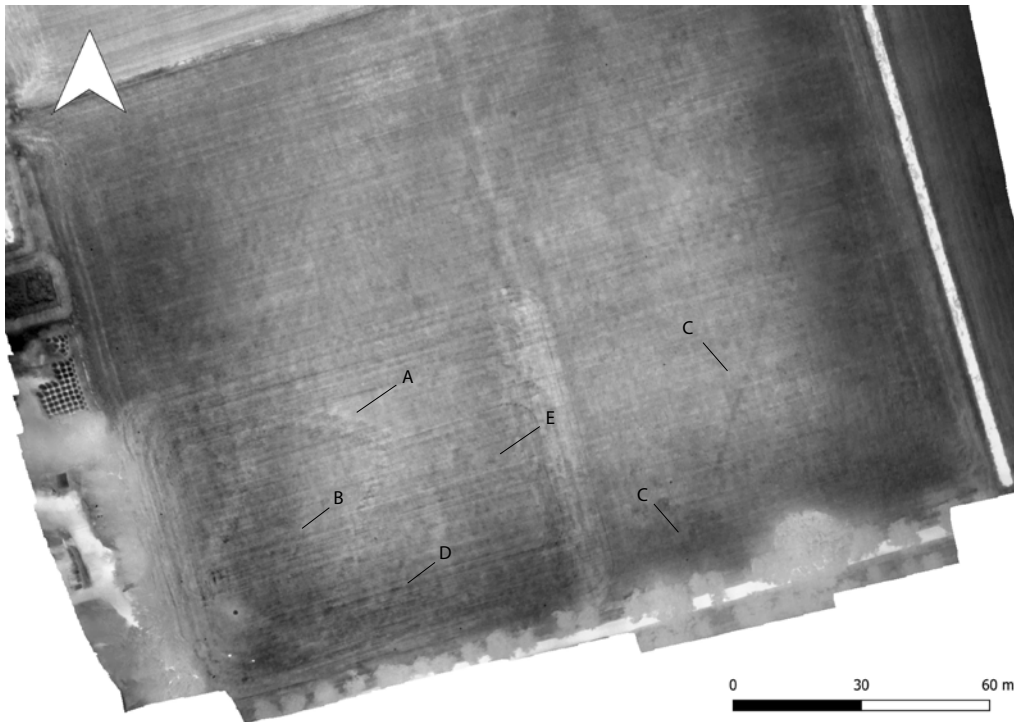
Dronebeelden, thermisch infrarood
 Opnamejaar: 2019
 Opnameseizoen: eind van de zomer (15 september)
 Type opname: thermisch infrarood (8-15 µm)

Wat zien we?

Remote sensing in thermisch infrarood is een relatief nieuwe techniek in het spectrum van archeologische prospectiemethoden. Het gebruik van een thermische camera onder een drone in plaats van een vliegtuig of een satelliet verkleint de afstand en daarmee atmosferische verzwakking (attenuatie) van de emissie van

thermische energie door objecten op en onder het aardoppervlak. Het thermografische onderzoek door middel van een drone te Siegerswoude-Middenwei is onderdeel van een systematisch onderzoek naar gunstige omstandigheden voor het herkennen en in kaart brengen van archeologische sporen. Het is uitgevoerd door het Amsterdam Centre for Ancient Studies and Archaeology (ACASA), een samenwerkingsverband van UvA en Vrije Universiteit, in dit geval in opdracht van de RCE. Afbeelding 8.11 toont een opname van 1.30 uur 's nachts, bestaande uit een fotogrammetrisch gecreëerde orthofoto van de thermische straling, opgebouwd uit 92 gekalibreerde thermogrammen.¹⁴⁹ De foto's zijn genomen op 100 m hoogte. Aangemerkt zijn de meest in het oog springende sporen (A t/m E) waaraan een archeologische interpretatie wordt gegeven. Het meest in het oog springende spoor in afbeelding 8.11 is de rechthoekige greppel die het westelijke terrein omsluit (A). Deze greppel is ook te zien op de luchtfoto en op de AHN3-gegevens, maar heeft dus ook een duidelijke thermische signatuur (warmer dan de directe omgeving). De noordelijke greppel laat een dubbele lijn zien, die licht waarneembaar is op de orthofoto en niet op het AHN3. In het centrum van het omgreppelde terrein bevindt zich een donker (kouder dan de directe omgeving), afgerond rechthoekig spoor (B) in dezelfde oriëntatie als de greppel. De exacte interpretatie van dit spoor is onduidelijk, maar het zou een ondiepe greppel kunnen zijn. De signatuur is vergelijkbaar met die van andere sporen, met name de lijnen die zich vanuit het zuidwesten naar het noordoosten uitstrekken (C), en de greppel die gelegen is in een tweede, oostelijk perceel (D). De greppel van het oostelijke perceel lijkt de hoek om te gaan en door te lopen in een greppel (E) met een vergelijkbare signatuur als de noordelijke dubbele greppel van het westelijke perceel, die traceerbaar is op het AHN3. Het duidelijkst is spoor C, dat niet waarneembaar is op de orthofoto, maar wel op het AHN3. In het thermische beeld is ook te zien dat spoor C naar het zuidwesten doorloopt, daar waar het op het AHN3 niet meer zichtbaar is. Dat zou kunnen betekenen dat de donkere sporen (C en D) kleine greppels zijn. In de dagen voorafgaand aan de thermische opnames heeft het vrijwel elke dag geregend. De temperatuurverschillen tussen dag en nacht

¹⁴⁹ Voor een beschrijving van de methoden en technieken van het thermografische onderzoek in Siegerswoude, zie Van Doesburg *et al.* 2022, 42-44.



Afb. 8.11 Op de thermische beelden zijn verschillende verkleuringen bij de letters A tot en met E te zien (bron: Van Doesburg *et al.* 2022, afb. 5.3).

waren groot, ca. 21 °C overdag tot ca. 6 °C 's nachts, met bewolking en af en toe directe zon. Dat betekent dat de zandige toplaag van de lokale bodem vochtig is geweest en overdag geleidelijk is opgewarmd. De donkere sporen houden waarschijnlijk meer vocht vast en veranderen minder snel van temperatuur. Ze blijven kouder. Boven de greppels daarentegen groeit minder vegetatie en daar wordt juist minder vocht vastgehouden, waardoor deze overdag sneller opwarmen en 's nachts sneller afkoelen. Dit effect valt af te leiden uit de opnames die om 6.00 's ochtends zijn gemaakt.

Wat is de archeologische interpretatie?

De thermische opnames laten twee grote rechtehoekige terreinen zien met dezelfde oriëntatie en afmetingen. Het westelijke terrein tekent zich zeer duidelijk af, terwijl het oostelijke terrein veel minder zichtbaar is. De terreinen zijn 1200 m² groot en zijn geïnterpreteerd als erven, begrensd met een greppel. De greppel rondom het westelijke terrein is veel breder uitgegraven. Mogelijk duidt dit op een verschil in functie tussen beide erven. De terreinen liggen ten oosten van een voorwerk van het benedictinensenklooster uit Smalle Ee en vermoedelijk is deze grond ook in eigendom geweest van het

klooster. Op de kaart van het Opsterland uit de Schotanus-Halma-atlas uit 1718 staan op deze locatie zes 'oude huys steeden'. Het feit dat ze in de vroege achttiende eeuw nog genoemd worden, doet vermoeden dat zij op dat moment nog niet al te lange tijd waren verlaten.

Wel of geen validatie, en zo ja, wat heeft dit opgeleverd?

Het westelijke terrein is door middel van proefleuven onderzocht (afb. 8.12). Het terrein is niet direct een erf te noemen vanwege het ontbreken van een boerderij – al is het mogelijk dat er wel een boerderij heeft gestaan, maar dat deze op een wijze is geconstrueerd die weinig tot geen sporen achterlaat (bijvoorbeeld op stiepen). Op basis van het archeologische onderzoek in combinatie met een bureauonderzoek wordt het geheel geïnterpreteerd als een aanzet tot de ontginning van het omliggende veengebied. Vermoedelijk werd dit vanuit het klooster geïnterpreteerd, waarbij eerst meerdere percelen zijn uitgezet met smalle greppels. Delen hiervan waren te zien op de thermische opnames (A, D en E). Op het westelijke perceel is de initiële smalle greppel vergroot en heeft men een vier meter brede gracht aangelegd. De gracht heeft deels een functie gehad in de ontwatering van



Afb. 8.12 Ook in de proefsleuven bleken de grote en brede sporen die op de remote sensing-beelden duidelijk zichtbaar waren, aanwezig te zijn als opgevulde greppels van ca. 4 m breed (bron: Van Doesburg *et al.* 2022, afb. 5.13).



Afb. 8.13 De vulling van de greppels kent een vrij rommelige structuur van zand en dunne, venige lagen (bron: Van Doesburg *et al.* 2022, afb. 5.14).

het veengebied, maar ook heeft men hiermee leem gewonnen. De brede gracht is tot anderhalve meter onder het huidige maaiveld gegraven, dwars door een compact leempakket (afb. 8.13). De leem die zo is gedolven, is gebruikt om het terrein op te hogen. Ten (noord)oosten van het omgrachte terrein waren ontwatering-greppels gegraven die ook op de thermische opnames zichtbaar waren (C). De centrale depressie blijkt een verdieping te zijn, waarbij het zand is afgegraven tot men op de harde leem kwam. Hierna is in de verdieping een waterput aangelegd, geflankeerd door enkele palen. Van de afgeronde rechthoek (B) die op de infrarood-beelden te zien is rondom deze centrale depressie, is geen spoor teruggevonden. De vermoedelijke oorzaak hiervan moet gezocht worden in een geringe diepte van het spoor in combinatie met de onregelmatige diepe ploegvoren.

Op basis van aardewerkvondsten wordt deze ontginning in de dertiende eeuw gesitueerd.

Succesvol is de ontginning waarschijnlijk niet geweest: er is slechts een handvol scherven aangetroffen. Ook lijkt het oostelijke perceel nooit in gebruik te zijn genomen.

Wat zijn belangrijke leermomenten?

- In het kader van het experimentele karakter van het thermografische onderzoek met een drone is de casestudy Siegerswoude-Middenwei zeer nuttig geweest. Thermografie is goed in staat om sporen te traceren, ook waar deze niet zichtbaar zijn op de orthofoto en op het AHN3.
- Keerzijde is dat spoor B (afb. 8.11) geen archeologisch waarneembaar profiel heeft, waardoor de aard en de exacte diepte onduidelijk blijven.
- Variabelen als bodemsamenstelling, de aard van de archeologische sporen, tijdstip van opname en vochtigheid zijn belangrijke factoren in thermische prospectie. Deze casestudy is daar een goed voorbeeld van.

9 Drone remote sensing en kennisonwikkeling: Hof van Maarland

J. Orbons

Droneluchtfotografie in de proeftuin Hof van Maarland bij Eijsden

Drone remote sensing is de jongste tak van archeologische prospectie. In Nederland is daarmee nog relatief weinig kennis en ervaring opgedaan. Experimenteel onderzoek, bij voorkeur met verschillende technieken en over een periode van verscheidene jaren, is dan ook belangrijk in het kader van methoden en kennisonwikkeling. Dronevluchten kunnen zonder uitgebreide voorbereiding, tegen minimale kosten en op vrijwel elk gewenst tijdstip en elke gewenste locatie worden uitgevoerd. Dit biedt de mogelijkheid om archeologische locaties onder diverse condities vanuit de lucht te fotograferen. De 'proeftuin' Hof van Maarland bij Eijsden in Zuid-Limburg toont aan dat droneluchtfotografie van duidelijke meerwaarde kan zijn voor inventariserend veldonderzoek. In het onderzoeksgebied van 1,5 ha heeft Joep Orbons – buiten de context van de 'Malta-archeologie' – van maart 2020 tot en met

augustus 2022 maar liefst 35 dronevluchten uitgevoerd. In combinatie met twee andere prospectiemethoden (geofysisch onderzoek en oppervlaktekartering) heeft het droneonderzoek nieuwe gegevens opgeleverd over de locatie, omvang en gebouwcontouren van de Hof van Maarland uit het begin van de nieuwe tijd (1500-1619). Ook is informatie verzameld over de omstandigheden (zoals bodem, weersomstandigheden en fase van gewasgroei) waaronder muurresten van de hofstede als gewasverkleuringen (*crop marks*) zichtbaar zijn. Een belangrijk resultaat is dat deze verkleuringen zich alleen in perioden van droogte in bepaalde groeifasen van winter-tarwe voordoen en niet van mais en groenbemester. Ten slotte is uit methodisch oogpunt belangrijke informatie verzameld over de toepasbaarheid van verschillende luchtfototechnieken in drone remote sensing als nieuwe methode van archeologische prospectie.

9.1 Inleiding

9.1.1 Aanleiding

Luchtfoto's worden al ruim honderd jaar gemaakt vanuit ballonnen, vliegtuigen en de laatste jaren ook vanuit drones. Voor archeologisch onderzoek zijn luchtfoto's al direct ingezet, getuige luchtfoto's van Stonehenge uit 1906.¹⁵⁰ Van het uitgebreide luchtfotoarchief van O. Braasch is bekend dat voor een goed archeologisch beeld meerdere malen over een locatie gevlogen moet worden, onder verschillende gewas-, bodem- en terreinomstandigheden.¹⁵¹ Soms zijn sporen herkenbaar, soms niet. Systematisch prospectief onderzoek zal dus moeten bestaan uit het nemen van talrijke reeksen van luchtfoto's gedurende een lange tijd. Het frequent vliegen specifiek voor archeologische doeleinden is echter vaak niet haalbaar, mede omdat de inhuur van vliegtuig en piloot hoge kosten met zich meebrengt. Met de introductie van drones is archeologische luchtfotografie een stuk eenvoudiger geworden.

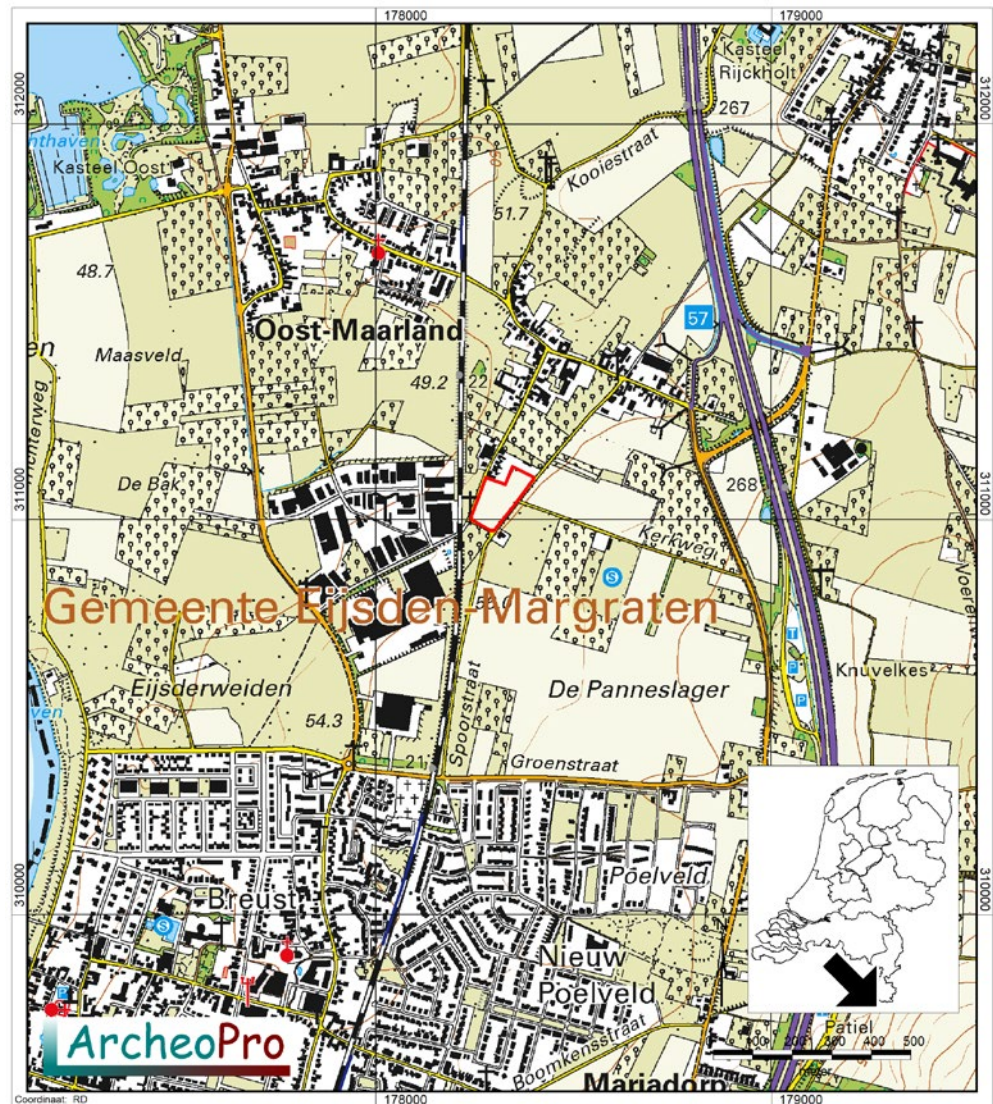
Dronevluchten kunnen zonder uitgebreide voorbereiding, tegen minimale kosten en op vrijwel elk gewenst tijdstip en elke gewenste locatie worden uitgevoerd. Dit biedt de mogelijkheid om archeologische locaties onder diverse condities vanuit de lucht te fotograferen. Ook kan worden geëxperimenteerd met verschillende luchtfototechnieken om daaruit lering te trekken.

9.1.2 Doelstelling

In grote lijnen is bekend welke typen van archeologische vindplaatsen met welke methoden van veldwerk kunnen worden opgespoord. Voor het verzamelen van artefacten aan het maaiveld is oppervlaktekartering, bij voorkeur met goede vondstzichtbaarheid (bijvoorbeeld uitgeregende akkers), de meest geschikte methode. Muurresten zijn goed detecteerbaar met weerstandsmetingen en oude waterlopen kunnen in kaart worden gebracht met booronderzoek. Tijdens de droge en hete zomer van 2018 waren archeologische greppel- en andere structuren goed zichtbaar als *crop*

¹⁵⁰ Wilson 1982.

¹⁵¹ Christlein & Braasch 1982.



Afb. 9.1 Ligging van het onderzoeksgebied Hof van Maarland, aangeduid met een rode contourlijn, op de topografische kaart.

marks vanuit kleine motor- en zweefvliegtuigen. Naar de diverse parameters die bepalen of, en zo ja op welke wijze archeologische sporen zich in luchtfoto's aftekenen, wordt al langer onderzoek gedaan.¹⁵² Toch is ook nog veel niet bekend en zijn er belangrijke vragen. Hoe beïnvloedt de bodemvochtigheid de metingen, en hoe gedragen gewassen zich boven muurresten, greppels en andere archeologische verschijnselen in de ondiepe ondergrond? Onder welke omstandigheden zijn archeologische sporen als gewasverkleuringen (*crop marks*) aan het maaiveld zichtbaar? En welke technieken van luchtfotografie bieden het beste resultaat als het gaat om het (beter) zichtbaar maken en

vastleggen van gewasverkleuringen? Het beantwoorden van deze vragen door middel van drone remote sensing was een belangrijke doelstelling van het onderzoek.

9.1.3 Onderzoeksgebied Hof van Maarland

Voor het beantwoorden van bovenstaande vragen is een experimentele 'proeftuin' heel handig: een locatie waarvan de aard, datering en ruimtelijke verspreiding van archeologische resten min of meer bekend zijn, waarvan het

¹⁵² Wilson 1982.

bodemprofiel intact is en waar geen sprake is van overbouwde delen of percelen waar gebouwd gaat worden. Een proeftuin, kortom, die zich leent voor meerjarig drone- en ander veldonderzoek, uiteraard met toestemming van de grondeigenaar, landbouwer en/of pachter. In Maarland, een dorpje direct ten noorden van Eijsden in Zuid Limburg, diende zich in 2020 een dergelijke locatie aan (afb. 9.1). Het gaat om een relatief klein perceel (oppervlakte 1,5 ha) met daarin de archeologische overblijfselen van een zestiende-eeuwse boerderij. De grondeigenaar en landbouwer waren zo vriendelijk om toestemming te geven voor het uitvoeren van het onderzoek.

Deze laat-middeleeuwse boerderij is een ideale testlocatie. Na de bouw ervan rond 1500 is het gebouw slechts 100 jaar in gebruik geweest. Het heeft zeer waarschijnlijk slechts één bouwfase gekend, met minimale aanpassingen aan de gebouwen. Na de sloop van de boerderij in het begin van zeventiende eeuw is het terrein alleen als landbouwgrond in gebruik geweest. De archeologische sporen bevinden zich direct onder de bouwvoor. Dit wordt ook bevestigd door informatie van de landbouwer dat hij tijdens het bewerken van het land op 30 cm onder het maaiveld (-mv) op muurresten stuit. In maart 2020 is op deze locatie een onderzoek gestart. Daarbij zijn drie non-destructieve prospectiemethoden toegepast: geofysisch onderzoek, oppervlaktekartering en drone remote sensing. Ze zijn ingezet onder verschillende weers-, gewas- en bodemomstandigheden. Dankzij goed overleg en afstemming met de landbouwer heeft het onderzoek geen hinder voor het agrarisch gebruik van het perceel opgeleverd. Vanwege de ligging van de onderzoeklocatie vlak bij het woonhuis van de auteur kon op vrijwel elk gewenst moment met de drone gevlogen worden. Het onderzoek heeft geen einddatum. In dit hoofdstuk worden de resultaten van maart 2020 tot en met augustus 2022 besproken.¹⁵³

9.2 Bureauonderzoek

9.2.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de resultaten van het bureauonderzoek kort samengevat. Het gaat daarbij om landschappelijke en historische gegevens over de Hof van Maarland.

9.2.2 Geomorfologie, bodem en reliëf

Tijdens de voorlaatste (Saale-) en laatste (Weichsel)ijstijd erodeerde de diep bevroren ondergrond (permafrost) van de hellingen langs het Zuid-Limburgse Maasdal en ontstonden diepe erosiedalen. Het sediment uit deze dalen werd aan de voet van de helling in de vorm van daluitspoelingswaaiers afgezet. Het onderzoeksgebied Hof van Maarland ligt op de rand van zo'n waaier. Het oppervlak ervan is vrij vlak en (deels) afgedekt met zandige löss. Aan de westkant ligt een lösswand met korte steile hellingen. Deze wand is ontstaan in het laatpleistoceen en vormt de overgang naar een lager gelegen rivierterras van de Maas. Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) wijst eveneens op de ligging van het onderzoeksgebied op de rand van een relatief hooggelegen Maasterras. Als we inzoomen op dit gebied, is over een lengte van 75 m een in westelijke richting geleidelijk aflopend oppervlak te zien van 90 cm hoog (van ca. 54,25 m tot 53,35 m NAP) (afb. 9.2).

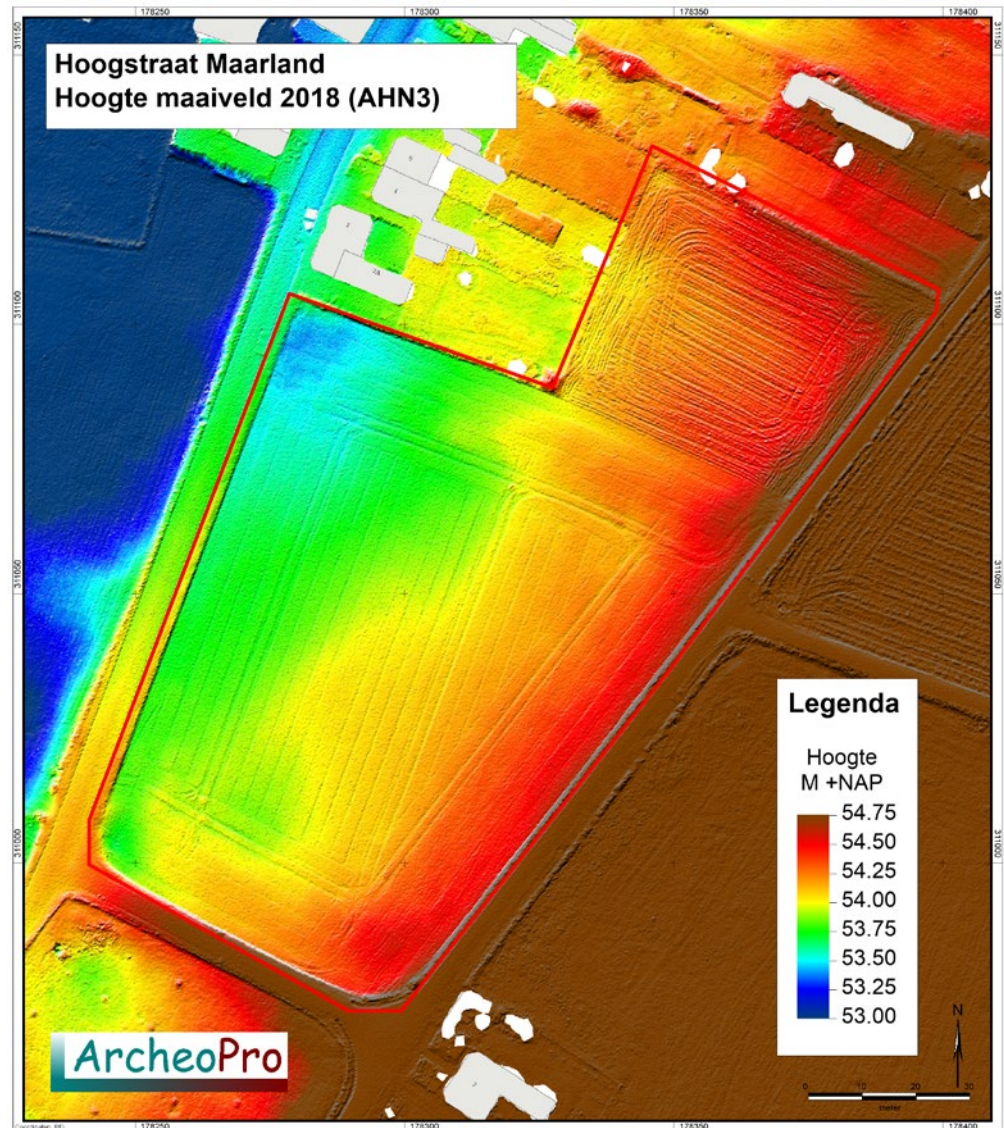
9.2.3 Historie van de Hof van Maarland, een wandelend ontginningsdorp

In zijn historisch-geografische studie van het middeleeuwse landschap kenmerkt Hartmann Maarland als een wandelende nederzetting.¹⁵⁴ Het ruime nederzettingsareaal behoorde in de vroege middeleeuwen tot de heren van Breust uit Eijsden.¹⁵⁵ Vanuit de agrarische kern Breust is langs de rand van het Maasterras de ontginning in gang gezet. De nederzetting schoof met de ontginning mee in noordoostelijke richting.

¹⁵³ Zie ook Orbons 2020, 2021, 2022.

¹⁵⁴ Hartmann 1986; Boersma 2004.

¹⁵⁵ De motte van de heren van Breust lag ca. 1250 m naar het zuidwesten in Eijsden-Breust: Vanneste & Ostkamp 2013.



Afb. 9.2 Uitsnede uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) van het onderzoeksgebied Hof van Maarland en directe omgeving.

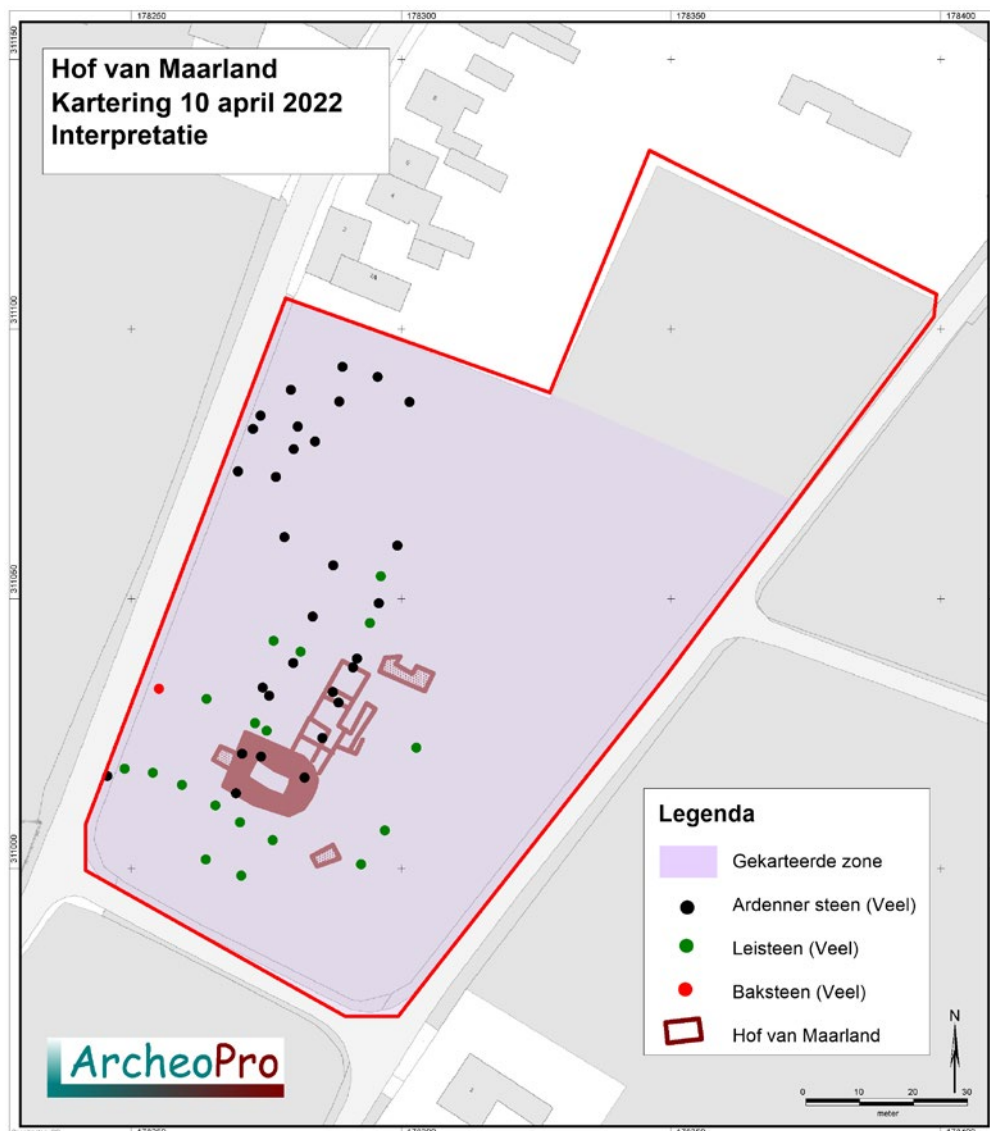
Rond 1100 was ook het gebied ter hoogte van de Hof van Maarland in ontginning. Dit blijkt uit een laat-middeleeuwse boerderij die 200 m westelijk is opgegraven en uit een laat-middeleeuwse kapel 50 m ten westen van de hof.¹⁵⁶

Rond 1500 werd binnen het onderzoeksgebied de Hof van Maarland gebouwd. Deze laathof functioneerde als laagste rechtbank waar recht werd gesproken over land en goederen binnen de eigen nederzetting. Al bij een goedereninventarisatie in 1619 was de Hof van Maarland alweer verdwenen. In de loop der tijd verplaatste de

kern van Maarland zich verder in noordoostelijke richting. De rol van de laathof werd overgenomen door een andere boerderij op de plaats waar nu een grote carréboerderij aan de St. Jozefstraat 62 ligt.

Het onderzoeksgebied is na 1619 nooit meer bebouwd geweest, maar afwisselend als akkerland, boomgaard en weiland gebruikt. De historische kaarten laten op het terrein geen enkele vorm van bebouwing zien. Ook zijn geen kaarten of afbeeldingen van de Hof van Maarland zelf bekend.

¹⁵⁶ Opmerkelijk is dat de kapel is blijven functioneren in de kern van Maarland, terwijl het dorp inmiddels 500 m naar het noordoosten opgeschoven was. De kapel is bij de aanleg van de spoorlijn in 1860 gesloopt (Habets 1865). Resten ervan zijn bij opgravingen in 1992 aangetroffen (mondelijke mededeling J.P. de Warrimont en L. Verhart).



Afb. 9.3 Resultaten van de oppervlaktekartering van 10 april 2022 voor de categorie bouwmaterialen waaraan de score 2 (relatief veel vondsten) is toegekend.

9.3 Informatie uit andere prospectiemethoden

9.3.1 Inleiding

In het onderzoeksgebied Hof van Maarland zijn drie onderzoeksmethoden toegepast, namelijk drone remote sensing, oppervlaktekartering en geofysisch onderzoek. De toepassing van beide laatstgenoemde methoden had mede tot doel om de bevindingen van het droneonderzoek te

toetsen. In deze paragraaf worden de resultaten ervan kort besproken.

9.3.2 Oppervlaktekartering

In april 2022 is in het gehele onderzoeksgebied een oppervlaktekartering uitgevoerd in raaien met een tussenafstand van 4 m. Archeologisch vondstmateriaal (vuursteen en aardewerk) is verzameld en met *global positioning system* (GPS) ruimtelijk vastgelegd. Beide vondstcategorieën zijn gelijkmatig verspreid over de akker aange-

troffen. Het aardewerk bestaat uit steengoed en modern (bemestings)aardewerk, maar ook uit enkele scherven Pingsdorfaardewerk.

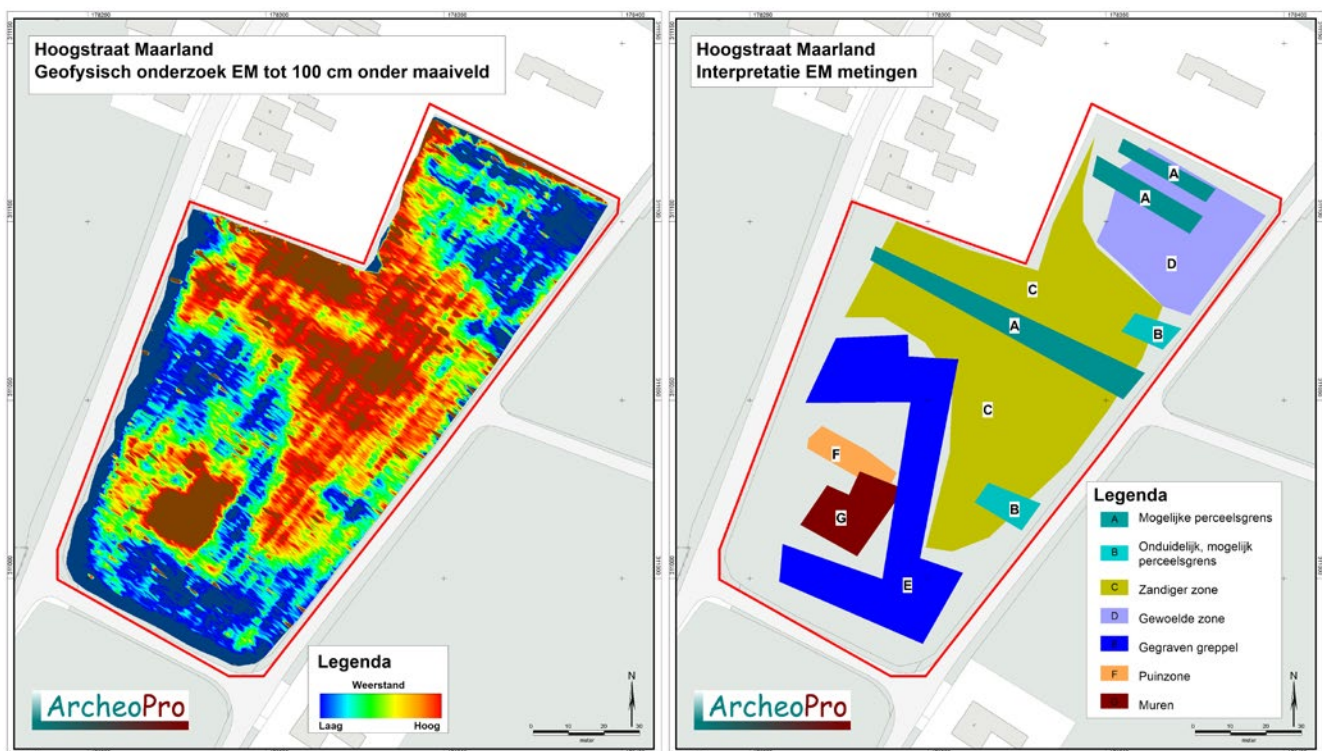
Bouwmaterialen in de vorm van natuursteen, leisteen en baksteen zijn elke 5 m gescoord met 0 (geen vondsten), 1 (een vondst of weinig vondsten) en 2 (relatief veel vondsten). Fragmenten van Ardenner blauwsteen komen in een opvallende concentratie aan de westrand van het terrein voor (afb. 9.3). Leisteen is vooral in de zuidwestelijke hoek aangetroffen. Van baksteen is slechts een enkel fragment gevonden. Het spectrum van het bouw materiaal wijst op een gebouw van voor 1550, waarbij voornamelijk gebruik is gemaakt van Ardenner steen en lokale kalksteen (mergel). Mergel is tijdens de oppervlaktekartering niet aangetroffen, waarschijnlijk omdat het snel aan het oppervlak verweert. Onder de bouwvoor kunnen muurresten van mergel zeker nog aanwezig zijn.

9.3.3 Geofysisch onderzoek

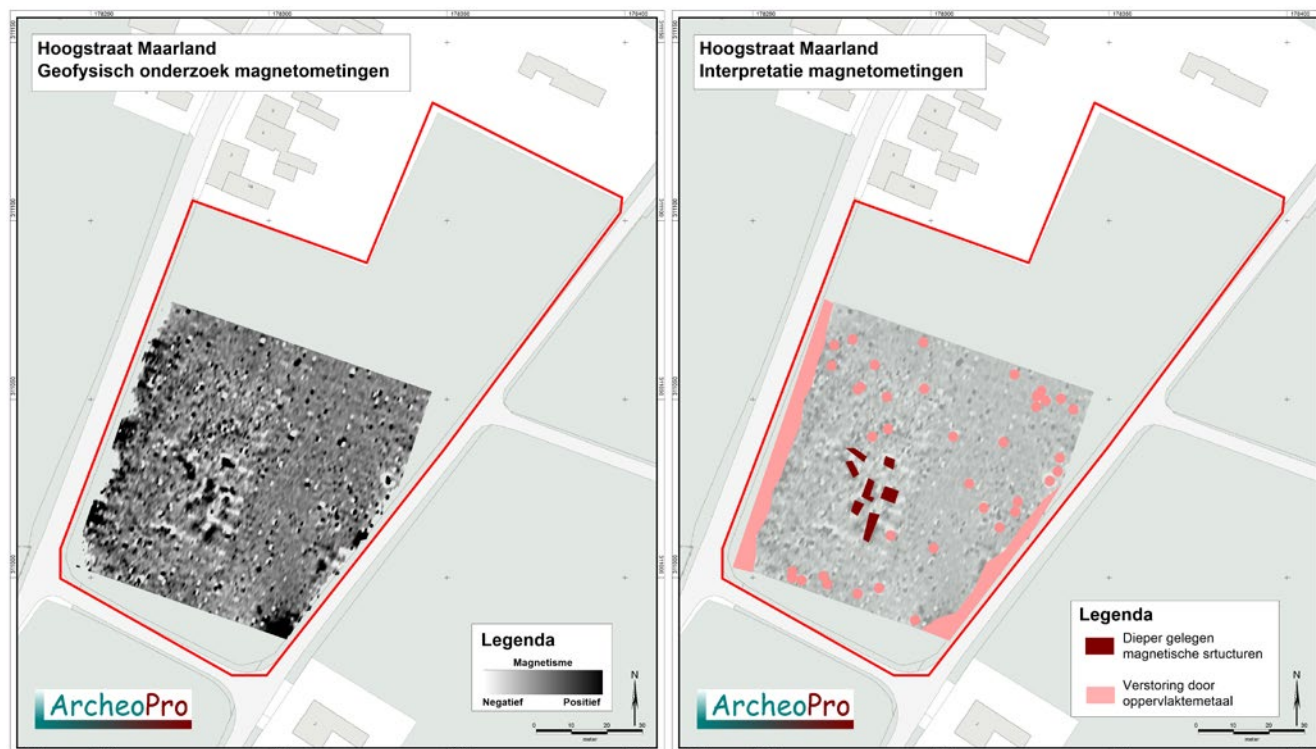
Geofysisch onderzoek is bij uitstek geschikt voor het opsporen van resten van stenen muren en funderingen in de ondiepe ondergrond. Er zijn diverse geofysische technieken en elke techniek heeft zijn eigen eigenschappen en specificaties. Omdat het onderzoeksgebied een testlocatie is, zijn alle beschikbare geofysische technieken ingezet.

Elektromagnetisch onderzoek (EM)

Elektromagnetisch geofysisch onderzoek is een relatief snelle methode om archeologische structuren in de ondergrond op te sporen. De snelheid van meten heeft als nadeel dat de metingen geen details laten zien. In de meetresultaten komen structuren vrij vaag en uitgesmeerd tot uitdrukking. Het onderzoeksgebied Hof van Maarland is tweemaal vlakdekkend gemeten met de CMD Mini explorer. Eenmaal is een kleiner gebied van 30 x 30 m gemeten voor detailonderzoek. In de meetresultaten tot 100 cm -mv zijn zuidwest-noordoost lopende



Afb. 9.4 Resultaten (links) en interpretatie (rechts) van het elektromagnetisch (EM-) onderzoek in het onderzoeksgebied Hof van Maarland.



Afb. 9.5 Resultaten (links) en interpretatie (rechts) van het magnetometeronderzoek in het onderzoeksgebied Hof van Maarland.

strepen herkenbaar (afb. 9.4, links). Ze zijn het resultaat van ploegen en corresponderen met de ploegrichting. In het noordoostelijke deel is de bodem diep verstoord door ploegactiviteiten (afb. 9.4, rechts: D). In de zuidwesthoek is een duidelijk begrensde zone met lagere weerstandswaarden (blauw en blauwgroen) herkenbaar. Binnen deze zone ligt een (omgekeerd) L-vormige structuur met hoge weerstandswaarden (roodbruin). De interpretatie is dat het hier gaat om de muurresten van een zwaar gefundeerd gebouw (afb. 9.4, rechts: G) omgeven door een niet-bebouwde zone, mogelijk een gegraven greppel (afb. 9.4, rechts: E). Deze zone strekt zich op twee plekken uit tot de westelijke begrenzing van het onderzoeksgebied. Het lijkt erop dat daarmee een groot deel van de erfgrans van het boerderijcomplex is vastgesteld.

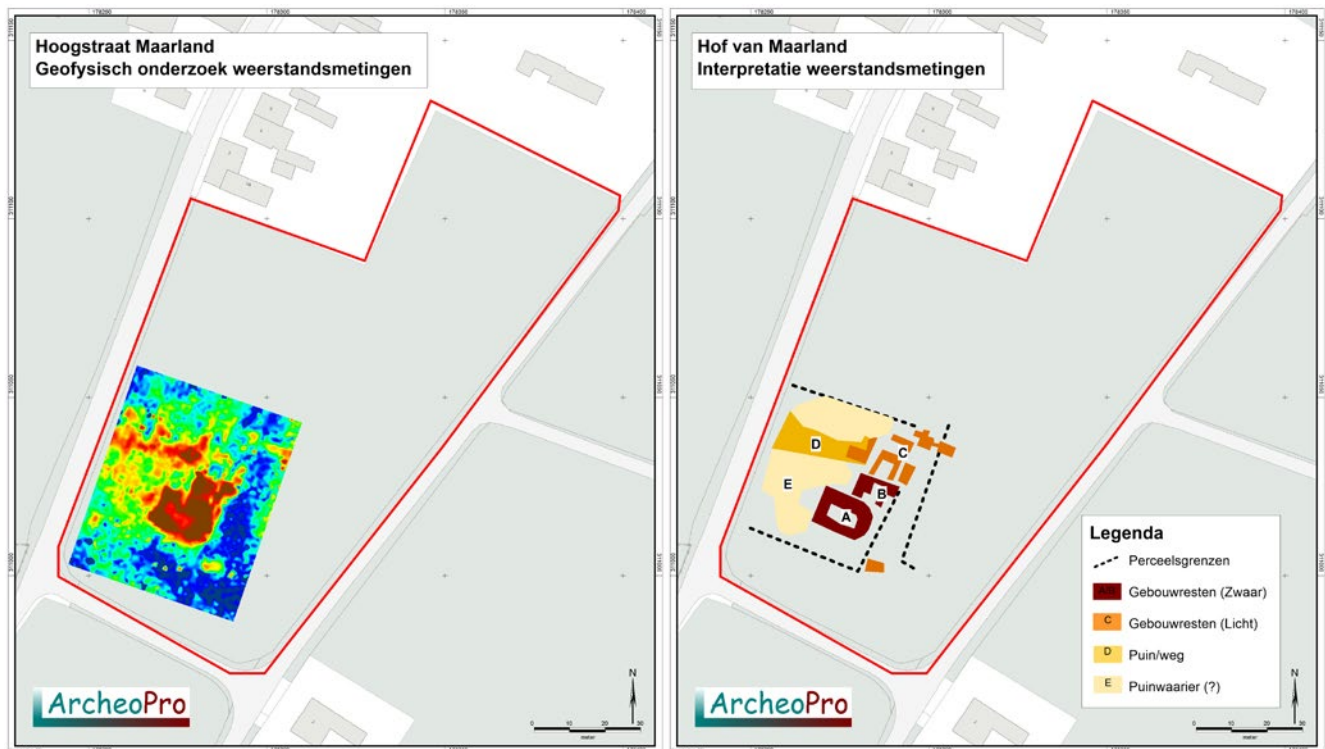
Magnetometeronderzoek

Onderzoek met de magnetometer kan inzicht geven in de aanwezigheid en ruimtelijke verspreiding van baksteenfunderingen en ijzer- en steenovens. Een vierkant van 80 x 80 m rondom de locatie van de veronderstelde resten van het hoofdgebouw is met de magnetometer

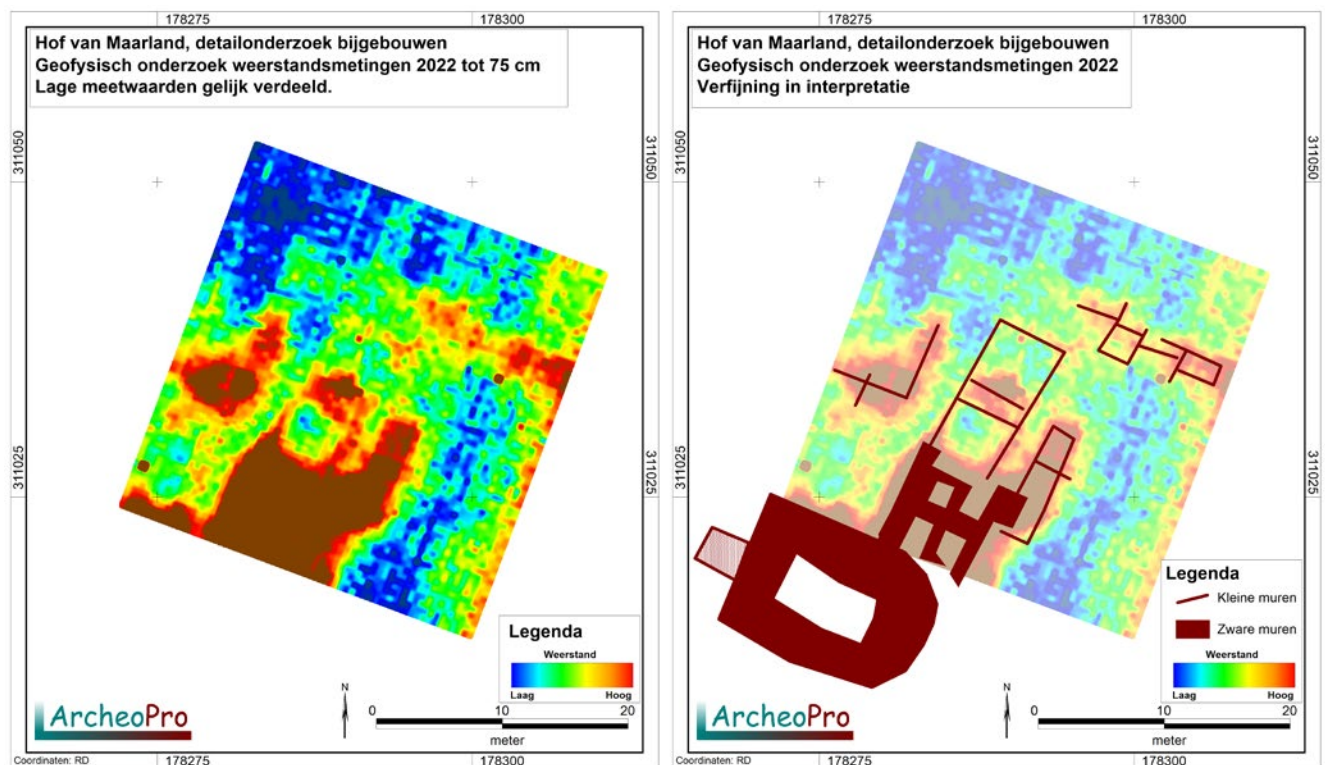
onderzocht (afb. 9.5, links). Uit de magnetometingen kan geen duidelijke beeld worden gedistilleerd. In de metingen komen de muurresten als een rommelige magnetische zone naar voren. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er geen of weinig baksteen is gebruikt. Mogelijk is in het centrale deel sprake van kleine locaties met dieper gelegen magnetisch materiaal, zoals ijzer (afb. 9.5, rechts). De veronderstelling dat baksteen in de funderingen ontbreekt, komt overeen met de resultaten van de oppervlaktekartering (zie boven).

Weerstandsonderzoek

Weerstandsonderzoek (*electrical resistivity*) is een geofysische techniek die meer tijd kost dan magnetometeronderzoek, maar over het algemeen levert zij wel scherpere beelden van archeologische sporen en structuren in de ondergrond op. Zo ook bij het onderzoek naar de Hof van Maarland. Er zijn drie series weerstandsmetingen verricht. Als eerste is een gebied van 50 x 60 m onderzocht waar de EM-meetresultaten (zie boven) wijzen op de aanwezigheid van gebouwresten. Het doel ervan was meer details van de fundering van dit gebouw in beeld te brengen. Dat is ook goed



Afb. 9.6 Resultaten (links) en interpretatie (rechts) van het weerstandsonderzoek in het zuidwestelijke deel van het onderzoeksgebied Hof van Maarland.



Afb. 9.7 Resultaten (links) en interpretatie (rechts) van het detailweerstandsonderzoek van de bijgebouwen in het zuidelijkwestelijke deel van het onderzoeksgebied Hof van Maarland.

gelukt. Er is duidelijk onderscheid te maken tussen enerzijds de funderingen van het gebouw (afb. 9.6, rechts: A/B) en anderzijds de puinwaaier ten westen hiervan (afb. 9.6, rechts: E). Dit onderscheid is in de EM-metingen niet vastgesteld. Verder lijkt het of er een soort puinband vanaf het gebouw in westelijke richting naar de weg loopt. Mogelijk is dit de toegangsweg tot het gebouw of een sloopweg geweest (afb. 9.6: D). Ook de erf- of perceelsgrens is in het weerstandsonderzoek herkenbaar en scherper vastgesteld (gestippelde lijn in afb. 9.6, rechts).

Bij de tweede serie metingen zijn ERT-weerstandsmetingen met meerdere elektrodanafstanden verricht over een oppervlakte van 30 x 30 m ter hoogte van het hoofdgebouw. Deze hogeresolutieweerstandsmetingen laten meer details van het hoofdgebouw zien, maar voegen niet veel nieuwe informatie toe. Als derde serie zijn hogeresolutieweerstandsmetingen verricht ten noorden van het hoofdgebouw, waar vermoedelijk de bijgebouwen hebben gestaan (afb. 9.7, links). Resten van de bijgebouwen zijn in de eerder uitgevoerde geofysische metingen niet herkend, vermoedelijk omdat ze worden overschaduwd door de muren van het hoofdgebouw. Maar ook in de

detailmetingen zijn deze resten van waarschijnlijk kleine muren lastig te interpreteren (afb. 9.7, rechts), zelfs als we hierbij de informatie betrekken die we hebben verkregen uit de droneluchtfoto's (paragraaf 9.4). Hier hebben de luchtfoto's een duidelijke meerwaarde ten opzichte van de weerstandsmetingen.

9.4 Drone remote sensing

9.4.1 Inleiding

Het onderzoeksgebied Hof van Maarland heeft een oppervlakte van 1,5 ha en deze grootte is bij uitstek geschikt voor het overvliegen met een kleine drone. In de periode van maart 2020 tot en met augustus 2022 zijn 35 dronevluchten uitgevoerd en talrijke luchtfoto's genomen bij verschillend grondgebruik: mais (tweemaal), wintergraan en groenbemester. Ook is er gevlogen in de tussenliggende perioden, waarin het terrein braak lag. De vluchten zijn zoveel mogelijk uitgevoerd op dagen dat er veranderingen in bodem- of gewasomstandigheden zichtbaar waren of dat dergelijke veranderingen werden



Afb. 9.8 Vliegen met de drone vanaf de straat net buiten het onderzoeksgebied.

verwacht, bijvoorbeeld tijdens de aanvang van een periode van droogte, regen of vorst. Dankzij de ligging van het onderzoeksgebied, dicht bij het kantoor van de auteur, was het heel eenvoudig om de terreinomstandigheden, het grondgebruik en de staat van de gewassen met eigen ogen bij te houden. Ook is geëxperimenteerd met verschillende fototechnieken om de kans op zichtbaarheid van bodem- en gewasverkleuringen te optimaliseren.

9.4.2 Experimenteren met onderzoeksmethoden

De dronevluchten zijn uitgevoerd met een DJI Mavic Air-drone. Deze drone is vanaf de straat eenvoudig te bedienen en snel inzetbaar voor het nemen van luchtfoto's (afb. 9.8). Bij iedere vlucht zijn een of meer orthofoto's verticaal naar beneden gemaakt. In eerste instantie zijn ook orthofoto's gemaakt van de noordoostelijke uitloper van het onderzoeksgebied. In latere opnames is dat deel niet meer meegenomen. Er is geëxperimenteerd met verschillende fototechnieken, zoals oblique luchtfotografie (fotograferen onder een schuine hoek naar beneden). Deze techniek is toegepast vanaf diverse hoogtes en richtingen, en met verschillend lichtval. Bij iedere vlucht is de buitentemperatuur, de vochtigheid van de bodem (droog/nat), het soort gewas en de gewashoogte genoteerd (tabel 9.1). Verder is vastgelegd of op de luchtfoto's vegetatieverkleuringen (*crop marks*) zichtbaar zijn als aanwijzing voor archeologische sporen en resten in de ondiepe ondergrond. Ook is genoteerd welke typen luchtfoto's gemaakt zijn, wat de lichtsituatie was (strijklicht of gewoon licht) en of in de dronecamera filters gebruikt zijn. Als laatste werden bijzonderheden genoteerd over de vlucht.

9.4.3 Vlieghoogte en resolutie

Luchtfoto's die in één opname een overzicht bieden van het gehele terrein, zijn gemaakt van 100 à 110 m hoogte. Vanaf deze hoogte is het mogelijk om een gebied van 165 x 125 m te fotograferen. Daarmee zijn voldoende referentiepunten aanwezig om de luchtfoto's te kunnen

georefereren. De camerabeelden hebben een resolutie van 4056 x 3040 pixels. Dit correspondeert met een pixelresolutie van 4 cm. Dit is ruim voldoende voor een goed zicht op gewasverkleuringen.

9.4.4 Moment van vliegen

Het moment van vliegen is bepaald door:

- verandering van grondgebruik en bodem, bijvoorbeeld wanneer het perceel net gecultiveerd of opgedroogd was, of tijdens vorstdagen;
- verandering in het groeischema van het gewas, bijvoorbeeld bij vers uitkomende kiemen, en tijdens groeispurten en rijping van het gewas;
- veranderingen in de weersomstandigheden: droogte, regenval of na veranderingen daarin;
- vluchten tussendoor om ook onbekende fenomenen vast te leggen (indien van toepassing).

9.4.5 Zonnestand

De meeste vluchten zijn overdag uitgevoerd op tijdstippen dat de zon redelijk hoog aan de horizon stond. Er is altijd gevlogen onder zonnige of licht bewolkte condities. Er zijn geen luchtfoto's gemaakt op momenten dat wolken schaduwen wierpen op het onderzoeksgebied. De vluchten 16, 25, 30 en 35 zijn bij avondzon uitgevoerd voor het vaststellen van de effecten van strijklicht op het gewas (zie tabel 9.1). In de zomer kan de zon voor schittering in de foto's zorgen. Dat bemoeilijkt de zichtbaarheid en beoordeling van eventuele verkleuringen in een (bepaald deel van) de foto. De luchtfoto's van de vluchten 16, 17, 18 en 31 zijn met en zonder polarisatiefilter gemaakt om de beeldkwaliteit van beide opnames met elkaar te kunnen vergelijken.

Tabel 9.1 Overzicht van de gegevens van de droneluchtfoto's

Vlucht-nummer	Datum	Gewas	Grondsituatie	Temperatuur (°C)	Sporen zichtbaar
1	19 maart 2020	geooft land, braakliggend	droog	13	nee
2	7 mei 2020	vers gecultiveerd en mais ingezaaid	droog	21	nee
3	13 mei 2020	mais 5 cm hoog	droog	13	nee
4	25 mei 2020	mais 5 cm hoog	droog	20	nee
5	7 juni 2020	mais 30 cm hoog	vochtig na paar dagen regen	15	nee
6	21 juni 2020	mais 70 cm hoog	droog na natte periode	22	nee
7	23 juli 2020	mais 190 cm hoog	droog	28	nee
8	24 januari 2021	wintergraan 5 cm hoog	vochtig	1	nee
9	14 februari 2021	wintergraan 5 cm hoog	vochtig	5	nee
10	23 februari 2021	wintergraan 8 cm hoog	droog	16	nee
11	26 maart 2021	wintergraan 15 cm hoog	vochtig	13	nee
12	30 april 2021	wintergraan 40 cm hoog	droog	12	ja, heel duidelijk
13	5 mei 2021	wintergraan 40 cm hoog	vochtig	8	ja, heel duidelijk
14	17 mei 2021	wintergraan 45 cm hoog	vochtig	12	nee
15	30 mei 2021	wintergraan 45 cm hoog	vochtig	23	een beetje
16	13 juni 2021	wintergraan 50 cm hoog	droog	23	avondopname, in strijklicht een beetje herkenbaar
17	16 juni 2021	wintergraan 50 cm hoog	droog	28	middagopname recht van boven, lastig zichtbaar
18	2 juli 2021	wintergraan 50 cm hoog	nat	22	deels, wel met polarisatiefilter
19	13 juli 2021	wintergraan platgeregend	nat	22	moeilijk
20	12 augustus 2021	wintergraan platgeregend	nat	22	ja, heel duidelijk
21	19 augustus 2021	graanstoppels	nat	22	nee
22	14 september 2021	vers ingezaaid met groenbemester (klaver en <i>faselia</i>)	droog	25	nee
23	10 oktober 2021	groenbemester 10 cm	nat	18	nee
24	7 november 2021	groenbemester 30 cm	nat	12	nee
25	27 november 2021	groenbemester 30 cm	nat	5	nee, foto's met slagschaduw, geen crop marks
26	22 december 2021	groenbemester 30 cm	nat	-1	nee, na twee dagen vorst
27	27 februari 2022	gecultiveerd, openliggende grond	droog	10	nee
28	10 april 2022	braakliggend grond	droog	12	nee
29	28 april 2022	braakliggend grond	droog	16	nee
30	3 mei 2022	ingezaaide mais	droog	14	nee, avondopnames bij strijklicht
31	11 mei 2022	mais 5 cm hoog	droog	25	nee
32	22 mei 2022	mais 10 cm hoog	droog	24	nee
33	1 juni 2022	mais 40 cm hoog	vochtig	14	nee
34	19 juni 2022	mais 80 cm hoog	droog	24	nee
35	12 augustus 2022	mais 225 cm hoog	droog	31	nee, avondopnames bij strijklicht

9.5 Resultaten

9.5.1 Inleiding

De droneluchtfoto's zijn onderling vergeleken en in samenhang geanalyseerd en beoordeeld. Daarbij is specifiek gekeken naar de aanwezigheid van gewasverkleuringen (*crop marks*) als aanwijzing voor 1) funderingen van het hoofgebouw in de zuidwesthoek, 2) eventuele muur- en andere resten van bijgebouwen in de directe omgeving hiervan, en 3) een of meer perceelbegrenzingslijnen. Bovendien is gelet op de aanwezigheid van archeologische bodemverkleuringen (*soil marks*) in perioden dat het perceel braak lag of net was ingezaaid. Ook zijn verschillende fotografietechnieken toegepast om de invloed ervan op de zichtbaarheid van de archeologische structuren te kunnen vaststellen (paragraaf 9.6). De resultaten van het droneonderzoek zijn samengevat in tabel 9.1. In de tabel wordt van elke vlucht de datum vermeld, en wat op die dag het grondgebruik, de weersomstandigheden (temperatuur) en de staat van het gewas en de bodem waren. In de laatste kolom is aangegeven of er archeologische sporen als gewas- of schaduwverkleuringen herkenbaar waren. Deze data zijn, samen met de fotografie-informatie, bij iedere vlucht genoteerd.

9.5.2 Bodemverkleuringen

Grondsporen

Op geen enkele luchtfoto zijn bodemverkleuringen of -sporen (*soil marks*) waargenomen die verband houden met archeologische resten in de ondergrond. De luchtfoto's van vlucht 2 geven het meest egale en ongestoorde beeld van de bodem. Op die dag was het perceel net gecultiveerd en ingezaaid met mais. Ook de vluchten 22 en 30 laten een egaal beeld van de bodem zien. Het neemt niet weg dat sommige luchtfoto's kleine kleurverschillen laten zien. Een voorbeeld hiervan zijn de luchtfoto's van vlucht 22, die zijn gemaakt nadat het terrein met de cultivator bewerkt was en net met groenbemester ingezaaid. Tussen de sporen van de cultivator door zijn de sporen van de oogst van het winter-

graaen enkele maanden daarvoor herkenbaar. Ook het gedetailleerde geofysische onderzoek met de weerstandsmeter van maart 2022 toont duidelijk een iets donkerdere verkleuring van de grond. Deze verkleuring is op de foto's van vlucht 29 eveneens zichtbaar.

Deze kleine kleurverschillen zijn aan het oppervlak niet en vanuit de lucht wel herkenbaar. Ervan uitgaande dat het aanploegen van archeologische sporen ook dergelijke kleurverschillen tot gevolg zou hebben gehad, zouden deze sporen als *soil marks* zeker zichtbaar moeten zijn geweest.

Hoogteverschillen

Subtiële hoogteverschillen van het maaiveld zijn met behulp van fotogrammetrie zichtbaar te maken als kleine kleurverschillen. Op de luchtfoto's van het onderzoeksgebied zijn dergelijke kleurverschillen niet waargenomen.

Vocht-, sneeuw- en vorstverschillen

Kleurverschillen van de bodem ontstaan door vocht, sneeuw en/of vorst zijn niet waargenomen. Deze weersituaties hebben zich in 2,5 jaar droneonderzoek niet of onvoldoende voorgedaan.

9.5.3 Gewasverkleuringen

Dankzij informatie van de landbouwer, de heer Kempener, is er meer duidelijkheid over de effecten van bemesting, maar ook van obstakels als muurresten op de wortel- en plantengroei van de geteelde gewassen. Deze informatie is zeer waardevol om te begrijpen waarom bepaalde gewassen onder bepaalde omstandigheden wel of niet verkleuren (*crop marks*). In de periode maart 2020 tot en met augustus 2022 zijn in het onderzoeksgebied drie soorten gewas geteeld (tabel 9.2).

Gewastype

Mais

Op geen van de droneluchtfoto's die zijn genomen in perioden van maisteelt, zijn gewasverkleuringen (*crop marks*) zichtbaar. Dit is opvallend, aangezien de mais tijdens de groeifase door langdurige droogte, bijvoorbeeld in de zomer van 2022, behoorlijke stress moet

Tabel 9.2 Overzicht van perioden waarin dronevluchten zijn uitgevoerd en het grondgebruik gedurende deze perioden in het onderzoeksgebied Hof van Maarland.

Periode	Vluchten	Gewas	Opmerking
19 maart 2020	1	geen	braakliggend
7 mei-23 juli 2020	2 t/m 7	mais	-
24 januari-19 augustus 2021	8 t/m 21	wintergraan	-
14 september-22 december 2021	22 t/m 26	groenbemester	menging van faselien en klaver
27 februari-28 april 2022	27 t/m 29	geen	braakliggend
3 mei-12 augustus 2022	30 t/m 35	mais	tweemaal ingezaaid

hebben gehad. Desondanks zijn er geen verkleuringen in de mais waargenomen.

Groenbemester

Ook in de groenbemester zijn geen *crop marks* waargenomen. Een mogelijke verklaring hiervoor zijn de natte weersomstandigheden in de tijd dat de groenbemester op het terrein stond. In deze natte periode was er waarschijnlijk genoeg transport van voedingsstoffen en mineralen in de bodem. Zelfs tijdens de laatste groeifase van de groenbemester, waarin het wortelstelsel flink groeit, waren er geen effecten van muurresten op de gewasgroei zichtbaar. Volgens de landbouwer gebruikt de groenbemester in deze groeifase veel voedingsstoffen uit de bodem. Deze stoffen worden opgenomen in de wortels van de plant. Aan het maaiveld is dan geen verandering zichtbaar, maar direct onder het maaiveld gebeurt van alles. De verwachting was dat de grote opname van voedingsstoffen door de wortels zichtbaar zou zijn in het bovengrondse deel van plant. Dit was helaas niet het geval.

Wintergraan

Ook voor het wintergraan geldt dat gedurende de meeste vluchten geen gewasverkleuringen zichtbaar waren. In 2021 waren er echter twee momenten van gewasstress waarin in de ondiepe ondergrond aanwezige muurresten zich wel goed aftekenden in het wintergraan (zie onder).

Gewasgroei

Wintergraan

De gewasstress in het wintergraan van april 2021 ontstond in een periode van gewasgroei en grote droogte. De groei vraagt veel voedingsstoffen, maar door de droogte kunnen die niet of onvoldoende worden opgenomen. Dit geldt zeker voor plaatsen waar muurresten in de

ondergrond voor mindere aanvoer van voedingsstoffen zorgen. De groei van de gewassen boven de muurresten blijft achter, hetgeen zich in het gewas aftekent als *crop marks* met een lichtgroene kleur. Op de luchtfoto van vlucht 12 is in het wintergraan overduidelijk een bouwstructuur herkenbaar (afb. 9.9, links). De gewasverkleuring was zelfs vanaf de grond waarneembaar. Ook tijdens vlucht 13 op 5 mei 2021, zes dagen na vlucht 12, waren de gewas-sporen nog goed zichtbaar. Twaalf dagen later, tijdens vlucht 14 op 17 mei 2021 en na een paar regenbuien, waren deze *crop marks* niet langer zichtbaar.

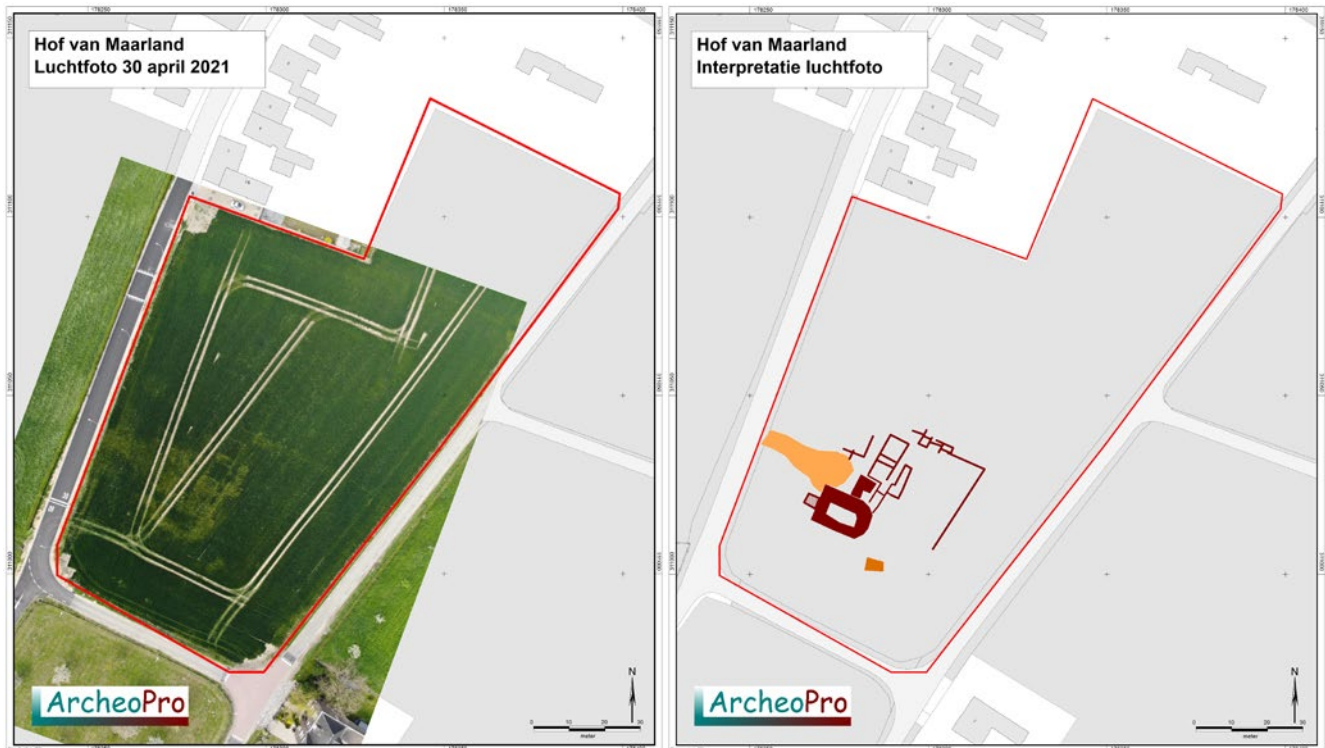
Hoogteverschil in het gewas

Mais

Tijdens vlucht 7 waren de maisplanten 1,90 m hoog. De luchtfoto's laten een egaal groen beeld zien, zonder enige zichtbare verkleuring die wijst op archeologische sporen. Alleen de sporen van de tractor en de plantrichting zijn herkenbaar op de foto. Ook de luchtfoto's van de groenbemester (de vluchten 24, 25 en 26) en van de tweede oogst mais (de vluchten 34 en 35) laten een egaal groen beeld zien.

Wintergraan

Door de opgelopen groeiachterstand in april 2021 was het wintergraan later dat jaar boven de muren net iets minder ontwikkeld: het was altijd net iets korter gebleven. Dit kleine verschil in gewashoogte is bij normale opnames overdag niet of nauwelijks waarneembaar. Door de fotografeertechniek aan te passen, is het mogelijk om dergelijke kleine verschillen in de hoogte van het gewas wel goed zichtbaar te maken. Er kan dan het beste met strijklicht gewerkt worden (paragraaf 9.6.6).



Afb. 9.9 Luchtfoto (links) genomen tijdens vlucht 12 op 30 april 2021. De rechterfoto toont de interpretatie van de waargenomen gewasverkleuringen.

Gewasrijping

Wintergraan

De groeiachterstand van het wintergraan in 2021 had ook effect op de aren die als gevolg van deze groeiachterstand net iets kleiner en minder zwaar waren. Dit had tot gevolg dat in de laatste fase van de rijping van het graan de volle, zware en lange aren door regen en wind gemakkelijker platsloegen. De lichtere, kortere aren bleven daarentegen wel rechtop staan.

De opname van vlucht 20 toont de laatste fase van het wintergraan, de rijping, vlak voor de oogst van het wintergraan (afb. 9.10). Grote delen van het wintergraan zijn platgeslagen door regen en wind, maar op andere plekken staat het graan wel nog rechtop. In de luchtfoto is dat verschil heel mooi te zien. Het rijpe graan heeft van zichzelf geen kleurverschil, maar platgeslagen graan is zeer lichtgeel van kleur en rechtopstaand graan donkergeel van kleur. Het rechtopstaande graan correspondeert met de locatie van de muurresten van de Hof van Maarland in de ondergrond. Op de grond was het heel bijzonder om de muren van de Hof van Maarland 'rechtop te zien staan', niet als stenen muren, maar als rechtopstaand graan. Een heel

bijzondere visualisatie van archeologische resten in de ondergrond.

9.6 Fototechnieken

9.6.1 Inleiding

Door gebruik te maken van verschillende fotografische technieken kan de (kans op) zichtbaarheid van gewasverkleuringen op luchtfoto's worden vergroot. In deze paragraaf besteden we aandacht aan drie technieken en hun producten: orthofoto's, oblique luchtfoto's en orthofotomozaïeken.

9.6.2 Orthofoto's

Tijdens het opstijgen en dalen van de drone zijn vaak meerdere orthofoto's gemaakt vanaf verschillende hoogtes. Hierbij is ingezoomd op het zuidelijke deel van het onderzoeksgebied, waar de archeologische sporen van de Hof van Maarland verwacht werden. Door de foto's



Afb. 9.10 Luchtfoto genomen tijdens vlucht 20 op 12 augustus 2021. Het platgeslagen graan is lichtgeel van kleur en het rechtopstaande graan donkergeel van kleur.

vanaf een lagere vlieghoogte te maken, werd de resolutie verhoogd. Zo kon onderzocht worden of er met een hogere resolutie meer te zien zou zijn. Tijdens vlucht 13 op 5 mei 2021 is een luchtfoto vanaf 100 à 110 m hoogte genomen met een resolutie van 4 cm (afb. 9.11, links). Tijdens diezelfde vlucht is een orthofoto genomen vanaf een beduidend lagere hoogte en met een hogere resolutie van 1,4 cm (afb. 9.11, rechts). Hoewel laatstgenoemde luchtfoto iets meer detail laat zien van het wintergraan, verandert er aan het beeld weinig. De verkleuringen in het wintergraan zijn van dien aard, dat ze zelfs met 4 cm resolutie prima zichtbaar zijn.

9.6.3 Oblique luchtfoto's

Tijdens de dronevluchten is in de basis gewerkt met orthofoto's, maar soms leverden oblique foto's een beter beeld op van afwijkende verkleuringen en hoogtes (anomalieën) van het gewas. Een orthofoto, die loodrecht (verticaal) van boven is genomen, biedt weinig zicht op kleine verschillen in gewashoogte en ruimtelijke patronen hierin. Ook is de plantrichting soms zo dominant, dat patronen in gewasgroei- of hoogte, maar dan met een andere oriëntatie,



Afb. 9.11 Luchtfoto's genomen tijdens vlucht 13 op 5 mei 2021. De luchtfoto met 4 cm resolutie (links) verschilt niet wezenlijk van de luchtfoto met 1,4 cm resolutie (rechts). De hogere resolutie vertaalt zich niet in een betere zichtbaarheid van de archeologische structuren in de ondergrond.

niet worden herkend. Een oblique luchtfoto is, afhankelijk van de richting en hoogte van fotograferen, minder gevoelig voor de richting waarin de gewassen gepland zijn. Hierdoor worden archeologisch relevante anomalieën soms net een beetje beter zichtbaar. Oblique luchtfoto's zijn met uitzondering van vlucht 17 tijdens alle dronevluchten gemaakt. Dit is gedaan door met de drone een rondje over het onderzoeksgebied te vliegen.¹⁵⁷ Bij de vluchten 32, 33 en 34 zijn oblique foto's genomen vanuit alle vier windrichtingen en op verschillende hoogtes, van 10 m tot rond 40 m hoogte. Het doel ervan was vast te stellen of met lage oblique foto's de zichtbaarheid van *crop marks* verbeterd kan worden bij kleine planten die in rijen geplaatst zijn, zoals bij mais. Door vanuit de lucht onder een schuine hoek haaks op de plantrichting van de mais te fotograferen, worden de maisplanten schuin in beeld gebracht. De dominante plantrijen worden zo uitgevlakt. Dit maakt het mogelijk om kleine groeiverschillen in de dan snel groeiende maisplanten te zien en vast te leggen. Vanaf vlucht 35 was de mais dusdanig hoog, dat het nemen van oblique luchtfoto's op meerdere hoogtes niet meer nodig was.

9.6.4 Verticale versus oblique luchtfoto's

Met behulp van verticale en oblique luchtfoto's is geprobeerd om in perioden van droogte de groei van de net ingezaaide maisplanten te monitoren. Een voorbeeld van de meerwaarde van oblique luchtfoto's is afkomstig uit vlucht 15 van 30 mei 2021. Het wintergraan groeide dicht opeen, de groeistress van een maand eerder (april 2021) was verdwenen door regenbuien. De orthofoto die loodrecht van boven is genomen (afb. 9.12, boven), laat geen of nauwelijks gewasverkleuringen in het gebied van het hoofdgebouw zien. De oblique foto daarentegen, genomen tijdens dezelfde vlucht, laat die wel duidelijk zien (afb. 9.12, onder). Door de foto vanuit dezelfde richting als de zon te nemen, kwamen kleine kleurverschillen van de mais wel in beeld.

9.6.5 Orthofotomozaïek

Voor het samenstellen van een orthofotomozaïek dient een drone in een regelmatig patroon over het onderzoeksgebied te vliegen, waarbij verticale luchtfoto's met bepaalde tussenafstanden worden gemaakt. De afstanden zijn zo

¹⁵⁷ Vanaf vlucht 25 zijn op verzoek van een bewoner geen oblique luchtfoto's vanaf de noordoosthoek meer gemaakt.



Afb. 9.12 De orthofoto (boven) van vlucht 15 toont geen gewasverkleuringen. Op de oblique luchtfoto (onder), genomen onder een schuine hoek vanaf geringe hoogte, schemeren de contouren van de Hof van Maarland wel als vegetatieverkleuringen door.

gekozen, dat er een grote mate van overlap is tussen de orthofoto's. De computer kan vervolgens de foto's digitaal aan elkaar plakken en hoogteberekeningen uitvoeren, om zo een digitaal hoogtemodel te krijgen. Een orthofotomozaïek heeft als bijkomend voordeel dat een hogere resolutie dan 4 cm wordt bereikt. Bovenbeschreven werkwijze is toegepast tijdens de vluchten 3 tot en met 14 en heeft geleid tot hogeresolutieoverzichtsfoto's (fotomozaïeken) van het onderzoeksgebied. De resolutie van de losse orthofoto's van het gehele terrein is echter dusdanig hoog, dat de mozaïekfoto's geen toegevoegde waarde hebben. Vanaf vlucht 14 is om deze reden gestopt met het nemen van orthofoto's voor dit doel.

Ook fotogrammetrische hoogtemetingen met behulp van orthofoto's is als weinig zinvol beoordeeld. De beschikbare AHN-data en hogeresolutiebeelden van het onderzoeksgebied zijn uit het oogpunt van archeologische prospectie al toereikend. Het stitchen en fotogrammetrisch bewerken van de orthofoto's kan altijd nog op een later tijdstip worden uitgevoerd.

Ook biedt het orthofotomozaïek in hoge resolutie geen goed alternatief voor het uitvoeren van een oppervlaktekartering op de grond. De archeologische indicatoren, zoals leisteen en Naamse kalksteen, zijn niet als zodanig herkenbaar op de luchtfoto's: de kleuren liggen te dicht bij elkaar. De orthofoto's zijn daarmee niet bruikbaar gebleken voor een oppervlaktekartering door middel van remote sensing.

9.6.6 Slagschaduw

Door met de drone vlak na zonsopkomst of vlak voor zonsondergang te vliegen, kunnen aan de hand van slagschaduw of strijklicht kleine verschillen in gewashoogte op eenvoudige wijze zichtbaar worden gemaakt. De vluchten 16 en 17 zijn een paar dagen na elkaar uitgevoerd. De luchtfoto van vlucht 17 is midden op de dag gemaakt, op het moment dat de zon recht van boven scheen (afb. 9.13, links). Op deze luchtfoto zijn geen archeologisch relevante verkleuringen zichtbaar. De luchtfoto van vlucht 16 is in de avond bij strijklicht genomen (afb. 9.13, midden). De minimale hoogteverschillen in het graan tekenen zich door de schaduwwerking goed af. De interpretatie van de schaduwen in het gewas (wintergraan) is te zien op afbeelding 9.13, rechts.

9.6.7 Camera-instellingen

De camera van de drone heeft normaliter geen filter voor de lens. De vluchten 16, 17, 18 en 31 zijn uitgevoerd tijdens een zeer zonnig moment. Elke vlucht is tweemaal uitgevoerd: de eerste keer zonder, de tweede maal met een polarisatiefilter. De polarisatiefilter is aan de grond ingesteld voor een optimaal beeld. In de luchtfoto's is nauwelijks een verbetering waarneembaar; wel lijkt het erop dat de zonnescittering iets minder intens is.



Afb. 9.13 Luchtfoto's genomen tijdens vlucht 16 (midden) en vlucht 17 (links) op respectievelijk 13 en 16 juni 2021. De rechterfoto toont de interpretatie van de waargenomen gewasverkleuringen in het wintergraan.

9.7 Conclusies en vervolgonderzoek

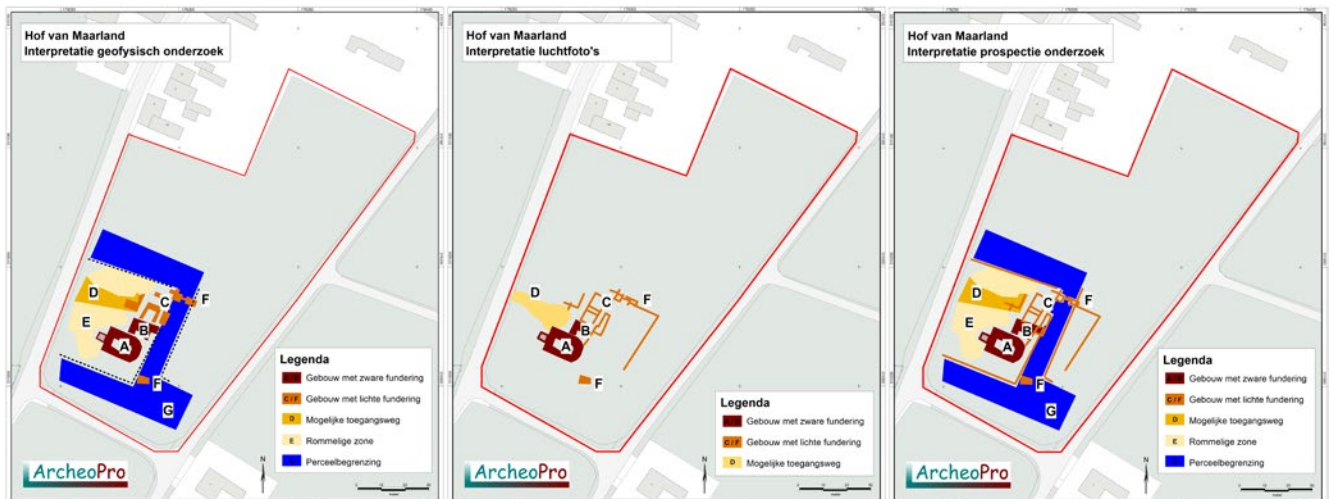
9.7.1 Inleiding

De ‘proeftuin’ Hof van Maarland toont aan dat luchtfotografie in de vorm van drone remote sensing een duidelijke meerwaarde kan hebben in archeologisch prospectieonderzoek. In combinatie met twee andere prospectiemethoden (geofysisch onderzoek en oppervlaktekartering) heeft het onderzoek van luchtfoto’s nieuwe inzichten opgeleverd over de locatie, omvang en gebouwcontouren van de Hof van Maarland. Ook methodisch was het onderzoek zinvol: er is belangrijke informatie verzameld over de toepasbaarheid van drone remote sensing als nieuwe methode van archeologische prospectie.

In deze afsluitende paragraaf zetten we de belangrijkste conclusies van het onderzoek naar de Hof van Maarland op een rij. Gezien de focus van deze publicatie op archeologische remote sensing, ligt de nadruk op de bijdrage, bevindingen en conclusies van het droneluchtfoto-onderzoek.

9.7.2 Hof van Maarland

De Hof van Maarland is een dwarshuisboerderij van het Zuid-Limburgse type en rond 1500 gebouwd. De boerderij heeft waarschijnlijk maar één bouwfase gekend. Het bestond uit een hoofdgebouw van 18 x 10 m, dat zwaar gefundeerd was (afb. 9.14: A). Ten noorden van het hoofdgebouw en haaks daarop lag een tweede gebouw met een zware fundering, mogelijk een schuur, van 20 m lengte (B). Verder lagen hier nog andere gebouwen met een veel lichtere fundering (C). Het bouwmaterial was Naamse blauwsteen, maar lokale kalksteen (mergel) is mogelijk ook gebruikt. Het is heel goed mogelijk dat een of meer gebouwen in vakwerk uitgevoerd waren. Zeker enkele daken waren van leisteen. De boerderij lag op een perceel van 45 x 45 m. De voorzijde lag aan de westzijde, in de richting van de Remigiuskapel aan de overzijde van de weg. Beide gebouwen, de boerderij en de Remigiuskapel, vormden de historische kern van de ontginningsnederzetting Maarland. Na 1600 is de kern van de nederzetting in noordoostelijke richting verschoven. De zestiende eeuwse boerderij is nooit doorontwikkeld tot de karakteristieke Zuid-Limburgse carréboerderij. Het perceel van de Hof van Maarland is vanaf 1619, nadat de gebouwen waren gesloopt, altijd landbouwgrond geweest. De luchtfoto’s hebben een aantal duidelijke



Afb. 9.14 Overzichtskaart van het onderzoeksgebied Hof van Maarland met de interpretatie van de gegevens van het geofysische onderzoek (links), het luchtfoto-onderzoek (midden) en het totale prospectieonderzoek (rechts), waarbij de inzichten uit de drie gebruikte prospectietechnieken (geofysisch onderzoek, oppervlaktekartering en droneluchtfotografie) zijn samengevoegd.

archeologische resultaten opgeleverd. Ze worden hieronder puntsgewijs opgesomd.

- De droneopnames bevestigen de aanwezigheid van zware funderingen van het hoofdgebouw in de zuidwesthoek van het onderzoeksgebied, die eerder zijn aangetoond in geofysische metingen.
- Direct ten noorden van en waarschijnlijk grenzend aan het hoofdgebouw zijn in het geofysische onderzoek aanwijzingen gevonden voor een kleiner bijgebouw. Op basis van de meetresultaten wordt ook voor dit gebouw uitgegaan van een zware fundering. Het droneonderzoek laat echter zien dat nog meer noordelijk, deels in het verlengde van het zwaar gefundeerde bijgebouw, er meer bijgebouwen met een oriëntatie haaks op het hoofdgebouw hebben gestaan. Het weerstandsonderzoek van maart 2022 heeft hiervoor slechts geringe aanwijzingen opgeleverd. Om deze reden is het aannemelijk dat deze gebouwen lichter gefundeerd waren dan het hoofdgebouw en het hieraan grenzende bijgebouw. Mogelijk was laatstgenoemd bijgebouw veel groter dan alleen het zwaar gefundeerde deel.
- Aan de rand van het boerderijperceel zijn ook enkele structuren zichtbaar, zowel in de geofysische metingen als op de droneluchtfoto's. De aard van deze structuren is onbekend.
- De luchtfoto's hebben geen inzicht gegeven in de perceelindeling en de toegang tot de boerderij. Deze gegevens komen enkel uit het geofysische onderzoek.

9.7.3 Kennisontwikkeling droneonderzoek

Op de droneluchtfoto's tekenen zich de archeologische resten van de Hof van Maarland (die direct onder de bouwvoor bewaard zijn) niet als *crop marks* af in de mais en groenbemester.

Ongeacht de groeifase tonen beide gewassen geen zichtbare verkleuringen (sporen) die verband houden met muurresten in de ondergrond.

Het wintergraan laat een ander beeld zien. Hierin tekenen de gebouwresten zich wel af, zij het alleen onder bepaalde omstandigheden: tijdens de groeifase en gedurende een langdurige periode van droogte. Hierdoor is gewasstress ontstaan en zijn de gebouwresten

door een andere kleur van het wintergraan herkenbaar. Zodra de droogte verdwijnt, verdwijnt ook de gewasstress en verdwijnen de sporen weer. De kleur trekt heel snel bij en het kleurverschil is niet meer zichtbaar.

Echter: tijdens het resterende deel van de gewasperiode blijft de achtergebleven groei door gewasstress zichtbaar in de hoogte van het wintergraan. Dit komt doordat de groeiachterstand niet meer wordt ingehaald. Het graan blijft iets korter en de aren zijn iets minder vol en minder zwaar. Oblique luchtfoto's die zijn gemaakt bij laagstaande zon, tonen deze mindere groei door een afwijkende gewas-schaduw boven de archeologische structuren. Omdat de groeiachterstand tot aan de oogst voortduurt, kan ook in de latere fasen van de ontwikkeling van het gewas deze afwijkende gewasschaduw worden waargenomen.

De groeiachterstand resulteert tevens in een verschil in rijping. Dit rijpingsverschil op zijn beurt komt tot uiting in het wel of niet platslaan van het wintergraan in de laatste fase van rijping bij hevige regen en/of wind. In de luchtfoto's is dit verschil zeer duidelijk zichtbaar: het wintergraan boven de muurresten is korter, maar staat nog rechtop en heeft een donkere kleur gewas-schaduw; het platgeslagen wintergraan elders kent geen of minder gewasschaduw en tekent zich veel lichter af in de orthofoto.

De conclusie is dat aan een set van voorwaarden moet worden voldaan alvorens archeologische resten van de Hof van Maarland zich als *crop marks* af te tekenen op luchtfoto's. Van groot belang is het samenspel tussen type gewas, gewasstress, groeifase, bodemvochtigheid en de toegepaste fototechniek. In dit verband is het veelzeggend dat het tussen maart 2020 en augustus 2022 slechts driemaal (vluchten 12, 13 en 20) is voorgekomen dat luchtfoto's duidelijke archeologische sporen lieten zien.

Detectie tijdens groeistress:

- het gewas moet in een groeifase zitten;
- er moet groeistress zijn door droogte;
- er vindt verkleuring van het gewas plaats;
- het moment van vliegen is heel kritisch, sporen kunnen maar kort zichtbaar zijn;

Detectie achteraf als gevolg van eerdere groeistress:

- er is geen kleurverschil;
- het gewas boven de archeologische resten heeft een andere hoogte dan de rest. Bij slag-schaduw en door oblique foto's op een

bepaalde manier te nemen, is dat tot op zekere hoogte zichtbaar te maken. Deze fototechniek is bruikbaar als indicator voor de archeologie, maar minder goed voor visualisatiedoelinden;

- bij rijping ontstaan rijpingsverschillen die zich in het gewas aftekenen, zoals wel of niet platslaan. Het kan leiden tot een hoge zichtbaarheid van de archeologische resten;
- het moment van vliegen tijdens de verdere groei van het gewas is minder kritisch, omdat die gewasverschillen er vanaf de groeistress altijd zijn.

9.7.4 Vervolgonderzoek

Het is de intentie om het onderzoek naar drone remote sensing en het geofysische onderzoek van de Hof van Maarland te continueren. Een aandachtspunt daarbij is de toepassing van meer geofysische technieken onder diverse

omstandigheden. Zo hebben de meeste geofysische metingen in relatief droge omstandigheden plaatsgevonden. De weersomstandigheden waren dusdanig, dat er nog geen metingen zijn verricht in perioden van (langdurige) regen. In hoeverre onder natte omstandigheden structuren in de geofysische metingen naar voren komen, is niet bekend. Ook is het de bedoeling om grondradaronderzoek en aanvullend magnetometeronderzoek met een hogere datadichtheid uit te voeren om te kunnen vaststellen of dat nog extra informatie oplevert.

Het frequent vliegen met de drone zal eveneens voortgezet worden. Als er nieuwe gewassen ingezaaid worden, zal onder verschillende weers- en groeiomstandigheden worden gekeken of er *crop marks* aanwezig zijn. De ervaring van de afgelopen twee jaar heeft geleerd dat op veruit de meeste luchtfoto's geen archeologische structuren zichtbaar zijn. Maar ook dat is belangrijke informatie en leerzaam.

Deel IV – Synthese en blik op de toekomst

10.1 Inleiding

In dit afsluitende hoofdstuk brengen we allerlei inzichten uit dit rapport samen en presenteren we aanbevelingen voor een (nog) betere toepassing en inbedding van remote sensing in de Nederlandse archeologie. Ook zetten we enkele gedachtes over de toekomstige ontwikkelingen op het gebied van archeologische remote sensing in Nederland op een rij. Wat heeft het RCE-project Prospectie, met als focus archeologische remote sensing, ons geleerd? Een belangrijke doelstelling van het project was het verkrijgen van inzicht in de actuele stand van zaken van remote sensing in de Nederlandse archeologie. Om deze doelstelling te bereiken, hebben we boeken, rapporten, artikelen en websites geraadpleegd, en hebben we interviews gehouden met verschillende experts. Op het RCE-archeologieplatform van 21 oktober 2021 hebben presentaties van vier specialisten onze blik op het onderwerp verder verbreed en verdiept. Deze activiteiten, alsook de leermomenten opgedaan uit de casestudy's en de input van kritische meelezers, hebben in belangrijke mate bijgedragen aan deze publicatie over archeologische remote sensing. Het heeft geleid tot een overzicht van beschikbaarheid, kenmerken en toepassingen van remote sensing-beelden in verleden en heden in ons land. Wat duidelijk is, is dat de groep mensen die zich bezighoudt met het bestuderen van remote sensing-beelden, of het nu satellietbeelden van Google Earth zijn of het AHN, zich sterk heeft verbreed. Vroeger was het opsporen van nieuwe vindplaatsen op analoge luchtfoto's veel meer het terrein van een specialist, die zelf de archieven in moest. Dat was niet alleen een intensieve en tijdrovende klus, het beperkte ook de mogelijkheid voor niet-specialisten om kennis te nemen van deze foto's en het leren herkennen van hierop zichtbare archeologische sporen. Tegenwoordig zijn allerlei beelden – luchtfoto's, satellietbeelden en het AHN – online beschikbaar en met één muisklik op het beeldscherm van de computer op te roepen. Dat maakt dat een steeds grotere groep zich enthousiast inzet om archeologische vindplaatsen op te sporen en kenmerken ervan nader in kaart te brengen. Deze gebruikers doen steeds meer en

sneller ervaring op in het beoordelen en in het herkennen van archeologische verschijnselen. In dit hoofdstuk kijken we allereerst terug op welke aspecten van invloed zijn op de zichtbaarheid van archeologische resten op remote sensing-beelden. Vervolgens bespreken we de inzichten op een wat bredere schaalniveau, dat van het landschap. De praktische aanbevelingen die uit de leermomenten van de verschillende casestudy's volgen, vormen een duidelijke handreiking voor het heden. Die is bedoeld voor diegenen die remote sensing-beelden meer of beter willen inzetten, bijvoorbeeld bij het opstellen van de gespecificeerde archeologische verwachting tijdens bureauonderzoek. We sluiten af met wat gedachtes over de toekomst, ook al beseffen we terdege dat de ontwikkelingen op het gebied van nieuwe technieken en beeldvormende processen tegenwoordig razendsnel gaan.

10.2 Wat bepaalt de zichtbaarheid van archeologische vindplaatsen?

10.2.1 Inleiding

Terugkijkend op de vele voorbeelden, zowel de uitgelichte casussen als de ontdekkingen van de afgelopen jaren, kunnen we een aantal conclusies trekken over welke factoren de zichtbaarheid (vanuit de lucht) en, indien zichtbaar, de herkenbaarheid van vindplaatsen op remote sensing-beelden bepalen.

Voor het waarnemen en als zodanig herkennen van archeologische vindplaatsen is het van belang dat de resten zich in het landschap aftekenen als *crop marks*, *soil marks*, *shadow marks* en/of als subtiel reliëf. Om aan die voorwaarde te voldoen, zijn bepaalde omstandigheden nodig. We zetten de belangrijkste daarvan in deze paragraaf kort op een rij.

10.2.2 Natuurlijke factoren

Bodemvochtigheid

Voor gewasverkleuringen (*crop marks*) is de bodemvochtigheid van de bodem essentieel, omdat die van invloed is op de gezondheid

(kleur) en groei (hoogte) van het gewas. Daardoor tekenen deze verkleuringen zich het beste af na een langere periode van droogte, meestal in de zomermaanden in grasland of in akkers als er gewassen op staan. In het voorjaar zijn ze op luchtfoto's of satelliet- en andere sensorbeelden niet of minder goed te zien. Voor het herkennen van dit soort verkleuringen is het dan ook van belang om een reeks aan opnames te bestuderen, dat wil zeggen luchtfoto's of sensorbeelden die zijn gemaakt in verschillende jaargetijden, onder verschillende weersomstandigheden (zie onder) en op verschillende momenten van de dag.

Diepteligging en afdekking

De diepteligging van de archeologische resten en de aan- of afwezigheid van afdekkende lagen is relevant. Overblijfselen die aan het oppervlak liggen of vrij ondiep, hebben de grootste kans om op luchtfoto's, satelliet- en andere sensorbeelden of het AHN te worden herkend en opgespoord. Afgedekte relicten die bijvoorbeeld onder dikke lagen natuurlijke sedimenten liggen of onder een antropogeen ophogingsdek, zoals een plaggendeek, zijn onzichtbaar.

Natuurlijk reliëf

Wanneer archeologische resten aanwezig zijn in een reliëfrijk landschap, is het moeilijker deze resten aan de hand van *shadow marks* op luchtfoto's, satellietbeelden of het AHN op te sporen. Zeker wanneer het reliëf van de archeologische sporen zelf gering is (ondiepe kuilen of lage wallen), kunnen deze verhuld worden door het natuurlijke reliëf.

10.2.3 Grondgebruik en gewas

Het grondgebruik is een ander kritisch gegeven bij het herkennen van archeologische resten op beeldmateriaal van remote sensing. De wijze waarop het maaiveld wordt gebruikt, bijvoorbeeld als akker met jonge gewassen, als grasland of voor boomteelt ingeplant met jonge bomen, is van grote invloed. Zoals de naam al aangeeft, tekenen gewasverkleuringen zich af in verschillen in kleur en grootte van verbouwde gewassen (graan, mais of ander vegetatie) en grasland. Het zijn deze kleur- en groeiverschillen die archeologische resten in de ondergrond verraden.

Geploegd of net ingezaaid akkerland is daarnaast een voorwaarde voor het herkennen van bodemverkleuringen (*soil marks*). Archeologische sporen die door de ploegschaar zijn aangesneden, worden zichtbaar als kleurverschillen in de bouwvoor. Nemen we als voorbeeld de wallen van raatakkercomplexen. Die zijn op luchtfoto's zichtbaar als lichte banen in akkerland. Door het proces van ploegen en egalisatie zijn de wallichamen volledig in de bouwvoor opgenomen en uitsluitend als kleurverschillen waarneembaar.

Reliëfverschillen die door strijklicht en op het AHN zichtbaar zijn, tekenen zich meestal af in gebieden waar geen ingrijpende nivellerende activiteiten zijn geweest en waar een min of meer intact microreliëf aanwezig is, dat wil zeggen: buiten de gronden die zijn geëgaliseerd en/of al langdurig in agrarisch gebruik zijn. Vooral akkerland is vaak sterk afgevlakt. Strijklicht vraagt om open gebieden, zoals heide en grasland. De mogelijkheid van het AHN om bomen weg te filteren heeft geleid tot de ontdekking van grafheuvels en grotere wal- en andere structuren in bosgebieden. Juist in bosgebieden zijn oorspronkelijk reliëfkenmerken van vindplaatsen bewaard gebleven.

10.2.4 Weersomstandigheden en seizoenen

De derde factor is de invloed van weersomstandigheden tijdens de opname van beeldmateriaal, met name luchtfoto's en satellietbeelden. Het moment en het seizoen van opname kan van grote invloed zijn op de zichtbaarheid (herkenbaarheid) van archeologische vindplaatsen. Mist en wolken kunnen het zicht vanuit satellieten, vliegtuigen en drones op het aardoppervlak belemmeren, maar ook een laag sneeuw of een dicht bladerdek. Een hoge zonnestand (middaguren) beperkt ongewenste schaduwwerking van bijvoorbeeld elektriciteitsmasten, bomen of bebouwing. Daarentegen is een zeer lage zonnestand (in de zomer tijdens de vroege ochtend of late avond) essentieel bij het herkennen van subtiele reliëfverschillen door strijklicht.

10.2.5 Aard van de archeologische overblijfselen

Ook de aard van de archeologische overblijfselen zelf, de culturele factor, is van invloed op de zichtbaarheid. In deze paragraaf presenteren we vier belangrijke eigenschappen van archeologische vindplaatsen die bepalend zijn voor de zichtbaarheid en daarmee opsporingskansen op luchtfoto's, satelliet- en andere sensorbeelden of het AHN.

Omvang

De omvang van de archeologische vindplaats is een bepalende factor voor de zichtbaarheid op het AHN, luchtfoto's of satellietbeelden.

Afhankelijk van de schaal of grondresolutie (aantal pixels en pixelgrootte) zijn zeer kleine vindplaatsen niet of minder goed zichtbaar op de te bestuderen beelden. Voor vindplaatsen met een grote omvang is de kans op ontdekking groter, zeker als ze een uitgestrekt oppervlak beslaan en/of bestaan uit een of meer lange lijnelementen. Voorbeelden hiervan zijn uitgestrekte dambordpatronen van raatakkercomplexen, arealen met grindwinningskuilen en weg- en slootpatronen.

Uiterlijke kenmerken



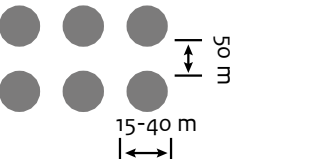
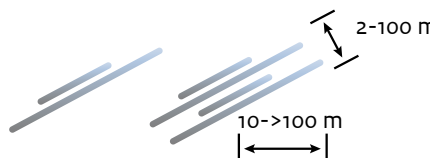
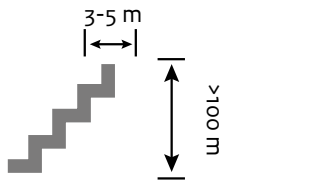
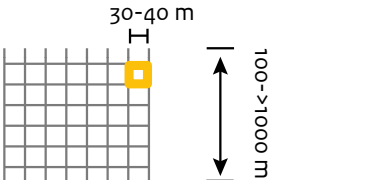
Naast de omvang zijn de uiterlijke kenmerken van de archeologische vindplaatsen van belang voor de zichtbaarheid ervan op remote sensing-beelden. Een vindplaats met brede en/of diepe sporen, zoals greppels, grachten, sloten, muurresten, natuur- of bakstenenfunderingen of uitbraaksporen daarvan (uitbraaksleuven of puinwaaiers), steenzettingen en keienvloeren, maakt meer kans om te worden herkend dan een vindplaats zonder een of een combinatie van deze kenmerken. Deze sporen zijn van een andere aard dan de natuurlijke bodem. Daardoor is de kans groter dat deze sporen zich onderscheiden op remote sensing-beelden als gewasverkleuringen of in aangeploegde vorm als kleurverschillen in de bouwvoor.

Vorm

De vorm van die anomalie (of eigenlijk de onnatuurlijke vorm) die zich aftekent, is eveneens een belangrijk aspect. Het menselijke oog is goed in staat die te herkennen, zeker als zij zich in

patronen voordoet. We hebben het hier over een macroscopische beoordeling zonder toepassing van visualisatie- of andere bewerkingstechnieken. Een vindplaats met niet-natuurlijke vormen, zoals rechte, hoekige of perfect ronde vormen, valt eerder op en zal als zodanig op het AHN, luchtfoto's en satellietbeelden eerder worden herkend dan complextypen met 'natuurlijke', organische vormen. Rechte lijnen, haakse hoeken of een bepaalde strakheid van een patroon wijzen op aanleg door de mens en vallen op bij een visuele beoordeling van het beeldmateriaal. We onderscheiden een aantal veel voorkomende vormen van menselijke makelij (afb. 10.1):

- Een veel voorkomende vorm is de ronde vorm, de cirkel, die los als teken of in rijen of

Vorm	Patroon
Cirkel	
Cirkels	
Cirkels in rijen	
Lijnen (recht)	
Lijnen (zigzag, hoekig)	
Vierkanten	

Afb. 10.1 Overzicht van veelvoorkomende vormen en patronen.

groepen op beelden wordt herkend. Het kan gaan om een prehistorische grafheuvel, een galgenberg, een kogelvanger, een bijenschans of een grafveld, zoals een urnenveld. Eén aangeploegde, ronde, zwarte vlek in een akker wordt waarschijnlijk niet snel herkend als een mogelijke houtskoolmeiler, maar een uitgestrekt veld van donkere vlekken laat veel meer van die regelmaat zien. De casestudy Maredsous-Biert vertelt dan ook een intrigerend verhaal over grootschalige activiteiten van houtskoolproductie. Is zo'n patroon aan kleinere donkere, cirkelvormige depressies op luchtfoto's van West-Friesland te zien, dan gaat het waarschijnlijk om kleiwinningskuilen, de zogeheten daliegaten.

- Rechte lijnen zijn ook veelal goed herkenbaar, zeker als er in het patroon een bepaalde strakheid zit met parallelle of haaks georiënteerde lijnen, die kunnen wijzen op een oud verkavelingssysteem (casestudy Lichtenvoorde-Harreveld). Bundels van lijnen in een trechtersvorm kunnen een indicatie zijn voor oude routes. Die zijn veroorzaakt door ingesleten wielsporen van karren, vaak bij een beekovergang in de vorm van een houten brug of voorde. De rechte lijn uit de casus van Alkmaar-Oudorperpolder laat zien dat ook een enkele lijn als een toegangsweg naar een kasteel te herkennen is.
- Scherpe lijnen of hoeken in lijnvormige elementen vallen ook snel op, zoals de zigzaglijnen van opgevulde loop- of tankgraven (de casestudy's Hilversum-Hoorneboegse Heide en Ieper-Frezenberg) of de grachtvullingen van schansen of hoornwerken (de casestudy's Vught-De Gement, Groenlo-Friese Schans en Gennep-Gennepershuis).
- Sommige patronen hebben een vaste maatvoering die de identificatie wat vergemakkelijkt. Denk bijvoorbeeld aan de opeenvolging van vierkanten in een vast grid, hetgeen een sterke aanwijzing is voor prehistorische raat-akkercomplexen (casestudy Hilversum-Hoorneboegse Heide). Ook de vangarmen van eendenkooien hebben een kenmerkende vorm en de kooien zelf een vaste maat.

Op basis van de combinatie van bovengenoemde drie eigenschappen (omvang, uiterlijke kenmerken en vorm) en de bevindingen van het onderzoek van remote sensing-beelden in de afgelopen jaren, kan op hoofdlijnen de volgende tweedeling worden geschetst.

- Het AHN heeft relatief veel nieuwe vindplaatsen uit de late prehistorie – grafheuvels, urnenvelden, raatakkers, etc. – aan het licht gebracht. Het gaat dan veelal om subtiele reliëfverschillen in bosgebieden in pleistocene landschappen.
- Satellietbeelden, analoge en digitale luchtfoto's, multispectrale foto's en andere lucht-opnames tonen doorgaans grotere structuurcomplexen die vaak uit de late middeleeuwen en nieuwe tijd dateren, zoals kasteelgrachten, linies en loopgraven. Deze zijn zowel in holocene als pleistocene landschappen te herkennen.

Tot slot is het verstandig te realiseren dat het ontbreken van zichtbare anomalieën op het AHN, luchtfoto's en satelliet- en dronebeelden niet betekent dat er geen archeologische vindplaatsen in de ondergrond aanwezig zijn. Deze belangrijke conclusie wordt door het meerjarige droneonderzoek van de Hof van Maarland onomstotelijk aangetoond. Tussen maart 2020 en augustus 2022 heeft J. Orbons 35 dronevluchten uitgevoerd op het betreffende perceel. Hiervan hebben slechts twee vluchten luchtfoto's opgeleverd waarop duidelijk archeologische sporen in de vorm van *crop marks* zichtbaar zijn.

10.3 Met een brede (terug)blik is vaak meer te zien

Uit de gesprekken en discussies, intern met leden van het projectteam en extern met specialisten van buiten, kwam ook regelmatig naar voren dat het verstandig is wat verder te kijken, ruimer dan de aan de hand van bijvoorbeeld *crop marks* vastgestelde locatie van (mogelijk aanwezige) archeologische resten. Met deze ruimere blik waarbij ook wordt gekeken naar het omringende landschap, kunnen eventuele fouten die zijn opgetreden bij het georefereren worden opgevangen en gecorrigeerd. Ook voor het bepalen van de landschappelijke context van vindplaatsen is het praktisch om een archeologisch onderzoeksgebied ruim te nemen. Vaak levert een meer landschappelijk ingestoken benadering niet alleen meer, maar ook andere inzichten op, bijvoorbeeld over zeer grootschalige structuren, zoals de casus Lichtenvoorde-Harreveld laat zien.

Het raadplegen van het AHN (of in België het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen), in combinatie met luchtfoto's en satellietbeelden, is vaak ook nuttig om terug te kijken op eerder uitgevoerd onderzoek. De casussen Kanne-Caestert en Hoogkarspel-Tolhuis laten zien dat het relateren en combineren van anomalieën aan eerder opgegraven en onderzochte zaken waardevol is, omdat het nieuwe sporen oplevert die niet eerder werden opgemerkt bij archeologisch onderzoek.

Een brede blik genereert vaak ook meer kennis over onderbelichte thema's en menselijk activiteit in het verleden in landschappen die uit archeologisch oogpunt relatief onbekende zijn. De casus van Kloosterzande-Drogendijk is een goed voorbeeld van de exploitatie van onbediakte landschappen in de late middeleeuwen. Over dit soort overblijfselen van een extensief gebruik van nog ongecultiveerde, 'marginale' gronden is weinig bekend. De houtskoolmeiers van Maredsous-Biert verraden eveneens een intensief gebruik van een verdwenen boslandschap, ver weg van bewoning. Met onderzoek aan het houtskool kan zelfs de samenstelling van het voormalige bos worden achterhaald. De Duitse casus Nordfriesland-Pellworm laat zien dat in door de zee verdrinken landschappen en intergetijdenplaten archeologische resten zijn te vinden. Dit type landschap is ook binnen de Nederlandse grenzen ruimschoots aanwezig. Het bovenstaande maakt tevens het grote belang duidelijk van ervaring en gebiedskennis van degene die remote sensing-beelden bestudeert. Beide zijn essentieel voor het op juiste wijze bekijken en beoordelen van deze beelden. Want wat je niet weet of verwacht aan archeologische sporen en structuren, heeft een veel grotere kans om over het hoofd te worden gezien.

10.4 De waarde van de veldtoets

Het uitvoeren van inventariserend veldonderzoek als methode van validatie is volgens veel betrokken onderzoekers, met inbegrip van de auteurs van de casestudy's, cruciaal. Het is van groot belang te weten of hetgeen op remote sensing-beelden is waargenomen, daadwerkelijk van archeologische betekenis is. De casus

Diepenheim-Den Haller is een mooi voorbeeld van een non-destructief onderzoek (veldkartering en metaaldetectie), op initiatief van en uitgevoerd door archeologische vrijwilligers. Samenwerking met deskundigen met goede materiaalkennis is daarbij een pre.

Valideren van mogelijke vindplaatsen met proefsleuven is zeer waardevol. Daarbij gaat het niet alleen om het vaststellen van de aanwezigheid, aard, omvang en ouderdom van archeologische sporen die zich als een anomalie aftekenen. Het gaat ook om het identificeren van natuurlijke sporen, die zich eveneens zeer scherp op een luchtfoto kunnen aftekenen, zoals de casus Kloosterzande-Drogendijk laat zien. Of om interessante sporen op beelden in thermisch infrarood die archeologisch niet waarneembaar zijn, zoals in Siegerswoude-Middenwei. Het uitvoeren van een veldtoets vraagt om een goede voorbereiding, waarbij niet alleen het vaststellen van de juiste methode(n) en techniek(en) van inventariserend veldonderzoek van belang is: ook het georefereren en het inschatten van de foutmarges maken daarvan onderdeel uit. Markeer het gebied waar je archeologische resten in het veld verwacht en bekijk het landschap met een nieuwe blik. Vaak is wat zich vanuit de lucht op luchtfoto's of sensorbeelden als *crop marks* of *shadow marks* aftekent, op de grond niet zichtbaar. Hetzelfde geldt voor afwijkende, onnatuurlijke vormen en patronen op het AHN: subtiele reliëfverschillen van mogelijke archeologische betekenis zijn in het veld met het blote oog vaak niet zichtbaar.

10.5 Praktische aanbevelingen

Uit de discussies, gesprekken en leermomenten van de casussen is een reeks aan praktische aanbevelingen te destilleren. Het zijn in feite gebundelde ervaringen die bij het beoordelen van remote sensing-beelden zijn opgedaan. Deze zijn in vier belangrijke aanbevelingen onder te brengen, waarvan de eerste drie zijn gericht op het gecombineerd gebruik en optimaliseren van remote sensing-beelden en de vierde aanbeveling op samenwerking.

1. Bij het gebruik van satellietbeelden, luchtfoto's en dronebeelden in het kader van een archeologisch bureauonderzoek is het van belang om altijd een reeks aan verschillende

- beelden te bekijken, bij voorkeur uit opeenvolgende jaren, verschillende seizoenen en op verschillende momenten van de dag. Bodemvochtigheid, weersomstandigheden, het agrarisch grondgebruik, het type gewas en de groeifase van het gewas kunnen per moment van beeldopname sterk wisselen (zie paragraaf 10.2). Daardoor zijn vindplaatsen alleen in bepaalde perioden of zelfs heel kortstondig in specifieke weken of dagen van het jaar als *crop marks*, *soil marks* of *shadow marks* zichtbaar, bijvoorbeeld in een periode van langdurige droogte, net na het ploegen of wanneer het gewas een bepaalde hoogte heeft bereikt. Zo'n reeksbenadering geldt ook voor analoge, historische luchtfoto's, want iedere foto is slechts een klein onderdeel van een grotere puzzel. Door honderden of zelfs duizenden van die historische luchtfoto's met elkaar te combineren, kan inzicht worden verkregen in de aanwezigheid, aard, diversiteit en verspreiding van archeologische vindplaatsen. Voor de oorlogslandschappen van de Eerste en Tweede Wereldoorlog in België heeft deze aanpak al veel kennis opgeleverd.
2. Het combineren van informatie uit verschillende kaartbronnen is eveneens zeer waardevol. De ene bron laat net iets anders zien dan de andere en samen geven ze een gelaagd en een completer beeld van wat er zich mogelijk in de bodem bevindt. *Crop marks* en andere anomalieën op luchtfoto's relateren aan het AHN en aan historisch kaartmateriaal levert vaak snel een beter inzicht op en een eerste indicatie voor de aard van de anomalie. Ook het combineren met andere digitale landschapslagen, zoals gedetailleerde geologische en geomorfologische kaarten, is vaak zeer nuttig. Historische kaarten zijn in de regel belangrijke informatiebronnen. De casus Groenlo-Friese Schans laat evenwel zien dat dit type bron op kritische wijze gebruikt moet worden, omdat de betrouwbaarheid van de informatie wisselend kan zijn.
 3. Voor LiDAR-beelden geldt ook de aanbeveling om verschillende visualisaties te maken, zowel voor het AHN als voor het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen. Op die manier kan zoveel mogelijk informatie in het reliëf worden herkend, ook kleine lokale verschillen. Houd daarbij rekening met de eigenschappen van het terrein (mate van reliëf) en wat de verwachte archeologische sporen en structuren zijn (vorm, omvang, wel of geen ophogingen). Het maken van een driedimensionaal model van het AHN-beeld in GIS levert nog veel meer informatie, doordat je het reliëf kunt manipuleren.
 4. Een andere praktische aanbeveling is het initiëren van en samenwerken in projecten op het gebied van archeologische remote sensing. Het combineren van kennis (in de hoofden) van deskundigen werkzaam in verschillende vakgebieden levert in de regel veel nieuwe inzichten op. Zoek zoveel mogelijk samenwerking met experts op aanpalende vakgebieden, zoals landschapsgeschiedenis, historische geografie, bodemkunde en digitale archeologie (denk aan 3D en *image based modelling*). Samenwerken met archeologische vrijwilligers en amateurhistorici, al dan niet verenigd in een lokale of regionale historische vereniging of een heemkundige kring, is ook ten zeerste aan te raden, want zij worden graag betrokken bij initiatieven in en rondom hun woonplaats en hebben een goede gebiedskennis. De casus Lichtenvoorde-Harreveld laat zien dat ook niet-professioneel genomen luchtfoto's waardevolle informatie kunnen opleveren over verdwenen historische cultuurlandschappen, in dit geval dankzij samenwerking met zweefvliegtuigpiloten.

10.6 Doorzicht naar de toekomst

We sluiten af met wat gedachtes over de toekomst van remote sensing in de archeologie. Die is ons inziens zeer vruchtbaar, al blijft het lastig de toekomst goed te voorspellen. Voor de komende jaren zien we allerlei ontwikkelingen met een naar verwachting positief effect op het opsporen en nader onderzoeken van archeologische verschijnselen:

- een intensievere inzet van drones, te meer omdat drones steeds kleiner, goedkoper en gebruiksvriendelijker worden; bovendien kan worden geprofiteerd van de kennis en ervaring die in de afgelopen jaren is opgedaan op het gebied van dronesensortechnologie; zo komen fotogrammetrie en remote sensing in

thermisch infrarood voor meer archeologen binnen handbereik;

- drone remote sensing als standaardmethode (in combinatie met andere methoden zoals visuele inspectie en booronderzoek) voor het monitoren van de fysieke staat van de archeologische rijksmonumenten;
- drone remote sensing als standaardmethode voor het documenteren, analyseren en monitoren van grotere cultuurlandschappen; een verschuiving van vindplaatsgericht onderzoek naar de bredere context van door de mens gebruikte landschappen; deze brede, landschappelijke blik kan voor verschillende doelen zeer nuttig zijn, zoals een beter inzicht in de potentieel interessante zones alsook verstoorde delen, in de problematiek van het behoud van archeologisch erfgoed en een beter beheer op maat voor de toekomst;
- meer gebruik van oude luchtfoto's voor verschillende doeleinden; denk daarbij aan het in kaart brengen van de historische situatie (bijvoorbeeld de situatie voorafgaande aan de ruilverkavelingen) van waardevolle archeologische gebieden en aan het gebruik van stereografische RAF-foto's uit de Tweede Wereldoorlog voor het maken van historische hoogtemodellen;
- een toename van het gratis aanbod van remote sensing-beelden in hoge resolutie door Google Earth, Publieke Dienstverlening Op de Kaart, het Satellietdataportaal en websites van andere aanbieders en, in het kielzog hiervan, het gebruik van deze beelden;
- meer experimenteren met en het testen van nog niet of weinig bekende bronnen en technieken en het naar buiten brengen van de resultaten; zo staat het gebruik van multi- en hyperspectrale beelden voor het opsporen van archeologische vindplaatsen nog in de kinderschoenen en zijn archeologen nog nauwelijks bekend met (*false color*-)infrarood- of SAR-beelden met steeds betere resoluties als interessante informatiebronnen;
- meer samenwerking op het gebied van remote sensing tussen enerzijds archeologische bedrijven, universiteiten, Saxion Deventer, overheden en geïnteresseerde burgers, en anderzijds meer samenwerking met partijen buiten de archeologie; denk hierbij aan instanties en bedrijven die zich richten op precisielandbouw en op landschappelijk en ecologisch onderzoek met behulp van remote sensing.

In deze bibliografie wordt verwezen naar alle vermelde literatuur. Naast de standaardmanier van citeren is aan sommige records een speciale hyperlink toegevoegd. Deze hyperlink is een combinatie van een resolver (zoals <http://dx.doi.org>) en een *digital object identifier* (DOI), een unieke, duurzame code die verwijst naar het originele, digitale document. Deze identifier is alleen aanwezig wanneer een document digitaal beschikbaar wordt gesteld via een vertrouwde onlinerepository. Deze DOI kan worden gebruikt om te verwijzen naar een elektronisch document, of het nu gaat om een dataset in het DANS EASY-archiveringsstelsel, een tijdschriftartikel dat beschikbaar wordt gesteld op ScienceDirect (of een andere online-uitgever) of een boekdeel in een universitaire repository. Door op de hyperlink te klikken, vindt de gebruiker de officiële locatie van het digitale document op het *world wide web*, zelfs als het internetadres is veranderd.

Alders, P.G., 2006: Archeologisch onderzoek naar de circumvallatielinie, bedrijvenpark Laarberg (gemeente Oost Gelre); een inventariserend veldonderzoek in de vorm van proefsleuven, Amersfoort (ADC-rapport 679).

Ampe, C., J. Bourgeois, L. Fockedeij, R. Langohr, M. Meganck & J. Semey 1995: *Cirkels in het land; een inventaris van cirkelvormige structuren in de provincies Oost- en West-Vlaanderen, volume 1*, Gent.

Anoniem 2018: *Handleiding opstellen gemeentelijke archeologische inventarisatiekaarten; een normstellend kader*, Amersfoort.

Arnoldussen, S., 2018: The fields that outlived the Celts; the use-histories of Dutch later prehistoric field systems (Celtic Fields or raatakkers) in the Netherlands, *Proceedings of the Prehistoric Society* 84, 303-327. <https://doi.org/10.1017/ppr.2018.5>.

Arnoldussen, S., 2020: *Briefrapport Celtic field Nederweert Gebleektendijk*, Groningen (Grondsporen 59).

Arnoldussen, S. & E.E. Scheele 2014: *De Celtic fields van Wekerom: kleinschalige opgravingen van wallen en velden van een laat-prehistorisch raatakkersysteem*, Groningen (Grondsporen 18).

Avery, T.E., 1970: *Interpretation of aerial photographs* (second edition), Minneapolis.

Baeté, H., M. De Bie, M. Hermy & P. Van den Bremt (red.) 2009: *Miradal; erfgoed in Heverleebos en Meerdaalwoud*, Leuven.

Bakker, J.A., 1977: Chronicle of exploration and research 1955-1976, in: B.L. van Beek, R.W. Brandt & W. Groenman-van Waateringe (eds.), *Ex horreo*, Amsterdam (Cingula 4), 188-191.

Beck, A., 2011: Archaeological applications of multi/hyperspectral data; challenges and potential, in: D.C. Cowley 2011: *Remote sensing for archaeological heritage management; proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavik, Iceland, 25-27 March 2010*, Brussel (EAC Occasional Paper 5/Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group 3), 87-97.

Beex, B., O. Brinkkemper, J. van Doesburg, J.W. de Kort, J. Roymans & J. Schreurs 2017: *Kroonluchter op de hei; waardestellend onderzoek naar het legerkamp bij Oirschot (1832-1834) in de gemeente Oirschot*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 245).

Bewley, R.H., 1993: Development of remote sensing, in: J. Hunter & I. Ralston (eds.), *Archaeological resource management in the UK; an introduction*, Sutton, 197-204.

Bewley, R.H., S.P. Crutchley & C.A. Shell 2005: New light on an ancient landscape; LiDAR survey in the Stonehenge World Heritage Site, *Antiquity* 79, 636-647.

Boer, A. de & W. Laan 2005: *Op zoek naar cultuurhistorie in het Actueel Hoogtebestand Nederland; hoogtemodellen van West-Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug onderzocht met patroonherkenning*, Amersfoort (ADC-rapport 447).

Boer, A.G. de, W.N.H. Laan, W. Waldus & W.K. van Zijverden 2008: LiDAR-based surface height measurements; applications in archaeology, in: B. Frischer & A. Dakouri-Hild (eds.), *Beyond illustration: 2d and 3d digital technologies as tools for discovery in archaeology*, Oxford (British Archaeological Reports International Series 1805), 69-77.

Boersma, H., 2004: *Maarland*, Maastricht.

Boshoven, E.H., S. van der Veen & W.B. Verschoof 2014: *Archeologisch onderzoek langs en binnen de Circumvallatielinie Groenlo, gemeenten Oost Gelre en Berkelland; een boor- en geofysisch onderzoek ter vaststelling van de exacte ligging van de linie*, Weesp (RAAP-Rapport 2557).

Bourgeois, J., M. Meganck & J. Semey 1998: *Cirkels in het land; een inventaris van cirkelvormige structuren in de provincies Oost- en West-Vlaanderen, volume 2*, Gent.

Bourgeois, J., M. Meganck, J. Semey & K. Verlaeck 1999: *Cirkels in het land; een inventaris van cirkelvormige structuren in de provincies Oost- en West-Vlaanderen, volume 3*, Gent.

Brongers, J.A., 1964: *Photo-archaeology in Holland, Colloque International d'Archéologie Aérienne (31 Août-3 Septembre 1963 Paris)*, Parijs, 141-142.

Brongers, J.A., 1972: *Vaassen, een akkercomplex uit de ijzertijd*, Bussum (Archeologische Monumenten in Nederland 3).

- Brongers, J.A.**, 1976: *Air photography and Celtic field research in the Netherlands*, Amersfoort (Nederlandse Oudheden 6).
- Casana, J., A. Wiewel, A. Cool & A.C. Hill** 2017: Archaeological thermography in theory and practice, *Advances in Archaeological Practice* 5-4, 310-327. <https://doi.org/10.1017/aap.2017.23>.
- Castiau E., C. Neuray, M. Nielsen, T. Pons, V. Vanderheyden, C. Van der Kaa & C. De Witte** 2011: *Le plateau condrusien; atlas des paysages de Wallonie*, Namur.
- Chase, A.F., D.Z. Chase, J.J. Awe, J.F. Weishampel, G. Iannone, H. Moyes, J. Yaeger & M.K. Brown** 2014: The use of LiDAR in understanding the ancient Maya landscape, *Advances in Archaeological Practice* 2-3, 208-221. <https://doi.org/10.7183/2326-3768.2.3.208>.
- Chase, A.F., D.Z. Chase, C.T. Fisher, S.J. Leisz & J.F. Weishampel** 2012: Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (32), 12916-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249314>.
- Chen, F., R. Lasaponara & N. Masini** 2017: An overview of satellite synthetic aperture radar remote sensing in archaeology; from site detection to monitoring, *Journal of Cultural Heritage* 23, 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.05.003>.
- Christlein, R. & O. Braasch** 1982: *Das unterirdische Bayern; 7000 Jahre Geschichte und Archäologie im Luftbild*, Stuttgart.
- Cowley, D.C.**, 2011: *Remote sensing for archaeological heritage management; proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium*, Reykjavik, Iceland, 25-27 March 2010, Brussel (EAC Occasional Paper 5/Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group 3).
- Crawford, O.G.S.**, 1921: *Man and his past*, Oxford.
- Curran, P.J.**, 1985: *Principles of remote sensing*, London.
- Deforce, K., B. Groenewoudt & K. Haneca** 2021: 2500 years of charcoal production in the Low Countries; the chronology and typology of charcoal kilns and their relation with early iron production, *Quaternary International* 593-594, 295-305. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.10.020>.
- Derks, G.J.M., J.B. Bootsma & R.J.A. Crols** 2006: *Cultuurhistorische gebiedsbeschrijving Oost Gelre; een beeld van ontginningssporen tot wederopbouwarchitectuur*, Arnhem.
- Dinter, W. van**, 1998: *De nadagen en de teloorgang van het Gennepershuis (1641-1998)*, Gennep.
- Doesburg, J. van, M. van der Heiden, J. Waagen, B. van Os & W. van der Meer** 2022: *Op zoek naar lijnen; de waarde van elektromagnetische inductie en optische en thermische infrarood-beelden in Siegerswoude (Friesland)*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 273).
- Doesburg, J. van & A. Müller (red.)** 2011: *Zoeken naar een speld in een hooiberg? Gecombineerd geofysisch en archeologisch onderzoek naar de Staats-Spaanse linie rond Gennep*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 188).
- Doneus, M., G. Verhoeven, C. Atzberger, M. Wess & M. Ruš** 2014: New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels, *Journal of Archaeological Science* 52, 84-96. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.08.023>.
- Edis, J., D. Macleod & R. Bewley** 1989: An archaeologist's guide to classification of cropmarks and soilmarks, *Antiquity* 63 (238), 112-126.
- Ente, P.J.**, 1963: *Een bodemkartering van het tuinbouwcentrum 'De Streek'*, Wageningen (proefschrift Landbouwhogeschool Wageningen).
- Feiken, R.**, 2021: *Matrix zichtbaarheid archeologische complexen (landbodems); verantwoordingsdocument*, Amersfoort (RCE-project Prospectie, intern rapport).
- Feiken, R. & M. van der Heiden** 2020: *Remote sensing, deelrapport 3: niet-zichtbaar spectrum*, Amersfoort (RCE-project Prospectie, intern rapport).
- Fontijn, D.R., R. Jansen, L. Meurkens, A. Louwen & Q.P.J. Bourgeois** 2019: *Forgotten barrows; preliminary conclusions from the 2018 fieldwork at Baarlo-de Bong and Venlo-Zaarderheiken (NL)*, in: S. Arnoldussen, E.A.G. Ball, J. van Dijk, E. Norde & N. de Vries (red.), *Metaaltijden 6; bijdragen in de studie van de metaaltijden*, Leiden, 123-131.
- Frijtag Drabbe, C.A.J. von**, 1947: *De luchtfoto in dienst van de archaeologie*, in: H.E. van Gelder, P. Glazema, G.A. Bontekoe, H. Halbertsma & W. Glasbergen (red.), *Een kwart eeuw oudheidkundig bodemonderzoek in Nederland* (gedenkschrift A.E. van Giffen), Meppel, 491-496.
- Frijtag Drabbe, C.A.J. von**, 1948: *Luchtfotografie en geschiedenis*, *Tijdschrift voor Kadaster en Landmeetkunde* 64, 161-168.
- Gade, M., J. Kohlus & C. Kost** 2017: SAR imaging of archaeological sites on intertidal flats in the German Wadden Sea, *Geosciences* 7, 105, 1-14. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040105>.
- Geudeke, P.**, 2015: *Opkomst en ondergang van een organisatie; tweehonderd jaar topografische kartering*, *Caert-Thresoor* 34-4, 164-170.
- Ghauharali, R.**, 2007: *Luchtfotografie in het Inventariserend Veldonderzoek*, *Archeobrief* 11-1, 17-20.

- Giffen, van A.E.**, 1939: Het grafveld in de Laudermarke; bouwstoffen voor de Groninger oer-geschiedenis II, *Verslag Museum van Oudheden Groningen*, 51-87.
- Goblet D'Alviella, F.**, 1930: *Histoire des bois et forêts de Belgique (deel IV)*, Brussel.
- Gonzalez, R.C. & R.E. Woods** 2008: *Digital image processing* (third edition), New York.
- Hadjimitsis, D.G, A. Agapiou, K. Themistocleous, D.D. Alexakis & A. Sarris** 2013: Remote sensing for archaeological applications; management, documentation and monitoring, in: D. Hadjimitsis (ed.), *Remote sensing of environment; integrated approaches*, London, 57-95 (open access). <https://doi.org/10.5772/39306>.
- Habets, J.**, 1865: *Publications de la Société d'Archéologie dans le Duché de Limbourg*, Tome II, Maestricht, 250-251.
- Halbertsma, H.**, 1948: Over de verhouding tussen de luchtfotografie en het oudheidkundig bodemonderzoek, *Tijdschrift voor het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap*, tweede reeks 65, 616-623.
- Hardy, B. & J.E. Dufey** 2015: La forêt wallonne, composante vitale de la sidérurgie préindustrielle, *Forêt Nature* 135, 10-18.
- Hartmann, J.**, 1986: *De reconstructie van een middeleeuws landschap; nederzettingsgeschiedenis en instellingen van de heerlijkheden Eijsden en Breust bij Maastricht (10e-19e eeuw)*, Assen/Maastricht (Maaslandse Monografieën 44).
- Hartmann, J.**, 2018: Limburgse kaarten digitaal, *De Maasgouw* 137-2, 64-69.
- Heeringen, R.M. van**, 1995: De resultaten van het onderzoek van de Zeeuwse ringwalburgen, in: R.M. van Heeringen, P.A. Henderikx & A. Mars (red.), *Vroeg-middeleeuwse ringwalburgen in Zeeland*, Goes, 16-39.
- Heijden, P. van der**, 2001: *Dagboek 1629; ooggetuigen van hét beleg van 's-Hertogenbosch, 's-Hertogenbosch*.
- Hesse, R.**, 2010: LiDAR-derived local relief models; a new tool for archaeological prospection, *Archaeological Prospection* 17-2, 67-72. <https://doi.org/10.1002/arp.374>.
- Holcomb, D.H. & I.L. Shingiray** 2007: Imaging SAR in archaeological investigations; an image processing perspective, in: J. Wisemann & F. El-Baz (eds.), *Remote sensing in archaeology*, Berlin/Heidelberg, 11-45.
- Holden, N.**, 2001: Digital airborne remote sensing; the principles of LIDAR and Casi, *AARGNews* 22, 23-24.
- Houkes, M.C., M.R. Manders, B.I. Smit & T. Coenen** 2017: *Archeologisch vooronderzoek in de onderwaterarcheologie*. KNA Leidraad Archeologie & Waterbodems, Amersfoort.
- Janssen, M.**, 2012: Archeologie ontdekken met behulp van gratis toegankelijke remote images, *Westerheem* 61, 96-99.
- Jelsma, J. & W.B. Verschoof-van der Vaart (red.)** 2021: *Meten of vergeten; een inhoudelijke evaluatie van de toepassing van geofysisch onderzoek tijdens archeologische prospectie van landbodems*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 266).
- Jong, S.M. de, E. Addink & F. Heuff** 2015: *Remote sensing; a tool for environmental observations; lecture notes remote sensing (GEO2-4208)*, Utrecht.
- Karagiannis, N.C.I.**, 2021: *Archeologie vanuit de lucht; een luchtfotoanalyse van Hoogkarspel-Tolhuis in West-Friesland*, Deventer (BSc-scriptie Saxion Deventer).
- Kattenberg, A., A. de Kraker, C. Soonius, P. Stassen, C. Sueur, P. Verhagen, B. Groenewoudt, E. Rensink, H. Peeters, H. Weerts, M. Vermeulen & H. Fokkens** 2008: Archeologische prospectie, *Nationale Onderzoeksagenda Archeologie, versie 1.0*, Amersfoort, hoofdstuk 6. Uitsluitend digitaal beschikbaar: <https://www.cultureelerfgoed.nl/publicaties/publicaties/2006/01/01/nationale-onderzoeksagenda-archeologie-1.0>.
- Koomen, A.J.M., H. Kramer, A.J. Griffioen & A. Oosterbaan** 2007: *Landschapsmonitoring; onderzoek naar alternatieve methoden monitoring van opgaande beplanting, aardkunde en cultuurhistorie*, Wageningen (Werkdocument 60, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu).
- Kort, J.W. de & J. van Doesburg** 2020: *Remote sensing, deelrapport 1: LiDAR*, Amersfoort (RCE-project Prospectie, intern rapport).
- Kraker, A.M.J. de, K.-J. Kerckhaert & A. Kattenberg** 2006: Prehistorische grafstructuren in de polders van Zeeuws-Vlaanderen, *Archeobrief* 10, 30-34.
- Lambers, K., W.B. Verschoof-van der Vaart & Q.P.J. Bourgeois** 2019: Integrating remote sensing, machine learning, and citizen science in Dutch archaeological prospection, *Remote Sensing* 11-7, 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs11070794>.
- Lambregts, N. & R. Gruben** 2020: Dwangburchten voor West-Friesland of een oostelijke kustgordel voor het graafschap Holland? De strategische overwegingen van Willem II (1227-1256) en Floris V (1254-1296), *De archeologische kroniek van Noord-Holland 2019*, 220-246.

- Lanen, R. van, R. van Beek & M.C. Kosian** 2022: A different view on (world) heritage; the need for multi-perspective data analyses in historical landscape studies; the example of Schokland (NL), *Journal of Cultural Heritage* 53, 190-205. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.11.011>.
- Leenders, K. & S. Arnoldussen** 2021: *Inventarisatie raatakkers Noord-Brabant en Noord-Limburg; een inventariserend bureauonderzoek van raatakkerterreinen in Noord-Brabant en het noordelijke deel van Nederlands Limburg*, Groningen (Grondsporen 71).
- Liagre, E.**, 2020: *De ijzertijd-hoogtesites in Vlaanderen; een herinterpretatie o.b.v. LiDAR*, Gent (masterscriptie Universiteit Gent).
- Liagre, E.**, 2022: A LiDAR reinterpretation of Iron Age hillforts in Flanders (Belgium), *LUNULA. Archaeologia protohistorica* 30, 95-102.
- Lillesand, T.M., R.W. Kiefer & J.W. Chipman** 2008: *Remote sensing and image interpretation* (sixth edition), New York.
- Londen, H. van, J. Waagen, I. Korver & M. Schelvis** 2019: *Droogte maakt begraven landschap zichtbaar, Het Nederlands Landschap. Tijdschrift voor landschapsgechiedenis*, 37-1, 14-24.
- Loonen, A.F. & W.S. van de Graaf** 2013: *Het massa-paardengraf van Borgharen, Zevenaer* (Archeodienst Rapport 558).
- Luo, L., X. Wang, H. Guo, R. Lasaponara, X. Zong, N. Masini, G. Wang, P. Shi, H. Khatteli, F. Chen, S. Tariq, J. Shao, N. Bachagha, R. Yang & Y. Yao** 2019: Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications; a review of the century (1907-2017), *Remote Sensing of Environment* 232, 1-34. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111280>.
- MacAdam, D.L.**, 1942: Visual sensitivities to color differences in daylight, *Journal of the Optical Society of America* 32, 247-274.
- Mauro, G., (red.)** 2022: *De staat van de archeologische rijksmonumenten; bouwstenen voor een betere instandhouding*, Amersfoort.
- McCormack, H., A. Thomas & I. Solomon** 2011: *The capabilities and limitations of satellite InSAR and terrestrial radar interferometry*, Hong Kong.
- Metz, W.H.**, 1999: The role of integrating aerial prospection into the preservation of ancient monuments in the Netherlands, *Revue archéologique de Picardie* 17, 253-259 (= *Actes du colloque international d'archéologie aérienne Amiens, 15-18 Octobre 1992; hommage à Roger Agache pour 35 ans de prospections aériennes dans le Nord de la France*).
- Meylemans E., M. De Bie & N. Goeminne** 2021: *Een herinventarisatie van prehistorische grafheuvels in Heverleebos*, Brussel (Onderzoeksrapporten agentschap Onroerend Erfgoed 171).
- Mijle-Meijer, R. van der & P. Stokkel** 2016: Drones in de archeologische praktijk; lucht-fotografie bij Haagse opgravingen, *Archeobrief* 20-2, 33-38.
- Muntendam-Bos, A.G., R.F. Hanssen, K. van Thienen-Visser & S. Samiei-Esfahany** 2009: *PS-InSAR-analyse van de bodemdaling in Noordwest-Friesland, Utrecht* (TNO-rapport TNO-034-UT-2009-02318/A).
- Natijne, A.L. van**, 2018: *Locating PS-InSAR derived deformation using LIDAR point clouds*, Delft (master thesis Technische Universiteit Delft).
- Nijs, G.**, 2002: *De reconstructie van de Engelse Schans; een veldschans uit 1627 in ere hersteld*, Lichtenvoorde.
- Nijs, G. & H. Manschot-Tijdink** 1994: *Harreveld doorgrond; historisch-archeologisch onderzoek naar 'eene olde haevesaete'*, Doetinchem.
- Nijs, G. & J. van der Pluijm** 2008: *Kijk op de linie; op zoek naar de circumvallatielinie uit 1627 rondom Groenlo*, Groenlo.
- Opdebeeck, J., M. Manders & R. de Hoop** 2020: 3D-modellieren in de Nederlandse maritieme archeologie, in: J. Bazelmans, E. Beukers, O. Brinkkemper, I.M.M. van der Jagt, E. Rensink, B.I. Smit & M. Walrecht (red.), *Tot op het bot onderzocht; essays ter ere van archeozoöloog Roel Lauwerier*, Amersfoort (Nederlandse Archeologische Rapporten 70), 309-319.
- Orbons, J.**, 2008: *Gennepe, Locatie 4 gracht/greppel uit 1640; geofysisch onderzoek*, Maastricht (ArcheoPro-Notitie 06-001-S RGI).
- Orbons, J.**, 2020: *De wandelende Hof van Maarland, deel 1, Uit Eijdsens Verleden* 157, 4-13.
- Orbons, J.**, 2021: *De wandelende Hof van Maarland, deel 2, Uit Eijdsens Verleden* 158, 12-18.
- Orbons, J.**, 2022: *Hoogstraat, Maarland, Gemeente Eijdsen, Inventariserend Veldonderzoek (IVO-O); geofysisch onderzoek, droneopnames en oppervlaktekartering*, Eijdsen (ArcheoPro Archeologisch rapport 20028).
- Orengo, H.A. & A. Garcia-Molsosa** 2019: A brave new world for archaeological survey; automated machine learning-based potsherd detection using high-resolution drone imagery, *Journal of Archaeological Science* 112, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.105013>.
- Orlando, P. & B. Villa** 2011: *Remote sensing applications in archaeology*, *Archeologia e Calcolatori* 22, 147-168.
- Parcak, S.H.**, 2009: *Satellite remote sensing for archaeology*, London.
- Parcak, S.H.**, 2017: *GIS, remote sensing, and landscape archaeology*, Oxford (Oxford Handbooks online). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199935413.013.11>.

- Polman, S.P.**, 2000: *Gennepertuis en omgeving, gemeente Gennep; een toeristisch-recreatieve advieskaart*, Amsterdam (RAAP-rapport 598).
- Projectteam, VB Ecoflight, Medusa Explorations, Archeopro, Vexcel Nederland & Imagem** 2009: Innovaties in archeologisch vooronderzoek, Eindrapportage project RGI-166.
- Rensink, E. & L. Theunissen** 2020: *Remote sensing, deelrapport 2: zichtbaar spectrum*, Amersfoort (RCE-project Prospectie, intern rapport).
- Rensink, E., L. Theunissen & H. Feiken (red.)** 2021: *Archeologische prospectie vanuit de lucht; remote sensing in de Nederlandse archeologie (landbodems)*, Amersfoort (digitaal rapport).
- Reu, J. De & J. Bourgeois** 2013: Bronze Age barrow research in sandy Flanders (NW Belgium); an overview, in: D. Fontijn, A.J. Louwen, S. van der Vaart & K. Wentink (eds.), *Beyond barrows; current research on the structuration and perception of the prehistoric landscape through monuments*, Leiden, 155-194.
- Riley, D.N.**, 1979: Factors in the development of crop marks, *Aerial Archaeology* 4, 28-32.
- Ringle, W.M., T. Gallareta Negrón, R. May Ciau, K.E. Seligson, J.C. Fernandez-Diaz & D. Ortigón Zapata** 2021: Lidar survey of ancient Maya settlement in the Puuc region of Yucatan, Mexico, *PLoS ONE* 16 (4): e0249314. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249314>.
- Roessingh, W.**, 2018: *Dynamiek in beeld; onderzoek van Westfriese nederzettingen uit de bronstijd*, Leiden (proefschrift Universiteit Leiden).
- Roessingh, W. & A.J. Tol** 2019: *Archeologie langs de Westfriisaweg; opgravingen van vindplaatsen uit de late prehistorie, middeleeuwen en nieuwe tijd in het tracé van de Westfriisaweg*, Amersfoort (ADC-rapport 5000/Archol-rapport 461).
- Roessingh, W., P.C.J. Valentijn, H. Fokkens, C.C. Bakels, W. Verschoof & W.K. van Zijverden** 2021: *Archeologisch onderzoek langs de Rikkert in Enkhuizen; campagne 2013-2015*, Leiden (rapport Universiteit Leiden).
- Rooij, K. de**, 2020: *AWN-afdelingen 18 en 19; verslag van de resultaten van de veldverkenning op 6 oktober 2018 te Diepenheim in de buurt van de watermolen*, z.p.
- Roosens, H.**, 1975a: Oude versterking te Kanne-Caster, *Archaeologia Belgica* 177, 32-36.
- Roosens, H.**, 1975b: Kanne: oude versterking, *Archeologie* 2, 89.
- Roosens, H.**, 1976: De oude versterking te Caster, *Archaeologia Belgica* 186, 54-58.
- Schneider, S.**, 1974: *Luftbild und Luftbildinterpretation*, Berlin.
- SIKB** 2018: *Kwaliteitsnorm Nederlandse Archeologie, versie 4.1*, Gouda.
- Silver, M., M. Törmä, K. Silver, M. Nuñez & J. Okkonen** 2019: Challenging the invisibility of mobile cultures; remote sensing, environment and archaeology in the Near East, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XLII-2/W11, 1065-1072. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1065-2019>.
- Song, B., K. Leidorf & E. Heller** 2019: *Luftbildarchäologie. Archäologische Spurensuche aus der Luft*, Darmstadt.
- Spiekhout, D.**, 2020: *Het middeleeuwse kastelenlandschap van het Oversticht; de ontwikkeling van bisschoppelijke burchten, adellijke huizen en versterkingen in relatie tot het landschap en de samenleving in Noordoost-Nederland tussen 1050 en 1450*, Utrecht, 452-453.
- Stichelbaut, B. (red.)** 2018: *Sporen van oorlog; archeologie van de Eerste Wereldoorlog*, Brugge.
- Stichelbaut, B., P. Chielens & J. Bourgeois** 2018: Archeologie vanuit de lucht, in: B. Stichelbaut (red.), *Sporen van oorlog; archeologie van de Eerste Wereldoorlog*, Brugge, 138-155.
- Stichelbaut, B., W. Gheyle, V. Van Eetvelde, M. Van Meirvenne, T. Saey, N. Note, H. Van den Berghe & J. Bourgeois** 2017: The Ypres Salient 1914-1918; historical aerial photography and the landscape of war, *Antiquity* 91 (355), 235-249. <https://doi.org/10.15184/aqy.2016.260>.
- Stortleder, A.**, 2021: *Bewoningsgeschiedenissen van boerderijen in Harreveld*, z.p. <https://okvharvelt.nl/presentaties/boerderijen-harreveld/>.
- Sueur, C.**, 2005: Het microreliëf van Nederland in beeld gebracht, *Archeobrief* 8-1, 8-13.
- Sueur, C.**, 2006: *Remote sensing voor archeologische prospectie en monitoring*, Amsterdam (RAAP-rapport 1261).
- Swart, L.M.Th.**, 2013: *Praktische toepassing van deformatiemeting met InSAR; techniek, projecten, ontwikkelingen en aanbieders*, Dongen (Swartvast rapport 1203.03).
- Theunissen, E.M. & J.W. de Kort (red.)** 2014: *Prehistorische raatakkers op de Hoornbeogse Heide bij Hilversum; verslag van een veldtoets*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 225).
- Theunissen, E.M., J.W. de Kort, E. Rensink, C.A.M. van Rooijen & L.B.M. Verhart** 2013: *Prehistorisch grafveld De Busjop bij Heythuysen weer zichtbaar*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 214).

- Theunissen, L., A. Müller & A.M.J. de Kraker** 2011: *Cirkels in het Zeeuwse land; waarderend archeologisch veldonderzoek aan de Drogendijk bij Kloosterzande (gemeente Hulst), Amersfoort* (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 193).
- US Army Corps of Engineers** 2003: *Engineering and design; remote sensing*, z.p. (Engineer Manual EM. 1110-2-2907).
- Vanneste, H. & S. Ostkamp (red.)** 2013: *De Motte van Breust; de opgraving van een middeleeuwse kasteelheuvel en zijn omgeving in Eijsden-Breust, gemeente Eijsden-Margraten, Amersfoort* (ADC Monografie 15).
- Veen, J. van der**, 2019: *Toepassing van drones (UAV's) tijdens archeologisch veldwerk, Deventer, Leiden* (scriptie HBO Archeologie Saxion/Archol).
- Veld, D. ter**, 2020: Op naar AHN4, *Geo-Info* 2, 22-31.
- Verhoeven, G.**, 2013: Drones; een nieuwe kijk op archeologische luchtfotografie, *Archeobrief* 17-3, 16-21.
- Verhoeven, G.**, 2018: Satellite hyperspectral and multispectral imaging, in: S.L. López Varela (ed.), *The encyclopedia of archaeological sciences*, New York, 1-4.
- Verhoeven, M.P.F.**, 2008: *Studieopdracht naar een archeologische evaluatie van het Plateau van Caestert (Riemst, Provincie Limburg)*, Weesp (RAAP-rapport 1769).
- Verhoeven, M.P.F.**, 2011: *Een aanvullende archeologische evaluatie en waardering van het Plateau van Caestert (Riemst, provincie Limburg)*, Weesp (RAAP-rapport 2162).
- Verschoof-van der Vaart, W.B.**, 2022: *Learning to look at LiDAR; combining CNN-based object detection and GIS for archaeological prospection in remotely-sensed data*, Leiden (proefschrift Universiteit Leiden).
- Verschoof-van der Vaart, W.B. & K. Lambers** 2019: Learning to look at LiDAR; the use of R-CNN in the automated detection of archaeological objects in LiDAR data from the Netherlands, *Journal of Computer Applications in Archaeology* 2-1, 31-40 <https://doi.org/10.5334/jcaa.32>.
- Vliet, J. van der**, 2007: Archeologie uit de hoogte, *Archeobrief* 11-1, 5-8.
- Vries-Metz, W.H. de**, 1993: *Luchtfoto-archeologie in oostelijk West-Friesland; mogelijkheden en resultaten van archeologische remote sensing in een verdwijnend prehistorisch cultuurlandschap*, Amsterdam (proefschrift Universiteit van Amsterdam).
- Vries-Metz, W.H. de**, 1994: *Archeologische monumenten in Noord-Holland; het observeren, controleren en beschermen van archeologische monumenten vanuit de lucht*, Amsterdam.
- Waldus, W.B. & H.M. van der Velde (red.)** 2006: *Archeologie in vogelvlucht; een onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van het AHN voor de archeologie*, Amsterdam (Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies 6).
- Willemse, N.W.**, 2007: *Gerimpeld en doorleefd; screening van reliëf met een cultuurhistorische betekenis op de West-Veluwe*, Weesp (RAAP-rapport 1301).
- Willemse, N.**, 2013: Speuren naar archeologie in digitale oppervlaktemodellen, *Archeobrief* 17-3, 7-15.
- Wilson, D.R.**, 1982: *Air photo Interpretation for archaeologists*, London.
- Wit, G. de & A. Sloos** 2008: *De interpretatie van archeologische waarnemingen in Archis; een concept voor een nieuwe set complextypen*, Amersfoort (Rapportage Archeologische Monumentenzorg 165).
- Zee, R.M. van der & F.S. Zuidhoff** 2012: New methods to analyse LIDAR-based elevation models for historical landscape studies with five time slices, in: S.J. Kluiwing & E. Guttman-Bond (eds.), *Landscape archaeology between art and science; from a multi- to an interdisciplinary approach*, Amsterdam, 443-457.
- Zee, R.M. van der, F.S. Zuidhoff & A.G. de Boer** 2009: *Gelderland in reliëf; legenda en verhalen over het landschap; handleiding bij de Atlas van het Actueel Hoogtebestand Nederland*, Amersfoort (ADC ArcheoProjecten rapport 2059).
- Zijverden, W.K. van & W.N.H. Laan** 2005: *Landscape reconstructions and predictive modelling in archaeological research, using a LIDAR based DEM and digital boring databases*, Workshop 9, *Archäologie und Computer*, Wien, 1-8.

Analoge luchtfoto

Luchtfoto genomen in het zichtbare spectrum van het licht (eerst zwart-wit, later ook rood, groen, blauw, afgekort als RGB) met behulp van een fototoestel met een lens. Afhankelijk van de hoek waarin het aardoppervlak wordt gefotografeerd, worden oblique en verticale luchtfoto's onderscheiden.

Analoge luchtfotografie

Vorm van luchtfotografie waarbij gebruik wordt gemaakt van een fototoestel met een lens. Alle beeldinformatie die als licht de lens passeert, wordt opgeslagen op een lichtgevoelige film. Deze film moet eerst chemisch bewerkt worden. Vervolgens kunnen de foto's via een nieuwe stap worden afgedrukt, weer met een chemisch proces.

Archeologisch bureauonderzoek

Het verwerven van informatie, aan de hand van bestaande bronnen, over bekende of verwachte archeologische waarden, binnen een omschreven gebied, resulterend in een standaardrapport met een gespecificeerde archeologische verwachting.

Archeologische monumentenzorg (AMZ)

Het opsporen, analyseren en veiligstellen van resten van menselijk handelen en de plekken waar deze resten in de bodem bewaard kunnen blijven en duurzaam behouden, zo nodig door middel van inrichting en beheer.

Archeologische prospectie

Het opsporen en nader in kaart brengen van archeologische resten (vondsten en sporen) en de aardkundige of landschappelijke context van deze resten. Hiervoor gebruiken archeologen verschillende bronnen van bureauonderzoek, waaronder satellietbeelden en luchtfoto's, en verschillende methoden van veldonderzoek, zoals oppervlaktekartering en boor- en proefsleuvenonderzoek.

Archeologische remote sensing

Verzamelnaam voor technieken waarmee archeologische waarden vanuit de lucht, dat wil zeggen zonder ingreep in de bodem, kunnen worden opgespoord en nader onderzocht.

Archeologische vindplaats

Een plaats waar archeologische resten in de

vorm van vondsten en/of sporen in een aardkundige context zijn aangetroffen.

Booronderzoek

Methode om archeologische resten door middel van een boor op te sporen en te onderzoeken, en de aardkundige context van deze resten vast te stellen.

Crop marks

Gewas- of vegetatieverkleuringen die het resultaat zijn van verschillen in de gezondheid van gewas of natuurlijke vegetatie, in kleur en/of hoogte. Deze groeiverschillen worden veroorzaakt door de aanwezigheid van objecten of sporen in de ondiepe ondergrond die de vocht-huishouding of samenstelling van de bodem beïnvloeden.

Digitale luchtfotografie

Vorm van luchtfotografie waarbij gebruik wordt gemaakt van digitale camera's. Het aftasten van het beeld gebeurt door een lichtgevoelige elektronische sensorchip, waarna de foto's niet op de sensor, maar in het geheugen van de camera worden bewaard. Vervolgens kan de afbeelding worden opgeslagen op een geheugenkaart of een andere gegevensdrager. Daarna kunnen de foto's afgedrukt worden.

False colour-foto

Foto in onechte of valse kleuren (Engels: *false color*) waarin bepaalde frequenties van elektromagnetische straling (bijvoorbeeld frequenties die het menselijk oog niet kan waarnemen) worden getoond in andere frequenties van het elektromagnetische spectrum, ditmaal in zichtbaar licht. Zo worden bijvoorbeeld drie frequenties infrarood weergegeven als de drie gebruikelijke primaire kleuren rood, groen, blauw (RGB).

Geofysisch onderzoek

Methode om archeologische resten en/of aardkundige fenomenen op te sporen en te onderzoeken door middel van een geofysische meettechniek, waarbij structuren in de bodem gevisualiseerd worden.

Gespecificeerde archeologische verwachting

Verwachting ten aanzien van de aanwezigheid van archeologische vindplaatsen, uitgesplitst naar specifieke eigenschappen van deze vind-

plaatsen, zoals datering, complextype, diepteligging (inclusief zichtbaarheid aan de oppervlakte) en uiterlijke kenmerken.

Infraroodspectrometrie

Passieve techniek van remote sensing die zich richt op het verzamelen van data en het genereren van beelden in het niet-zichtbare spectrum. Infrarood bestaat uit elektromagnetische straling met een frequentie tussen 0,7 en 14 μm . Er worden drie spectrale banden onderscheiden: nabij-infrarood (NIR, 0,7-1,3 μm), midden-infrarood (MIR, 1,3-3 μm) en thermisch infrarood (TIR, 3-14 μm).

Inventariserend veldonderzoek, karterende fase

Het verzamelen van archeologische en aardkundige gegevens in het veld, gericht op het vaststellen van de aanwezigheid van archeologische vindplaatsen in een onderzoeks- of plangebied.

Inventariserend veldonderzoek, waarderende fase

Het verzamelen van archeologische en aardkundige gegevens in het veld ten behoeve van het (nader) vaststellen van de vindplaatskenmerken, zoals locatie, aard, diepteligging, omvang en datering van de archeologische resten.

Laseraltimetrie

Hoogtemetingen met behulp van laserstralen vanuit een vliegtuig of helikopter.

Lijnelement

Een prospectiekenmerk dat bestaat uit een spoor waarvan de lengte meer dan tweemaal zo groot is als de breedte (bijvoorbeeld muur, greppel, weg).

Monitoring (archeologische)

Het meten en waarnemen van de fysieke conditie van monumenten op bepaalde, vooraf vastgestelde aspecten met daartoe geëigende middelen en gedurende een afgesproken periode. Het doel is inzicht te verwerven in het fysieke degradatieproces van archeologische monumenten en de effectiviteit van de getroffen maatregelen om degradatie tegen te gaan.

Multi- en hyperspectrale beeldvorming (imaging)

Twee gelijksoortige technieken van remote sensing waarbij sensoren tegelijkertijd meerdere

spectrale banden vastleggen. Het verschil tussen beide is de breedte van de spectrale banden en hun aantal. Bij multispectrale beeldvorming worden drie tot vijftien banden tegelijkertijd vastgelegd. De banden hebben een relatief vrij groot bereik (0,1-0,3 μm) en bestaan vaak uit rood, groen, blauw en nabij-infrarood. Hyperspectrale opnames leggen wel honderden tot duizenden verschillende spectrale banden vast. Deze banden hebben een veel kleiner bereik (0,01 tot 0,02 μm).

Oblique luchtfoto

Luchtfoto genomen onder een bepaalde hoek, bijvoorbeeld 45°, het zogenaamde vogelvluchtperspectief.

Opgraven

Het blootleggen, onderzoeken (bijvoorbeeld couperen van sporen), documenteren en verzamelen van archeologische resten en aardkundige gegevens op grond waarvan een site kan worden geïnterpreteerd in termen van menselijk gedrag en de context van dat gedrag.

Oppervlaktekartering

Methode om vondsten aan het oppervlak op te sporen, bijvoorbeeld door middel van het belopen van braakliggende percelen (akkers) en het inspecteren van molshopen, geschoonde slootkanten en andere bodemontsluitingen.

Opsporen

Het vaststellen van de aanwezigheid van archeologische resten (vondsten en sporen) met behulp van (non-)destructieve methoden en technieken van veldonderzoek.

Orthofoto

Geometrisch gecorrigeerde foto, zodat de schaal overal op de foto gelijk is. De foto toont een nauwkeurige weergave van het aardoppervlak, dankzij aanpassingen aan topografisch reliëf, lensvervorming en camerabeweging.

Orthofotomozaïek

Foto die is samengesteld uit losse orthofoto's die op zorgvuldige wijze aan elkaar zijn geplakt. Snijlijnen lopen bijvoorbeeld niet door gebouwen, maar langs een weg. Overgangen tussen foto's zijn daardoor nauwelijks zichtbaar.

Proefputtenonderzoek

Methode van inventariserend veldonderzoek

met als doel het opsporen van vindplaatsen en het verzamelen van aanvullende gegevens voor het (verder) toetsen van de gespecificeerde archeologische verwachting. Proefputten hebben een maximale afmeting van 2 x 1 m.

Proefsleuvenonderzoek

Methode van inventariserend veldonderzoek met als doel het opsporen van vindplaatsen en het verzamelen van aanvullende gegevens voor het (verder) toetsen van de gespecificeerde archeologische verwachting. Proefsleuven zijn langer dan proefputten en hebben een minimale lengte van 2 m.

Puntelement

Een prospectiekenmerk dat bestaat uit een spoor (bijvoorbeeld diergraf, inhumatiegraf of depot) of een archeologische vondst (bijvoorbeeld urn, kano of muntschat) kleiner dan 5 m².

Radar

Radar (*radio detection and ranging*) is een actieve techniek van remote sensing, dat wil zeggen dat de radarapparatuur zelf energie uitzendt (en weer ontvangt) en niet alleen energie ontvangt, zoals bij infraroodspectrometrie. Een antenne zendt zijwaarts radarpulsen (korte pulsen van elektromagnetische energie) uit en dezelfde antenne ontvangt de retourpulsen van het terrein.

Remote sensing

Remote sensing betekent letterlijk 'op afstand waarnemen'. In de ruimste zin van het woord gaat het om een verzameling van technieken waarmee vanaf een bepaalde hoogte data over het aardoppervlak worden verzameld.

RGB-beeld

De weergave van een meting van straling in het zichtbare spectrum, met een frequentie tussen 0,4 en 0,7 μm (in de basiskleuren rood, groen, blauw, afgekort als RGB). De weergave toont een natuurgetrouw beeld van de werkelijkheid (*true color*-foto). In dit rapport ook benoemd als digitale luchtfoto.

Sensorbeeld

Satellietbeeld of andere digitale opname genomen met aan een meetstation bevestigde sensoren die beelden elektronisch vastleggen. Sensorbeelden zijn er in het zichtbare

(RGB-beelden) en in het niet-zichtbare (infraroodbeelden, multi- en hyperspectrale opnames en radarbeelden) deel van het lichtspectrum.

Sensor

Instrument voor het opmeten van elektromagnetische straling, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen passieve en actieve sensoren. Passieve sensoren meten de reflectie of emissie van (natuurlijke) stralingsbronnen, meestal de zon, aan het oppervlak. Radar en LiDAR (laser) zenden zelf een elektromagnetische stralingsbundel naar het aardoppervlak en meten de mate van reflectie aan het aardoppervlak om vervolgens daaruit een beeld te construeren. Deze sensoren worden actieve sensoren genoemd.

Shadow marks

Schaduwverkleuringen zijn verschillen in schaduwwerking als gevolg van hoogteverschillen van het aardoppervlak. Laagstaand zonlicht in de wintermaanden, bij voorkeur in de vroege morgen of late namiddag, zorgt voor een subtiele aftekening van het reliëf.

Soil marks

Verkleuringen van de bodem als gevolg van het aanploegen of deels afgraven van (archeologische) sporen en structuren in de ondiepe ondergrond. De afwijkende kleur van opgeploegde muurresten of spoorvullingen tekent zich af tegen de bouwvoor of natuurlijke ondergrond.

Stereofoto

Een combinatie van twee losse foto's die elkaar sterk overlappen, maar onderling iets van perspectief verschillen. Met een stereoscoop is daardoor diepte te zien.

Verticale luchtfoto

Luchtfoto die recht van boven is genomen. De opname vindt plaats met een (nagenoeg) verticale stand van de camera-as. Dit soort foto's kan worden gebruikt als stereofoto.

Visuele inspectie

Het met het blote oog inspecteren van een onderzoeks- of plangebied, waarbij gelet wordt op terreinkenmerken (reliëfverschillen), verkleuringen en andere aan het oppervlak zichtbare verschijnselen (bijvoorbeeld afwijkende begroeiing), die (kunnen) duiden op de aanwezigheid van een archeologische vindplaats.



In deze publicatie staat archeologische remote sensing in Nederland centraal. Remote sensing betekent letterlijk 'op afstand waarnemen'. Het is een verzamelnaam van technieken waarmee vanuit de lucht data over het aardoppervlak worden verzameld. Deze data, in de vorm van analoge en digitale luchtfoto's, sensorbeelden en het Actueel Hoogtebestand Nederland, bevatten voor archeologen belangrijke informatie. In het geval van archeologische prospectie gaat het om gegevens die van belang zijn voor het opsporen en nader in kaart brengen van archeologische resten (vondsten en sporen) en de aardkundige context van deze resten. Dit rapport behandelt verschillende onderwerpen en vraagstukken die relevant zijn voor een goed gebruik van remote sensing-beelden tijdens archeologisch onderzoek. Vijftien casestudy's laten zeer verschillende toepassingsmogelijkheden zien.

Dit wetenschappelijk rapport is bestemd voor archeologen, andere professionals en liefhebbers die zich bezighouden met archeologie.

Met kennis en advies geeft de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed de toekomst een verleden.