

02. Cirkelvormige depressies in de Vlakte van Boicholt

Michiel DUSAR, Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Belgische Geologische Dienst, Jennerstraat 13, B-1000 Brussel

Johan MATTHIJS & Roland DREESEN, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Materiaaltechnologie, Boeretang 200, B-2400 Mol

Jean POESEN, K.U. Leuven, Aard- en Omgevingswetenschappen, Geo-Instituut, Celestijnenlaan 200E, B-3001 Heverlee



Weinig verstoort de rust van de wandelaar in het gave landschap van de Abeekvallei en het Stamprooierbroek, ankerplaats in het noordoosten van Belgisch-Limburg, tenzij soms de processierups, de geduchte behoeder van de leegte en de stilte die dit gebied kenmerken. Er is ook weinig in de mozaïek van weilanden, maïsakkers, bosjes, vennen en beken, in de Landschapsatlas omschreven als een ‘gedegreerde bocage’, dat opvallend om aandacht vraagt. En toch herbergt dit gebied landschapselementen die op zich het resultaat zijn van heel gewone erosie- en sedimentatieprocessen, maar die zo vergankelijk en kwetsbaar zijn dat hun bewaring hen uitzonderlijk en uniek maakt. Zij zouden nog steeds onbekend en onvermoed gebleven zijn, ware het niet dat een aandachtige wandelaar oog kreeg voor enige onlogische variaties in de vochtthuishouding van de bodem en het eraan gekoppelde microreliëf, en dat het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen een instrument bood om deze in kaart te brengen. Meer was er niet nodig om de Werkgroep Geologie met spade, boor en meetlint aan het werk te krijgen om de aanvankelijk nog enigmatische structuren te onderzoeken en hun wordingsgeschiedenis na te gaan.



Figuur 1. Twee beelden van de depressie op de Sint-Martensheide te Bree, die met boringen in het centrum en op de westrand, een proefput op de westrand en een topografisch profiel is onderzocht; bovenste zicht van oost naar west, onderste zicht van noord naar zuid (noordelijk van de Schaafdijkstraat, Lambertcoördinaten centrale depressie X 240080, Y 207340, overeenkomend met de zuidelijke depressie op fig. 4-9, 11, 14).

Situering

In het vlakke land ten noorden van de Zuid-Willemsvaart zijn met een geoefend oog negatieve reliëfvormen met verhoogde rand te herkennen. Vooral in weiland is hun ronde vorm met centrale, vochtige depressie het beste zichtbaar, zowel aangegeven door de ringwal als door de vochtminnende vegetatie in het centrum. ‘Ideale’ vormen met de beste herkenningkans zijn zo’n 100 à 150 meter groot en 1 à 1,50 meter hoog (Figuur 1-2), wat niet hoeft te betekenen dat er geen ovalen of halfopen vormen kunnen voorkomen. In dichter beboste, geploegde of bebouwde gebieden zijn de cirkelvormen



Figuur 2. Drie beelden van een depressie op de Sint-Martensheide te Bree, met kern in weiland die ‘s winters watergevuuld is, met ringwal die in de verhoogde oostelijke zijde bebost is en doorsneden door draineringsgreppels maar nog zeer goed herkenbaar; boven zicht van noord naar zuid, midden van noordwest naar zuidoost, onder van noordoost naar zuidwest (zuidelijk van de Schaafdijkstraat, Lambertcoördinaten centrale depressie X 239575, Y 206850).

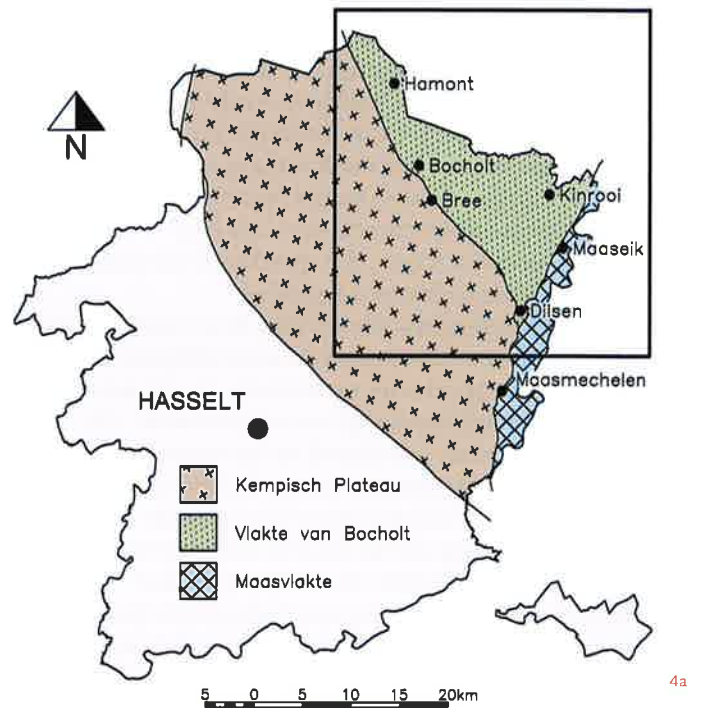
moelijk waarneembaar. Soms wordt er met hun vorm rekening gehouden bij het landgebruik en volgen perceelsgrenzen de verhoogde rand, soms ook niet. De wegen kunnen boogvormig over de verhoogde randen lopen of de ringwal insnijden. In de meeste gevallen zijn greppels aangelegd ter ontwatering. Het is duidelijk dat zij niet bewust als landschapsvormend element werden herkend en gebruikt bij de landbouwexploitatie.

Een groot deel van de cirkelvormige depressies is op luchtfoto's waar te nemen. Op luchtfoto's genomen tijdens de lente of de zomer worden ze echter vaak verdoezeld door landbouwgewassen of andere vegetatie. Ze tekenen zich op verschillende manieren af. Op sommige plaatsen doen ze zich voor als een ringvormige zone met weinig of geen vegetatie waarbinnen zich een cirkel bevindt die juist wel begroeiing bevat. Elders vormen ze cirkels met een helgroene vegetatie te midden van minder frisse begroeiing. Op nog andere plaatsen worden er te midden van akkerland cirkelvormige donkere natte zones aangetroffen of zijn er zelfs plassen in het centrum te herkennen. In enkele gevallen volgen de perceelsgrenzen de ronde vorm van de structuur (Figuur 3).

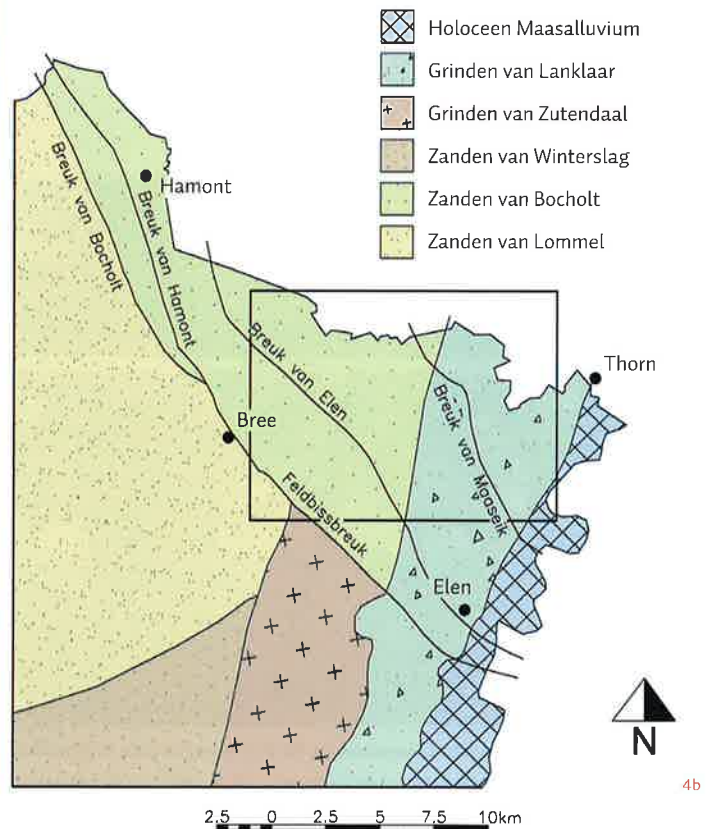
Deze cirkelvormige depressies komen voor binnen de driehoek Hamont-Elen-Thorn (Figuur 4). Dit gebied staat geografisch bekend als de Vlakte van Bocholt (Antrop *et al.*, 1987). Het is een



Figuur 3. Luchtfoto met beide onderzochte depressies. De lichtbegroeide verhoogde rand tekent zich bleek af. De ronde depressie onderaan in beeld komt overeen met Figuur 1. Beide depressies vormen ook het voorwerp van Figuur 5-8, 11. (Orthofoto's, middenschallig, kleur, provincie Limburg, VLM/OC en provincie Limburg, opname 2003 (GIS-Vlaanderen)).



4a



4b

Figuur 4. Geografische (a) en geologische (b) situering van het onderzoeksgebied met de locatie van Figuur 9 (a: naar Antrop *et al.*, 1987 en b: naar Gullentops & Paulissen, 1996).

open, zeer vlak landschap doorsneden door beken (Abeek, Itterbeek, Bosbeek, ...) die ontspringen op het Kempens Plateau om meer noordoostelijk, richting Roermond, in de Maas uit te monden (RSPL 2007).

De Vlake van Bocholt is een streek met slechte afwatering en hoge grondwaterstanden die pas laat in cultuur is gebracht en slechts extensief wordt bewerkt. Op veel plaatsen, en dan vooral rond de Abeek, is de bodem hooguit enkele malen met de ploeg gescheurd, een uitzonderlijke toestand in Vlaanderen. Zo krijgen natuurlijke morfologische verschijnselen meer kans op bewaring.

De slechte afwatering is tektonisch gedicteerd. De geografische Vlake van Bocholt maakt deel uit van de geologische Roerdalslenk (of Slenk van Roermond), een seismisch actieve zakkingszone die door breuktrappen is gescheiden van het zuidelijk aangrenzende en hoger gelegen Kempens Plateau, dat draineert in de richting van de Vlake van Bocholt, dus van zuidwest naar noordoost. Ook de Maas zelf stroomt volgens de grootste helling en de kortste weg recht naar de Roerdalslenk, van zuid-zuidwest naar noord-noordoost, en vangt uiteindelijk alle afwatering van het Kempens Plateau en de Vlake van Bocholt op.

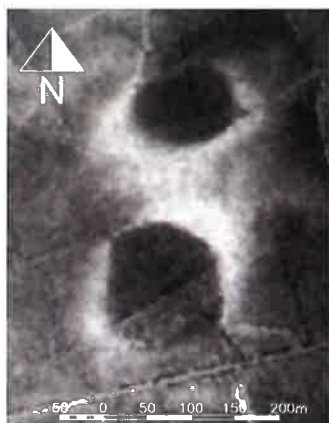
De afwatering van de Vlake van Bocholt gebeurt dus in noordoostelijke richting. Maar de Roerdalslenk wordt breder en dieper naar het noord-noordwesten toe en de grondwaterbeweging zal in het algemeen ook in die richting verlopen. Er is dus een tegengestelde werking tussen grondwaterbeweging en oppervlakkige afstroming, waardoor de Vlake van Bocholt een gebied met slechte natuurlijke drainering en hoge grondwaterstand is, en dus weinig geschikt was voor landbouw en bewoning. Het is ook een geologisch jong gebied dat hoofdzakelijk opgevuld is met pleistocene Rijn- en Maasafzettingen, als compensatie voor een zakkende aardkorst. Het belangrijkste hoogteverschil in de Vlake van Bocholt wordt opgevangen tussen de randbreuken van de Slenk, die de steilrand van het Kempens Plateau hebben veroorzaakt en de breuken van Elen en Bocholt, gedeeltelijk gevolgd door de Zuid-Willemsvaart. Het verloop van de breuk van Elen valt ongeveer samen met de hoogtelijn van 35 meter. Ten zuiden van de breuk heeft de vlake een helling

van 0,2%, ten noorden ervan 0,05% (Figuur 4). Het zuidelijke deel wordt ook wel de vervlakkings van Gerdingen-Bocholt genoemd, het noordelijke deel de vlakke van de Limburgse Maas (De Moor & Pissart, 1992). Het is voornamelijk in dit uiterst zwakhellende gebied dat de cirkelvormige depressies weergevonden werden. Het merendeel ervan bevindt zich op de interfluvia, in de zone met weinig georganiseerde afwatering, maar toch in hogere zandgronden.

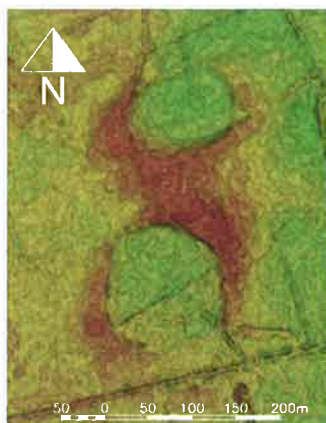
Visualisatietechniek op basis van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen

Op het terrein zijn de cirkelvormige depressies weinig opvallend en pas goed te herkennen mits enige voorkennis. Op het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (DHM) daarentegen tekenen ze zich duidelijk af in de vlakke topografie. Dit model werd voor het betrokken gebied opgesteld met behulp van de LIDAR- (LIght Detection And Ranging) of laserscanning-techniek (Laser Imaging Detection And Ranging). Het stelt het reliëf van Vlaanderen voor aan de hand van een regelmatig raster van punten van 100 op 100, 25 op 25 of 5 op 5 meter en een nauwkeurigheid van 7 tot 20 centimeter, afhankelijk van de complexiteit van de vegetatie en de bebouwing. Deze nieuwe techniek is in (half)open landschap veel nauwkeuriger dan de klassieke topografische kaarten en laat toe ook kleinschalige structuren te herkennen.

Het reliëf zoals vastgelegd in het DHM Vlaanderen kan op verschillende manieren gevisualiseerd worden. Een van de eenvoudigste technieken is de weergave aan de hand van een panchromatisch beeld (Figuur 5). Het reliëf wordt voorgesteld als een zwart-witfoto waarbij elk punt uit het DHM Vlaanderen een grijswaarde toegerekend krijgt, afhankelijk van de hoogte waarop het zich bevindt. Hierbij beschrijven de lichtere zones de hoger gelegen delen van het reliëf, de donkere zones stellen dan weer de lager gelegen delen voor. Een andere veel gebruikte techniek is een weergave met kleuren of een false-colorbeeld (Figuur 6). In dit geval wordt er gebruik gemaakt van kleuren in plaats van grijswaarden voor de visualisatie van het reliëf. Typisch voor de voorstelling van een reliëf is het gebruik van een hellingschaduwbeeld (Figuur 7). Hierbij wordt het oppervlak op een kunstmatige wijze belicht – meestal vanuit het



Figuur 5. Panchromatisch beeld van de onderzochte cirkelvormige depressies op de Sint-Martensheide.



Figuur 6. False-colorbeeld van de onderzochte cirkelvormige depressies op de Sint-Martensheide.



Figuur 7. Hellingschaduwbeeld van de onderzochte cirkelvormige depressies op de Sint-Martensheide met een belichting vanuit het noordwesten.

noordwesten –, waardoor er enerzijds verlichte zones ontstaan en anderzijds zones die in de schaduw liggen. Afhankelijk van licht of schaduw wordt er aan het reliëf een grijswaarde toegekend. Hierdoor wordt er aan het beeld een schijnbaar derde dimensie gegeven. Het zo bekomen effect kan versterkt worden door bij de verwerking van de data een hoogte-overdrijving aan de puntgegevens toe te kennen. Dit is vooral aangewezen bij de voorstelling van weinig uitgesproken reliëfstructuren in een vlak landschap. Afhankelijk van de horizontale en verticale hoek van waaruit het reliëf belicht wordt, zal het reliëf duidelijk of minder duidelijk in beeld gebracht worden. Nog een andere manier van visualisatie is het gebruik van driedimensionale beelden. In dit geval wordt het reliëf bekeken vanuit de 'ruimte' onder een horizontale en verticale hoek die zelf te bepalen valt. Het oppervlak dat het reliëf voorstelt, kan in grijswaarden of in kleuren weergegeven worden en kan vanuit verschillende hoeken belicht worden om het hellingschaduw effect te bekomen. Finaal kan er zelfs over dit reliëf een luchtfoto komen te liggen, waardoor de indruk gewekt wordt dat de werkelijke topografie te zien is (Figuur 8). Voor weinig uitgesproken reliëfstructuren in een vlak landschap wordt er ook in dit geval hoogte-overdrijving.

Identificatie van de cirkelvormige structuren op het panchromatische beeld

De cirkelvormige reliëfstructuren in de Vlakte van Bocholt werden geïdentificeerd door middel van panchromatische beelden. Om tot een beeld te komen waarop de structuren duidelijk herkenbaar zijn, dient het puntenbestand van het DHM Vlaanderen nog een aantal bewerkingen te ondergaan. De reden hiervoor ligt in het feit dat de Vlakte van Bocholt niet volledig horizontaal is. Ze heeft een zachte helling van ongeveer 0,1% in noordoostelijke richting. De vlakte daalt van +42,50 meter (TAW) aan de voet van het Kempens Plateau tot +27,50 meter (TAW) nabij de Maas en overbrugt bijgevolg een hoogteverschil van ongeveer 15 meter. Het gemiddelde hoogteverschil tussen de rand en het centrum van de cirkelvormige depressies daarentegen bedraagt slechts 1,50 meter. Bijgevolg vormen ze slechts weinig uitgesproken reliëfstructuren. Wanneer het reliëf van de vlakte als panchromatisch beeld voorgesteld wordt, waarbij het maximale hoogteverschil van de vlakte (15 meter) over de grijswaarden tussen zwart en wit uitgesmeerd wordt, dan komen de cirkelvormige structuren niet duidelijk tot uiting. Hun gemiddelde hoogteverschil (1,50 meter) resulteert slechts in een minimale schakering in grijswaarde ten opzichte van de omliggende grijswaarden uit het totale hoogteverschil van de vlakte. Hieraan kan verholpen worden door aan de hand van een polynomiale regressie uit de punten van het DHM Vlaanderen de algemene helling van de Vlakte van Bocholt te bepalen. Het rekenkundige verschil tussen de algemene afhelling en het werkelijke reliëf levert enkel die reliëfstructuren op die op de vlakte gesuperponeerd zijn. De grijswaarden op dit beeld worden bijgevolg over een kleiner interval uitgesmeerd en het contrast is dan ook groter. Het panchromatische beeld op deze wijze verkregen geeft een eenvormig beeld van de ganse vlakte waarop de cirkelvormige reliëfstructuren duidelijk waarneembaar zijn (Figuur 9).

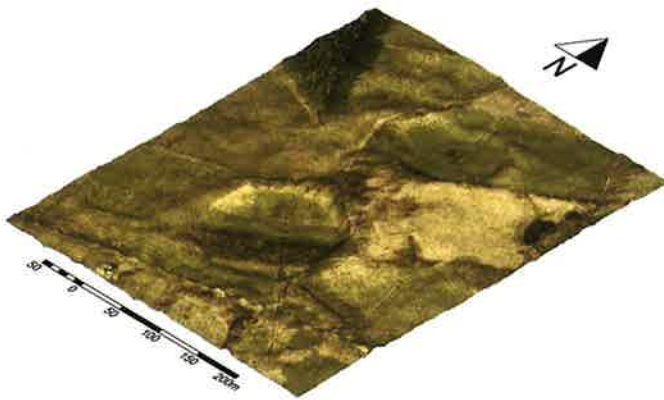
De Vlakte van Bocholt wordt op deze beelden voorgesteld als een bleekgrijs oppervlak, doorsneden met een aantal donkere,

laaggelegen zones. In deze donkere zones merkt men zowel het huidige rivierstelsel op als een reeks cirkels die op de interfluvia voorkomen. De meeste hiervan zijn wel degelijk cirkelvormig, andere zijn meer elliptisch of hebben een eerder onregelmatig afgeronde vorm. Echt onregelmatige randen kunnen te wijten zijn aan de mindere resolutie van het hoogtemodel voor hoogteverschillen die minder dan 1 meter bedragen, maar kunnen ook het gevolg zijn van verstoring door landbouwpraktijken of door vee die een kleine trap in het landschap kunnen wegwerken maar een hoge ongemoed laten. Opvallend is dat onmiddellijk rond de donkere cirkels juist de zones met de lichtste grijswaarden voorkomen. De overgang tussen het donkere, laaggelegen centrum van de circulaire structuren en de lichtgrijze, hogergelegen zones rondom is heel abrupt. Vanaf deze lichte, verhoogde rand verder naar buiten toe wordt het grijs dan weer geleidelijk aan terug donkerder. Het lijkt bijgevolg alsof er op de hoogste plaatsen in een zacht ondunderend reliëf zeer plots ronde depressies voorkomen. In sommige gevallen omgeeft deze ringvormige lichte rand niet volledig de centrale donkere zone. In andere gevallen lijken de donkere cirkelvormige zones opgelijnd en zijn ze gedeeltelijk langs 1 of 2 zijden met elkaar verbonden door de lichtgrijze rand. Dit oplijnen gebeurt gewoonlijk volgens een west-zuidwest/oost-noordoostelijke richting, dezelfde richting als de lengterichting van de structuren wanneer deze eerder elliptisch van vorm zijn en tegelijk ook de richting van de meeste beken die de Vlakte van Bocholt doorsnijden. Soms is er door een lichte schakering in grijswaarde binnen de donkere zones te merken dat er verschillende cirkelvormige structuren in en over elkaar schoven, wat wijst op verschillende generaties (Figuur 10).

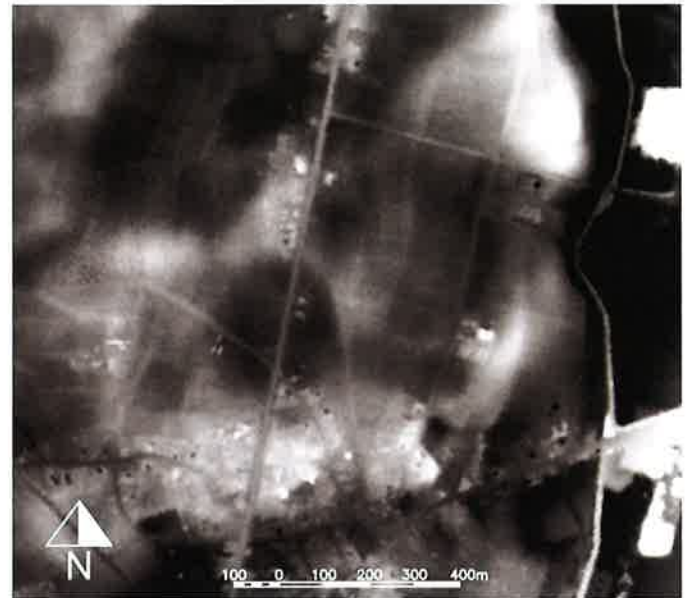
Aan de hand van het panchromatisch beeld kan de ligging en de grootte van de depressies bepaald worden. De doormeter schommelt tussen 20 en 650 meter en het gemiddelde hoogteverschil tussen de rand en het centrum van de structuren bedraagt ongeveer 1,50 meter. Met het aantal en de straal van de structuren kon er een frequentieverdeling worden opgesteld. Deze verdeling volgt een Gausscurve en is dus normaal verdeeld. Hieruit valt op te maken dat de meeste van de cirkelvormige depressies een doormeter van om en bij de 140 meter hebben. De meerderheid van de reliëfstructuren komt in het oosten van de Vlakte van Bocholt voor. Naar het westen toe lijken ze zowel in aantal als in doormeter af te nemen (Figuur 9).

Terreincontrole van de cirkelvormige reliëfstructuren

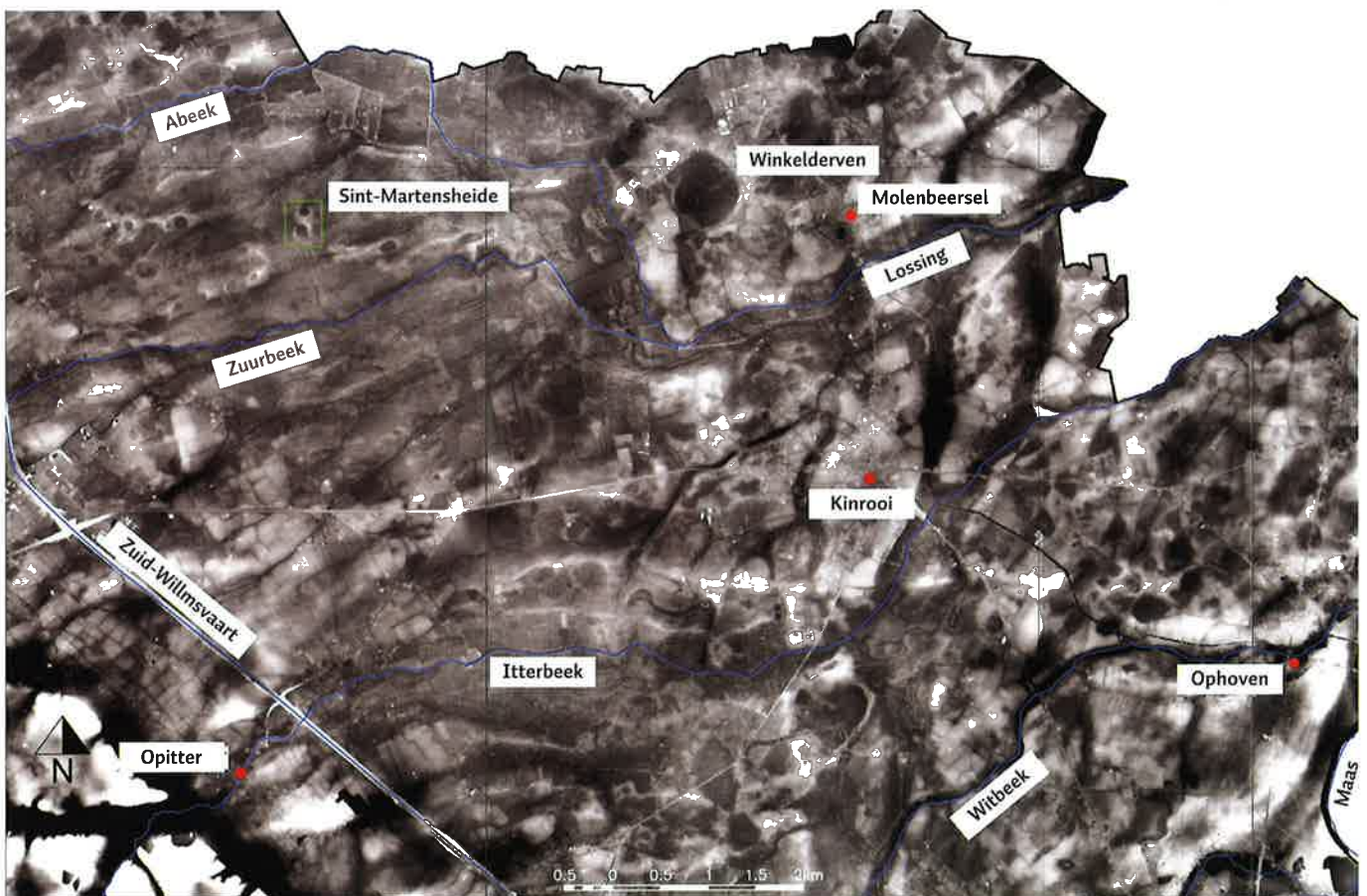
Op het terrein werden 2 goed herkenbare, representatieve cirkelvormige reliëfstructuren met een doormeter van ongeveer 140 meter nader onderzocht. Deze komen voor op de Sint-Martensheide, noordelijk van de Schaafdijkstraat, ongeveer 5 kilometer ten noordoosten van Bree en bevinden zich op een hoogte van ongeveer 35 meter (TAW) op het interfluvium tussen de Abeek en de Zuurbek (Figuur 9). Deze depressies liggen hoofdzakelijk in weiland maar strekken zich gedeeltelijk uit onder maïsakker en gemengd bos (Figuur 1, 3). Er werden topografische profielen opgemeten die door de as van de depressies werden gelegd. De doormeter van de cirkelvormige depressies, gemeten tussen de culminatiepunten op de verheven rand aan



Figuur 8. Driedimensionaal beeld van de onderzochte cirkelvormige depressies op de Sint-Martensheide gezien vanuit het zuidoosten.



Figuur 10. Panchromatisch beeld van over elkaar groeiende windkuilen net ten noorden van Ophoven, waarbij de centraal gelegen zwarte (dus laaggelegen) ronde depressies jonger zijn dan de zowel grotere als kleinere meer grijze vormen.



Figuur 9. Panchromatisch beeld verkregen uit het DHM aan de hand van het verschil tussen de algemene helling en het werkelijke reliëf van de Vlake van Bocholt (polynomiale regressiekaart), met de situering van Sint-Martensheide en Winkelderven.

weerszijden van het profiel, schommelt tussen 130 meter en 150 meter. De randen zijn niet overal even hoog en zijn gedeeltelijk geëgaliseerd door wegaanleg. Het hoogteverschil tussen de rand en het centrum van de depressies varieert van 0,90 meter tot 1,70 meter en bedraagt gemiddeld 1,30 meter (Figuur 11). Opmerkelijk is dat de hoogte van de rand naar buiten toe van de structuur slechts geleidelijk aan afneemt, terwijl dit naar het centrum toe juist vrij abrupt gebeurt. Er zijn greppels gegraven om de depressies te ontwateren en grachten om het water bij hoge waterstand af te voeren. Analyse van het bodemprofiel in een proefkuil suggereert dat de grondwater-tafel ongeveer 60 à 70 centimeter is verlaagd door deze ingrepen.

De bodemkaart (IWONL/Corine) stelt de verheven rand van de cirkelvormige depressies hoofdzakelijk als vochtig zand voor. In het centrum van de depressies zijn nat zand en natte zandleem ingetekend (Baeyens, 1975). Om na te gaan waaruit de cirkelvormige reliëfstructuren bestaan, zijn er 4 handboringen geplaatst, 2 in het centrum van elke depressie en 2 op de rand (gedetailleerde boorbeschrijving opgenomen in consulteerbaar GeoDoc boorarchief van de Belgische Geologische Dienst onder de nummers 48E0334-337). De handboringen zijn uitgevoerd met een schroefvormige Edelmanboor, wat verwrongen bodemmonsters oplevert. Om een beter beeld te krijgen van de ongestoorde textuur van de bodem is nog een proefput gegraven in de rand van 1 structuur.

De boringen in het centrum van beide depressies en op hun verhoogde rand gaven een gelijkaardig resultaat: beide structuren bestaan uit sterk verschillende zandsoorten met verschillend ontwikkeld bodemprofiel. De depressies zijn uitgediept op geelgrijs tot geelbruin, grof, lemig, soms sterk kleilig zand met centimetergrote keitjes die meestal uit kwarts bestaan, maar waarin ook Ardeens grind is aangetroffen (Figuur 12b, Figuur 13 monster 2,40 meter). De ringwal bestaat uit grijswit tot geel mul zand met sterke roestkleuring, in feite zeer fijn vrij goed gesorteerd zand met weinig grovere korrels (Figuur 12a, Figuur 13 monster 0,60 meter). Onder dit mulle zand ligt hetzelfde heterogene zand met keitjes dat de depressies

kenmerkt. De afzetting van heterogene zand met keitjes komt dus overal voor en is enkel onder de ringwallen bedekt met een laag mul zand, waarvan de dikte netjes overeenkomt met de hoogte van de ringwal (1,25 meter en 1,50 meter) (Figuur 11). Het contact tussen heterogeen zand en mul zand is lokaal aangerijkt met keien.

De bodems in de Vlake van Bocholt zijn van het podzoltype dat zich ontwikkelt in zure zandgrond met overwicht van infiltratie en percolatie op evapotranspiratie (neerslagoverschot). In een podzolbodem onderscheidt men onder de donkere humusrijke bodem een gebleekte eluvatie- of uitspoelingshorizont met kenmerkend asgrijs zand, en vervolgens een aanrijkingshorizont met neerslag van ijzeroxides en hydroxides, verantwoordelijk voor de roestkleur, en van klei. De uitspoelingshorizont zal maar dun zijn indien de grondwaterspiegel hoog ligt zoals in de depressies. De aanrijkingshorizont volgt de schommelingen in de grondwaterstand en kan zodoende een zekere dikte bereiken.

De zanden en kleien die zich permanent in het grondwater bevinden, zijn waterverzadigd met laag zuurstofgehalte en grijs gekleurd. Het zand dat zich boven de zomerstand van het grondwater bevindt, is gleyig, met roestneerslagen doortrokken door onregelmatige steil rechtop staande bleek ontkleurde strepen, vermoedelijk langsheen vergane wortels. De gleystructuren waren goed waar te nemen in een proefput, uitgegraven in een ringwal (Figuur 14).

Een normaal podzol-bodemprofiel is ontwikkeld in de depressies, in het heterogene zand dus, met aanwezigheid van een dikke horizont zwarte aarde, gevolgd door een dunne horizont gebleekt uitgeloozd zand en meer bruingekleurd zand in de zone tussen zomer- en winterstand van de grondwater-tafel. Doorworteling reikt tot in deze zone. In het mulle zand op de ringwallen is licht humeus bruingrijs zand aanwezig, direct onder de graszoden. Dit wijst erop dat bodemontwikkeling hier in een onvolkomen stadium verkeert door de grote mobiliteit van deze bodemlaag.

De bodemvorming heeft alle sedimentaire structuren van de oorspronkelijke zandafzetting uitgewist, al maakt de homogene korrelgrootte van het mulle zand herkenning ervan sowieso moeilijk. Een proefkuil, uitgegraven in een ringwal tot in het grove kleirijke zand onder de grondwaterspiegel, maakte duidelijk dat er geen fossiele bodemhorizonten voorkomen, noch tussen de heterogene afzetting van grof zand en de bovenliggende afzetting van fijn zand, noch in dit laatste zand. Evenmin komen er afzettingsstructuren zoals laagvlakken voor, of ijsstijfdenomenen zoals vorstwiggen of cryoturbaties die bijvoorbeeld in de grindlagen bovenop de witzand-groeven van Opgrimbie goed ontsloten zijn. Ontstaan en inplanting van de cirkelvormige depressies is ook niet gebonden aan seismische activiteit (aardbevingen) die nochtans aan de oorsprong ligt van de Vlake van Bocholt. Wel kon in de bouwput vastgesteld worden dat de zwarte aarde, dus de recente bodem, slechts eenmaal gescheurd is door ploeg of spade (Figuur 14).

Het grondwater staat ondiep in het centrum van de depressies (1 meter en 1,50 meter in augustus 2006) en kan 's winters tot aan de oppervlakte reiken. Onder de ringwal staat het grondwater dieper ten opzichte van de oppervlakte (2,40 meter en 2,65 meter in augustus 2006), maar ligt feitelijk op eenzelfde piëzometrisch oppervlak als onder de depressies. Met andere woorden: de grond-



waterspiegel is een horizontaal vlak. In het verleden moet de grondwaterstand 50 centimeter tot 1,20 meter hoger gestaan hebben op basis van de hoogte tot waarop de gleystructuren voorkomen.

Ter vergelijking werden ook enkele proefboringen uitgevoerd in Winkelderven, een ronde depressie in Molenbeersel met veenopvulling die voor landbouw gedraineerd wordt (Figuur 9). Wegens de veel grotere afmetingen van deze depressie (650 meter doormeter) en de veenontwikkeling zou hier wel een andere ontstaanswijze kunnen verwacht worden. De veenlaag is slechts oppervlakkig ontwikkeld, dus waarschijnlijk jong, en ontwaterd voor landbouwdoeleinden, en bereikt een dikte van ongeveer 40 centimeter. Hieronder ligt weer dezelfde afzetting van grof, heterogeen, kleihoudend zand met keitjes. De rand van de depressie bestaat uit fijn zand dat hier meer humeus en doorworteld is door sterkere bebossing in vergelijking met Sint-Martensheide. Op basis van deze waarneming kan gesteld worden dat alle cirkelvormige depressies in de Vlakte van Bocholt dezelfde oorsprong kunnen hebben, ongeacht hun grootte of het al dan niet tot stand komen van veenvorming in de gesloten depressies.

Oorsprong en stratigrafie

In de onderzochte cirkelvormige depressies komen vlak onder de vegetatielaag de volgende gesteentelagen voor: een humusrijke podzolbodem, soms met veen dat tot in de ploegzone reikt (enkel in de grootste depressies), fijn mul zand (enkel op de ringwallen), grof heterogeen zand (als substraat van de andere lagen, in het centrum van de depressies tot in de vegetatielaag). Het veen is geologisch recent. Het ontstaan ervan is later dan de afzetting van het mulle zand. De groei is enkel onderbroken door ontwatering om de depressies in cultuur te brengen.

De 2 verschillende zandsoorten werden onderworpen aan een korrelgrootte-analyse omdat deze methode toelaat de fysische condities nodig voor hun afzetting te bepalen (Figuur 13).

Het onderliggende heterogene zand bevat zowel klei als grind, met mediaan korrelgrootte van 367 micrometer. De korrels zijn verdeeld over verschillende granulometrische klassen van grind, over zand en silt tot klei. Ongeveer 35% van het sediment valt binnen de klasse van middelmatig zand, 20% behoort tot de klasse grof zand en 10% is zeer grof zand tot grind. Verder wordt ongeveer 25% van het sediment gevormd door fijn zand en de rest (10%) valt binnen de silt- en kleiklasse. Zeer fijn zand komt nagenoeg niet voor. Dergelijke slechte sortering is kenmerkend voor een rivierafzetting met grindbedding, zandbanken en slielagen, gevormd tijdens de ijstijden door Maas en Rijn.

Het mulle zand van de ringwallen bestaat uit zeer fijn, goed gesorteerd zand met mediaan korrelgrootte van 133 micrometer. Ongeveer 75% van korrels valt tussen de granulometrische grenzen van 250 en 62,5 micrometer. Slechts 10% van de korrels is groter dan 250 micrometer en behoort tot de klasse van middelmatig zand. Ongeveer 15% is kleiner dan 62,5 micrometer en wordt gelijk verdeeld over de silt- en kleiklasse. Dergelijke sterke sortering is kenmerkend voor door de wind verplaatst, eolisch zand of stuifzand.

De keienlaag die tussen beide zandsoorten voorkomt, kan beschouwd worden als een deflatievloer, dit wil zeggen een erosie-

vlak ontstaan door het uitwaaien van alle fijnere – dus ook lichtere – korrels uit de onderliggende heterogene grindhoudende zandlaag. Dit betekent dat beide lagen van duidelijk verschillende ouderdom zijn. Vermits er geen datering van de zanden kon worden uitgevoerd, wordt de stratigrafische toewijzing en dus ook de ouderdom gebaseerd op vergelijking met de algemene geologische kartering van de regio in België en Nederland.

De kaart met de quartaire afzettingen (Beerten, 1999) toont over de hele oppervlakte van de Vlakte van Bocholt de aanwezigheid van (niveo-) licht lemig dekzand. Het staat bekend als Zand van Wildert, beter bekend onder de algemene term dekzand. Het dekzand dateert, net als de loess-leem van Midden- en Hoog-België van het Pleniglaciaal, de koudste periode op het einde van de laatste Weichselijstijd, een goede 20 000 jaar geleden en wordt beschouwd als een afzetting van door de wind van noord naar zuid verplaatste sedimenten vanuit de drooggevallen Noordzeevlakte, aan de voet van het gletsjerfront van de Noord-Europese ijskap. In de valleien werd het dekzand opgeruimd door fluviatiele erosie of wordt het door recente alluviale afzettingen bedekt (bijvoorbeeld in de Maasvlakte, Figuur 4).

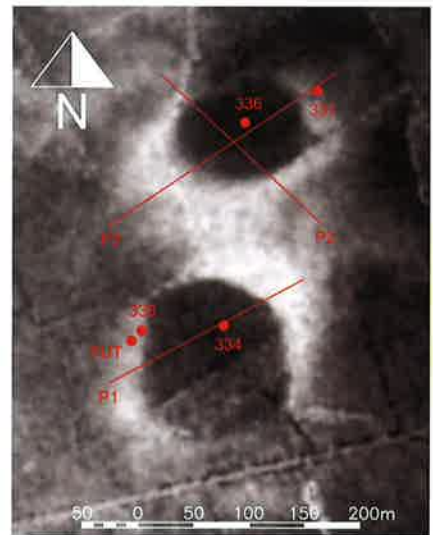
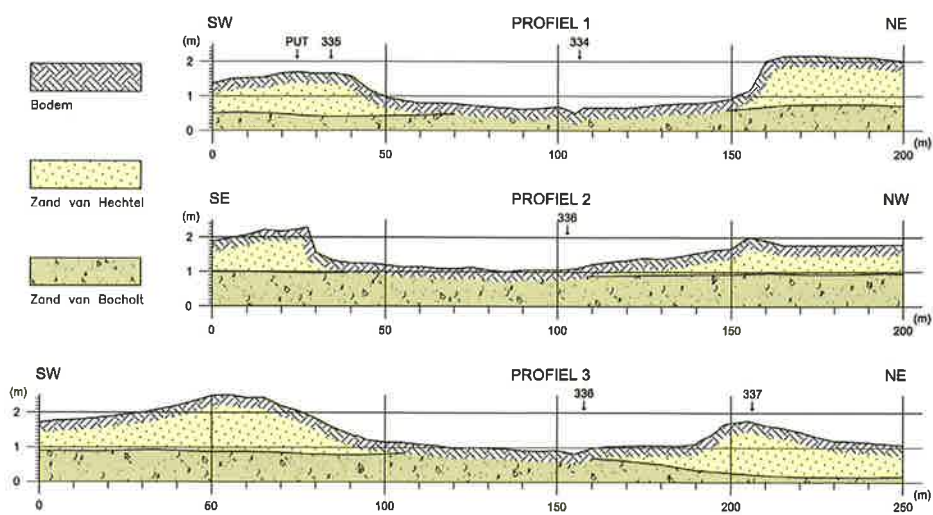
Volgens de kaart met de quartaire afzettingen (Beerten, 1999) komen de cirkelvormige depressies voor in de dekzandlaag (Figuur 9).

Het dekzand is herhaaldelijk herwerkt en bevat ook grovere elementen (keitjes) uit de onderliggende lagen. Gedurende het Tardiglaciaal, na de Weichselijstijd worden het dekzand en ten dele ook de oudere zanden lokaal verstoven en vormen zo parabool- en streepduinen.

Dit doet zich voornamelijk voor op het Kempens Plateau en in beduidend mindere mate in de Vlakte van Bocholt. Dit duinzand kon tot in recente tijden verder verstuiven. De verstoven zanden worden het Duinzand van Hechtel genoemd.

Onder deze eolische of alluviale deklagen worden in de Roerdalslenk fluviatiele zanden en grinden aangetroffen (Figuur 4). Ten oosten van de lijn Neeroeteren-Kinrooi bestaan ze uit fijne grinden met zandlenzen, afgezet gedurende de laatste ijstijden. Ze vormen er de laagterrassen van de Maas en worden gegroepeerd in de Formatie van Lanklaar. Ten westen van voornoemde lijn komen zanden voor, afgezet door de Rijn op het einde van het vroeg-Pleistoceen, mogelijk nog herwerkt door meer lokale riviersystemen tijdens het midden- tot laat-Pleistoceen. Tussen de lijn Neeroeteren - Kinrooi, de breukrand van Opitter en de breuk van Bocholt (volgens de lijn Bocholt - Hamont) bestaan ze uit grind- en kleihoudend grof zand, bekend als het Zand van Bocholt. Ten westen van de breuk van Bocholt wordt het Rijnzand van Lommel aangetroffen.

Over de grens met Nederland lopen dezelfde geologische lagen door. Vermits het dekzand er niet te onderscheiden valt van de jongere eolische zandafzettingen legt de Nederlandse stratigrafische indeling andere accenten. De Formatie van Boxel groepeerde alle mid-pleistocene tot holocene dek- en duinzanden en is dus equivalent van zowel het Zand van Wildert van tijdens de ijstijd als van het Zand van Hechtel van na de ijstijd, maar ook van de Holocene (tot recente) overstromingssedimenten of veenlagen. Het onderliggende vroeg- tot midden-pleistocene klei- en grindhoudende eerder- grofkorrelig zand wordt tot de Formatie van Sterksel gerekend, equivalent van het Zand van Bocholt en het Rijnzand van Lommel. De



Figuur 11. Ligging en geologische doorsnede van 3 met waterpas gemeten profielen in de 2 cirkelvormige depressies afgebeeld op Figuur 4.



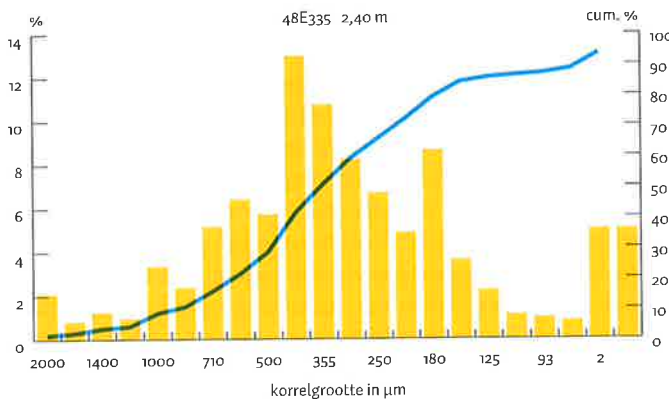
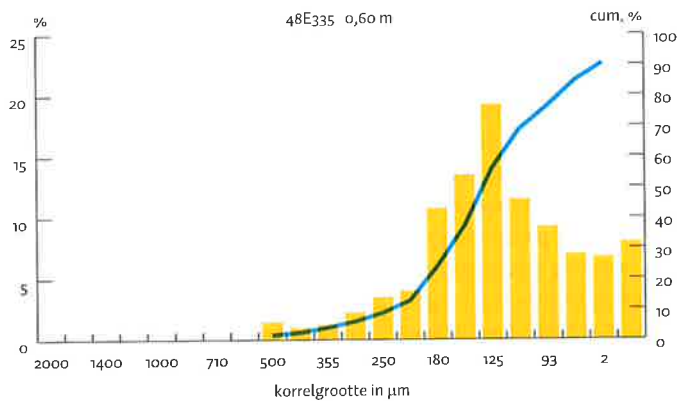
Figuur 12 a. Lepelboor-monster boring 48E0335, diepte 60-80 centimeter onder maaiveld, met fijn geelwit mul zand van eolische oorsprong, doortrokken door witte en roestige vlekken en strepen als gevolg van bodemvorming (neerslag van ijzeroxides in podzolbodem).



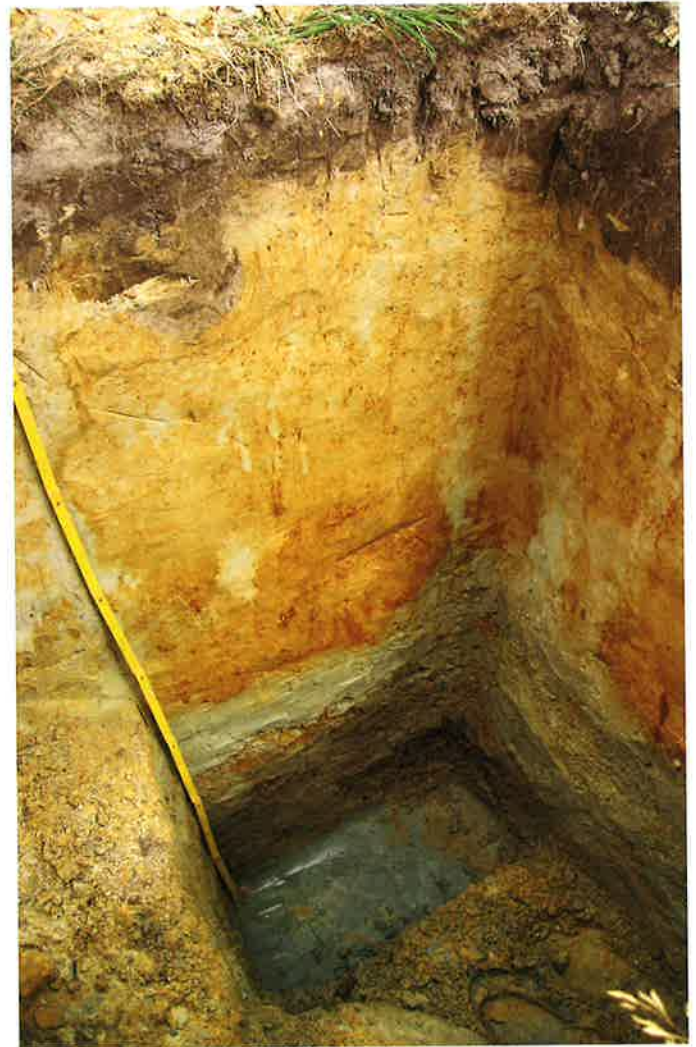
Figuur 12 b. Lepelboor-monster boring 43E0337, diepte 200-220 centimeter onder maaiveld, met grof grijs klei- en grindhoudend zand van fluviaatiele oorsprong, ontstaan in de reducerende zone maar tegenwoordig boven de zomerstand van het grondwaterpeil.



Handboring door Alida en Ward, tussen de vaarzen.



Figuur 13. Korrelgrootte-analyse van zandmonsters op dieptes van 0,60 meter (12a) en 2,40 meter (12b) in handboring 48Eo335 op de ringwal van een cirkelvormige depressie op de Sint-Martensheide. Weergave van gewichtpercent volgens korrelgrootteklasse (in micrometer) en cumulatieve verdeling (analyse Belgische Geologische Dienst). Het monster op 0,60 meter is fijnkorrelig en meer homogeen (steile curve) en fijnkorrelig, kenmerkend voor een windafzetting. Het monster op 2,40 meter is grofkorrelig en sterk heterogeen (afgevlakte curve) en bevat zowel klei als keien, kenmerkend voor een rivierafzetting.



Figuur 14. Proefput van 120 x 120 centimeter uitgegraven op 18/8/2007 tot een diepte van 172 centimeter in de westzijde van de ringwal, nabij handboring 48Eo335.

Vereenvoudigde profielbeschrijving van boven (maaiveld) naar onder:

- 0 - 29 centimeter: donkergrijze tot bruinigrijze humusrijke laag met plantwortels, die instulpingen vertoont in het onderliggende zand als ploegspoor of uitgraving;
- 29 - 110 centimeter: eerder fijn wit zand met talrijke roestbruine oxidatievlekken, vooral rond (verticale) wortelssporen die tot 85 centimeter goed zichtbaar zijn en grote vlekken en wiggen in gebleekt zand; sporadisch wat grovere zandlensjes en platte hoekige keitjes;
- 110 - 130 centimeter: het zand wordt grijs, zonder oxidatievlekken; sporadisch keitjes;
- 130 - 134 centimeter: keienvloer;
- 134 - 141 centimeter: grof, kleirijk grijs zand met dunne grindlaagjes en verspreide keitjes;
- 141 - 148 centimeter: violetgrijze zand overgaand in grof zand met kleibrokken en met talrijke keitjes; met roestvlekken;
- 148 - 172 centimeter: zeer grof grijs scherp zand met keitjes; grondwater vanaf 167 centimeter.

Nederlanders zagen de dikte van de Formatie van Boxtel in zuidelijke richting, dus naar de Belgische kant, afnemen zodat het gebiedsdekkende karakter verloren gaat (Schokker *et al.*, 2007).

Het groffe heterogene rivierzand dat tijdens het veldwerk is aangeboord, wordt stratigrafisch tot het Zand van Bocholt gerekend, het fijne mulle duinzand tot het Zand van Hechtel. Uit het veldwerk blijkt dat het Zand van Hechtel rechtstreeks op het Zand van Bocholt ligt, althans op de Sint-Martensheide. Het tussenliggende dekzand is er grotendeels afwezig en vervangen door een deflatiehorizont (keienvloer), in tegenstelling tot wat de quartair-geologische kaart weergeeft. De cirkelvormige depressies liggen in het Zand van Hechtel. In de kern van de depressies is dit duinzand weg en verschijnt het oudere rivierzand van Bocholt weer, rechtstreeks onder de vegetatiebodem. Winderosieprocessen hebben het Zand van Hechtel aangevoerd en hebben het lokaal weer uitgeblazen, tot vorming van de cirkelvormige depressies.

Ontstaan en tijdsduur van de winderosie in de Kempen

Winderosieprocessen die leiden tot vorming van duinen en duinpannen zijn goed bekend en beschreven, ook toegankelijk in leerboeken en naslagwerken (bijvoorbeeld Pannekoek & van Straaten, 1992). De relatie met de regio werd gelegd door Gullentops (1957). Deze studie fungeert als model voor de reconstructie van ontstaan en evolutie van de cirkelvormige depressies. Gullentops beschrijft enkele grotere vormen van winderosie op het Kempens Plateau: de paraboolduinen (of boogduinen) van Hoeverbergen en Kattenbos te Lommel en Bel te Meerhout (in Hechtel Kamp liggen er ook nog, maar die zijn sterk beschadigd door militaire manoeuvres). Dit zijn grote paraboolvormige duinen tot 11 meter hoog, met een straal van 500 meter en langgerekte zijvleugels die zich tot 3 kilometer kunnen uitstrekken. De paraboolduinen zijn alle op dezelfde wijze georiënteerd. De heersende windrichting die deze duinen heeft doen ontstaan, waaide van west-zuidwest naar oost-noordoost. Dit komt overeen met het windpatroon dat ook nu nog bestaat.

De centrale kuip of deflatiekom is vlak en vochtig, uitgeblazen tot aan het grondwater, opgebouwd uit grindrijk zand. Deze grove laag stelt een deflatievloer voor, een concentratie van keien op de bodem van de deflatiekom. Die wijzen erop dat het duinzand grotendeels van lokale oorsprong is, waarbij de grovere, zwaardere elementen van de oorspronkelijke zandhoudende laag ter plaatse zijn achtergebleven en de fijnere, lichtere elementen door de wind verplaatst. De concentratie van keien wijst er ook op dat het fenomeen van de winderosie vanzelf stopt wanneer de zandbron uitgeput was of onbereikbaar onder het residu van keien. Sporen van dergelijke selectieve erosie vindt men ook terug in de rolkeien die aan de basis van de tertiaire zeetransgressies voorkomen. Alleen zijn de keien die door de wind zijn blootgelegd dikwijls mat van oppervlak, als het ware gezandstraald door de voorbij razende zandkorrels, en hoekig omdat ze lange tijd aan dezelfde windrichting werden blootgesteld ('windkanters').

In de duinwerking zijn 2 duidelijk te onderscheiden fasen herkenbaar (Gullentops, 1957). In een eerste fase is de mooie paraboolvorm ontstaan, gestabiliseerd door een vegetatiedek met vor-

ming van een podzolbodem (ook Duinzand van Hechtel genoemd). Een volgende generatie van zandverstuivingen leidde tot gedeeltelijke afbraak van de paraboolduinen. De paraboolduinen werden gedeeltelijk uitgeblazen, zodat een trogvormige 'blowout' (windgat) achterbleef. Blowouts tastten vooral de hoogste en droogste kammen aan, te wijten aan de grotere diepte tot de watertafel en de ijlere begroeiing, waarbij de wortels het zand niet konden vasthouden. Het uitgewaaid zand is terug te vinden in kleinere zandduintjes van 1 tot 2 meter hoog aan de lizijde van de paraboolduin.

Het ontstaan van de grote landduinen en windwallen volgt op de laatste ijstijd wanneer over Laag-België vanuit het noorden het dekzand werd uitgespreid, dat als hoofdbron voor latere windwerking fungeerde. Het opwaaien tot de duinen die bijvoorbeeld ook in alluviale vlaktes voorkomen (de 'donken' en geassocieerde deflatiekomen) dateert daarom van na de koudste fase (Pleniglaciaal), wanneer het zand al beschikbaar was en het klimaat voldoende opgewarmd en vochtig om een lichte vegetatiedek te vormen (Tardiglaciaal): zonder obstakels gevormd door vegetatie kon er ook geen lokale ophoging in de vorm van duinen ontstaan. De zandverplaatsing volgt een windrichting die duidelijk wijst op maritieme klimaatsbeïnvloeding. Het nu nog gekende regime van de dominerende westenwinden bestond dus al tijdens de aanleg van de duinen, en is zeker later dan de verplaatsing van dekzand en loess, afkomstig van het afsmeltingsfront van de gletsjers, dus verplaatst van noord naar zuid door polaire winden.

De paraboolduinen overdekken de Usselo-bodem die met de warmere, tardiglaciale Allerød-oscillatie (12900-13350 BP) overeenkomt en zijn dus jonger. De belangrijkste fase van duinvorming dateert van de Jonge Dryas, de laatste tardiglaciale periode (einde van het Pleistoceen, 12900-11500 BP) met een toendraklimaat in onze streken, gekenmerkt door weinig stabiele vegetatie. Na de Jonge Dryas zette de holocene klimaatsopwarming definitief in. Groot-schalige duinvorming kwam ten einde door fixatie van het oppervlak onder een bosvegetatiedek tijdens het Preboreaal (10640-11430 BP). Hierop ontstond dan een vroeg-holocene podzolbodem, die enkele duizenden jaren kan bestaan hebben en die het oppervlak van de paraboolduinen langere tijd gestabiliseerd hebben. Deze fase lijkt geheel onafhankelijk van menselijke beïnvloeding te verlopen.

De blowouts, ontstaan door het verstuiwen van de duinkammen, zijn veel recenter dan de vorming van de hoofdduinen. Deflatie kon terug op gang komen door omzetting van bos in heide. Dit kon al beginnen tijdens het Subboreaal (2400-6000 BP). Deze fase zou antropogeen beïnvloed kunnen zijn. Herhaaldelijke ingrepen in het landschap door de prehistorische mens, bijvoorbeeld door beweiding, houtkap en platbranden, zijn de meest logische verklaring om deze onstabiele situatie te handhaven. Zandverstuivingen zijn trouwens een bekend historisch fenomeen in de Kempen en worden in de lithostratigrafische schaal van België het Zand van Kalmt-hout genoemd. Ze werden tegengegaan door afgraving of bebossing van de duinen. Onverstoorde duinen evolueren in ons klimaat van een buntgraskolonisatie naar heidevegetatie en eiken-berkenbos (Timmers, 2000).

Wanneer de cirkelvormige depressies van de Vlake van Bocholt in dit schema worden ingepast, zijn er 2 mogelijkheden.

Ofwel zijn ze uitgeblazen uit de verstoven toplaag van het dekzand, ofwel komen ze overeen met de tweede fase van zandverstuivingen. In het eerste geval zijn ze tardiglaciaal, in het tweede geval subboreaal of jonger (holoceen). Vermits het dekzand al herwerkt lijkt in een beter gesorteerd duinzand en de depressies hun oorspronkelijke vorm grotendeels bewaard hebben en dus gevrijwaard zijn gebleven van latere erosie, wordt hier geopteerd voor de tweede hypothese. Daarmee houdt het ontstaan van de windkuilen mogelijk verband met het verschijnen van de mens in deze streek. Op basis van de archeologische inventarisatie van Vlaanderen blijkt overigens dat vondsten in de directe omgeving van de Vlakte van Bocholt beperkt blijven tot het vroeg- en midden-Neolithicum (VIOE, http://cai.erfgoed.net/cai_public/index2.html), wat overeenkomt met het Subboreaal. In eerste fase is het tardiglaciaal Duinzand van Hechtel aangegroeid tot lage zandruggen. In een tweede fase ontstonden de windkuilen of blowouts. Wegens de geringe dikte van de zandaccumulatie zijn ze ondiep en schotelvormig en niet diep en trogvormig zoals in de grote paraboolduinen beschreven door Gullentops (1957). Er zijn geen aanwijzingen gevonden van fossiele opvulling van de depressies. Het zijn geologisch recente fenomenen, pas ontstaan in de loop van het Holoceen, nadat de oorspronkelijke bosvegetatie verdwenen was. Dit moet gebeurd zijn door toedoen van de mens want het klimaat is altijd een bosvegetatie blijven bevorderen. Na hun vorming ging de menselijke ingreep in het landschap niet verder want de windkuilen vertonen een zeer herkenbare morfologie die geruime tijd en tot op heden stabiel gebleven is.

Vergelijking

Er bestaan meerdere geomorfologische fenomenen en/of menselijke vormen van landgebruik die zwermen van ronde depressies kunnen veroorzaken. Het ontbreekt echter aan voldoende bewijsmateriaal om een oorzakelijk verband te kunnen leggen, op 1 geomorfologisch fenomeen na, dat van de hierboven geschetste winderosie.

Als menselijke fenomenen kunnen wij de bomtrechters vernoemen die bijvoorbeeld bij Cap Blanc Nez nog goed zichtbaar zijn. Zij gaan pas in het landschap vervagen door intensief ploegen, zoals bijvoorbeeld in West-Vlaanderen, of geheel verdwijnen bij snelle economische groei en verdichting van de bebouwing, zoals bijvoorbeeld in Vietnam. De Vlakte van Bocholt heeft nooit voldoende belang gehad voor heet uitgevochten conflicten.

In de Brabantse leemstreek komen tal van gesloten depressies voor, meestal op hellend terrein. Deze zijn geassocieerd met de aanwezigheid van loess, de tijdens de ijstijden door de wind aangevoerde afzetting van kalkrijk kwartssilt dat ontstaan is als gletsjerpui en door verwerking en bodemvorming omgezet is in leem. Loess kan 15% kalk bevatten en de ontkalking ervan leidt tot compactie van de overblijvende leem en tot subsidentie of bodemverlaging. Meer nog dan door kalkoplossing zijn de meeste depressies ontstaan door uitgraving van de loess voor kalkbemesting van uitgemergelde akkers, reeds vanaf het Neolithicum tot in de vroege Middeleeuwen. Hiertoe werd een kleine kuil of eerder een schacht gedolven doorheen de bovenliggende ontkalkte leem. Vervolgens is de onderliggende loess uitgegraven, zover als mogelijk zonder instorting van ondergegraven leem. Het fijnkorrelige loess, met enkele per-

cent klei als brug tussen de siltkorrels geeft immers stabiele verticale wanden, waarin bijvoorbeeld in Noord-China of Matmata (Tunesië) vele grotwoningen, zelfs gehele dorpen werden gedolven. Natuurlijke evolutie van de verlaten groeven, vaak een handje geholpen door de landbouwers, leidde dan tot zwakhellende depressies (Gullentops, 1952; Vanwalleghem *et al.*, 2007). Met name onder het Meerdaalwoud, ten zuiden van Leuven, zijn tientallen depressies bekend. De ruim 5 maal hogere densiteit ervan in vergelijking met het omgevende akkerland wijst op de sterke landschapnivellerende krachten die van mechanische landbewerking uitgaan en dientengevolge het geringe bewaringspotentieel van natuurlijke of archeologische fenomenen (Gillijns *et al.*, 2005).

Ronde kuilen ontstaan ook ten gevolge van de gedeeltelijke instorting van ondergrondse groeven. Regelmatig weerkerende instortingen in de mergelgroeven van Zuidoost-Limburg helpen ons herinneren aan de vergankelijkheid van alle menselijke constructies (Van Den Eeckhaut *et al.*, 2007).

In de Vlakte van Bocholt zijn geen ondergronds ontginbare grondstoffen bekend. De hoge grondwaterstand zou trouwens droge winning ervan onmogelijk maken.

Archeologische bewoningspatronen zijn meer aanvaardbaar in de regionale context. Met name neolithische of vroeghistorische bewoningsstructuren (ringforten) zijn goed bewaard gebleven in de schrale Kempense zandgronden, bijvoorbeeld in Lommel (Geerts *et al.*, 2006). Hun organisatie moet echter verband houden met landbouwexploitatie. Alhoewel de grootte van sommige cirkelvormige depressies kan overeenkomen met 1 boerderijsite zijn de meeste te groot en niet goed ingeplant te midden van oud akkerland. Daarenboven klopt de micromorfologie niet: in de bewoningszone zou men voortdurend met natte voeten zitten terwijl aanwijzingen voor kunstmatig verhoogde ringwallen en geassocieerde greppels ontbreken. De intussen opgevolde greppels of de paalfunderingen van de houten woningen, rijk aan organisch materiaal waardoor de bodem meer vocht kan vasthouden, zijn de meest herkenbare fenomenen want zij tekenen zich af als donkere ringen of opgelijnde stippen op luchtfoto's. Niets daarvan is geassocieerd met de gekarteerde cirkelvormige depressies in de Vlakte van Bocholt.

Cirkelvormige depressies met verhoogde rand kunnen ontstaan bij meteorietinslagen. Alhoewel deze in clusters kunnen voorkomen door uiteenvallen van asteroïden bij nadering van de dampkring, wijst niets erop dat de depressies in de Vlakte van Bocholt daar iets mee te maken hebben. Een impact-kater met een doormeter van 150 meter wordt veroorzaakt door een meteoriet van 10 ton. Daarvan zijn geen sporen gevonden en evenmin van gesmolten en gefractuurde materialen of tektonische verstoringen ten gevolge van de inslag. De spreiding van de depressies in de Vlakte van Bocholt en de lage diepte/doormeter verhouding (1/100) pleiten ook tegen een meteorietinslag (verhouding 1/5-1/7) (Koeberl & Sharpton, 2008).

Ronde depressies komen veelvuldig voor in het karstlandschap en staan bekend als dolines of oplossingsgaten. In onbedekte karst waar oplosbare kalkstenen aan de dag treden zijn ze steeds geassocieerd met het hydrografisch netwerk (verdwijngat of resurgentie) en is hun vorm meestal langgerekt. In gebieden waar de kalksteen bedekt is door een zandlaag ontstaan depressies door instor-

ting van het dak van grotten die zich dicht tegen de top van de kalksteen ontwikkelen. Zij kunnen ook ontstaan als pseudo-karst, door extreme uitloging en oplossing van kiezel en omzetting van vette of zwellende klei naar magere klei in zure grondwaters, waardoor lokaal volumevermindering en inklinking ontstaat. Een voorbeeld hiervan zijn de Carolina Bays in de vlakte langs de oostkust van de Verenigde Staten (May & Warne, 1999). Spreiding en afmeting van dergelijke dolines zijn al beter vergelijkbaar met de zwerm van cirkelvormige depressies in de Vlakte van Bochtolt. Zij kenmerken zich echter door vrij steile wanden en wisselende, deels watergevulde diepte van de depressie, maar zijn ontstaan tijdens een ijstijdperiode met lagere zeespiegel en ook lagere grondwaterstand. Naast karstwerking speelde winderosie een rol van secundair belang, af te leiden uit de ophoping van het losse onoplosbare zand in de vorm van lunette-duintjes aan de lizijde van de depressies.

De depressies in de Vlakte van Bochtolt komen vooral voor op de vlakke interfluvia, zo ver mogelijk verwijderd van de nauwe beekvalleien. Daarenboven komen er geen oplosbare gesteenten voor in de ondiepe ondergrond, zodat karstwerking als oorzaak kan uitgesloten worden.

Pannen en zoutpannen zijn een bekend fenomeen in semi-ariëde subtropische gebieden met een uitgesproken droog seizoen, zoals de Karoo, het droge binnenland van Zuid-Afrika (neerslag <500 millimeter/jaar) (Goudie & Wells, 1995). Het zijn relicten die ontstaan zijn tijdens extreem ariëde fasen in vlakke gebieden met beperkte landschapsdynamiek, dikwijls restanten van oude schiervlakken, interfluvia of verlaten rivierterrassen, met ongeordende afwatering, met verdamping die neerslag overtreft. De hoge zoutconcentraties die zo ontstaan, beletten herbegroeiing. Zij bezitten afmetingen van enkele tientallen meters tot meerdere kilometers. Ze zijn rond, lobvormig of traanvormig, dikwijls met een lunetteduin van uitgeblazen materiaal aan de lizijde. Het zijn blowouts, uitgeblazen tot op het niveau van het grondwater en gestabiliseerd door zoutneerslag. Het zandaanbod moet beperkt zijn want anders worden de depressies terug opgevuld (Figuur 15).

Ook in tropische gebieden zoals het Amazonebekken komen zwermen van blowouts geassocieerd met paraboolduinen voor in de brede riviervlaktes opgevuld met zand en klei. Het zijn relicten van periodes met schaarse begroeiing, vermoedelijk ontstaan tijdens een holocene koudeperiode, tegenwoordig watergevoerd of juist dichtbebost (Latrubesse & Nelson, 2001).

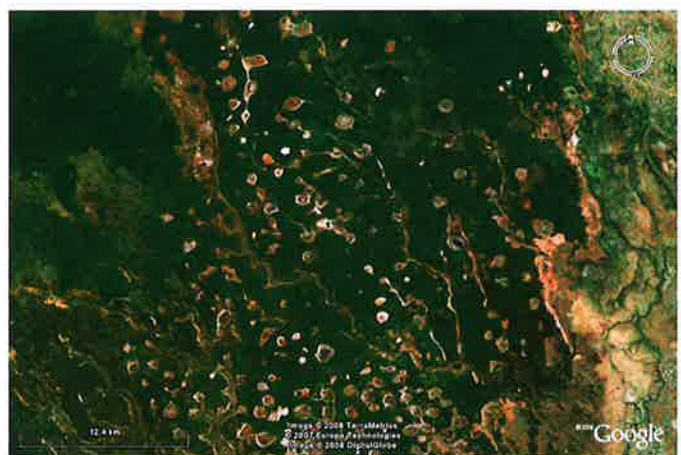
Ondanks manifeste verschillen in klimaat en bodem vertonen vorm en inplanting ten opzichte van het reliëf toch analogie met de cirkelvormige depressies in de Vlakte van Bochtolt. Wij mogen niet vergeten dat deze laatste ontstaan zijn in omstandigheden van ecologische stress, door sterke verstoring van het vegetatiedek.

Pingo's en pingoruïnes zijn morfologische structuren, overgeleverd uit de ijstijden, die als een meer plausibele hypothese voor het ontstaan van de cirkelvormige depressies werden onderzocht. Pingo betekent in de taal van de Inuit (eskimo's) 'heuvel die groeit'. Als geomorfologisch landschapselement is dit een heuvel met een kern van bodemijs, zoals die voorkomen in de arctische permafrostgebieden (toendra's). Pingo's ontstaan door de aangroei van ijslensvlak onder het oppervlak. Ideaal voor pingovorming is een afkoe-

lingsfase met steeds dieper doordringende bevroering van de bodem op plaatsen waar de permafrost nog niet helemaal gesloten is. Dat kan de bodem van een meer of een kwelzone zijn of een grondwaterlaag tussen de bevroren bodem en een ondoorlatende ondergrond. Het water wordt dan onder druk gezet, geïnjecteerd in de bovenliggende bevroren laag en befrist er. Dit proces kan doorgaan zolang er vloeibaar water tussen het ijs ingekneld is. Daardoor groeit de ondergrondse ijslens en wordt de bovenliggende grond omhooggeduwd. Zo vormen zich heuvels die in de huidige toendragebieden wel 60 meter hoog kunnen worden. Zodra de ijskern van de pingo begint te ontdooien, zakt de heuvel in en schuift de dekgrond langs de flanken omlaag. Tenslotte blijft er meestal een depressie in het landschap achter, omringd door een wal met van de heuvel gegleden materiaal: een pingoruïne. Vaak vormt zich een meer in de depressie, waarin fijn, organisch materiaal als slib bezinkt en veengroei kan optreden zodat de meeste pingoruïnes uiteindelijk verlanden (TNO Bouw en Ondergrond, 2007).

Pingoruïnes komen ook voor in gebieden waar destijds permafrost voorkwam, tijdens de ijstijden. Het zijn getuigenissen van vroegere klimaten. Voorwaarde is wel dat het voldoende koud was. In Noord-Nederland komen pingoruïnes regelmatig voor in het grensgebied van Groningen, Friesland en Drenthe. Zij zijn ontstaan tijdens het laat-Pleistoceen of Weichseliaan, meer specifiek tijdens het Pleniglaciaal, de koudste periode van de laatste ijstijd. De oude 'thermo-karst'-theorie voor het ontstaan van de aanzienlijk grote meren, tot een kilometer doormeter en 15 meter diep was vorming als gletsjerkommen, uitgeschuurd door gletsjertongen, waarin het ijs later gesmolten zou zijn dan in de omgeving.

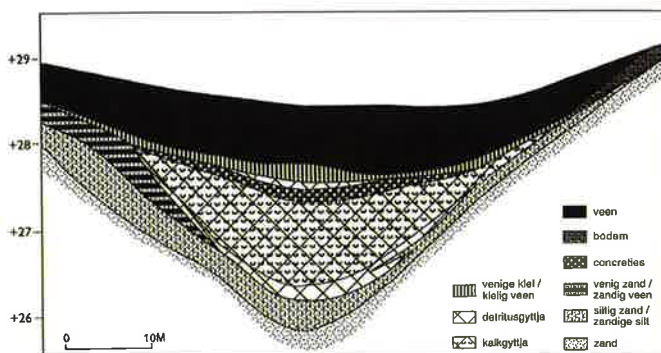
Op de Hoge Venen komt een variant voor, bekend als lithalsa, die het voorkomen van de 'viviers' of de vennen moet verklaren. Een lithalsa ontstaat door langzame accumulatie van segregatie-ijs, door capillaire krachten aangetrokken uit vochtige leemlagen onder een bevroren bodem. Lithalsas zijn doorgaans kleiner dan pingo's maar kunnen in grotere concentraties voorkomen en zijn na afsmelten ook



Figuur 15. Zwerm van pannen met gemiddelde doormeter tussen 600 meter en 1,25 kilometer in rode laterietbodem (ferralsol) op laagplateau in tertiaire fluviaatiele-lacustriene zanden en kleien met ongeordend anastomoserend drainagepatroon in de kustvlakte net ten zuiden van de Zambezi rivier in Mozambique (E 35°35' S 18°18') (bron Google Earth).

gekenmerkt door een wal van afgeschoven bodemmateriaal, fijnkorrelig en weinig doorlatend, waarbinnen dan veenvorming mogelijk is. Lithalsas vormen zich in zones van onregelmatige permafrost, noodzakelijk om nog vloeibaar water te vinden, bij een gemiddelde jaartemperatuur van -3 tot $-4,5^{\circ}$ Celsius met koudste wintermaand onder -20° Celsius en een warmste zomermaand van minder dan $+10,5^{\circ}$ Celsius om niet al te veel ijs jaarlijks te laten afsmelten. Deze voorwaarden waren nog net vervuld op het hoogplateau van de Hoge Venen en in Noord-Nederland tijdens de koude-opstoot van de Jonge Dryas (het einde van het Pleistoceen), maar net niet in de vlakke gebieden van Noord-België of Zuid-Nederland (Bastin *et al.*, 1974; Pissart, 1965, 2003; Pissart & Juvigné, 1980). De lithalsas zijn dus tijdens de laatste koudeperiode ontstaan en zijn bijgevolg jonger dan de pingo's.

Bijzonder relevant voor de Vlake van Bocholt is het voorkomen van pingoruïnes in het Weerterbos, slechts luttele kilometers ten noorden van de Belgisch-Nederlandse grens. Van grootte en vorm zijn ze erg gelijkend op de cirkelvormige depressies in de Vlake van Bocholt maar ze zijn wel over 3-4 meter dikte opgevuld met veen, organisch slib en onderaan moeraskalk of kalkgyttja (Figuur 16). Deze moeraskalk is allicht het tijdsequivalent van de rivierdalkalktufafzettingen die als bouwsteen werden gebruikt in Haspengouw. Oorsprong van de kalkrijke kwel en de kalkneerslag was vermoedelijk de ontkalking van nabijgelegen loess-ruggen uit de Formatie van Boxel, afgezet samen met het dekzand tijdens het Pleniglaciaal. De venige-kalkige opvulling van de pingoruïnes in het Weerterbos begon al tijdens het Tardilaciaal, meer specifiek het Bølling-Interstadiaal en liep door tot het Atlanticum in het midden van het Holoceen, van 13500 tot 6000 jaar BP, wat het ontstaan van deze pingo's ouder, dus vrijwel zeker pleniglaciaal maakt, zoals de pingo's van Noord-Nederland (Hoek & Joosten, 1995; Gerats, 2002). Om pingoruïnes terug te vinden was het dus aangewezen de grote ronde vennen te onderzoeken. Het Winkelderven te Molenbeersel bezit inderdaad een veenlaag maar deze is erg oppervlakkig en rust op dezelfde rivierafzetting als de depressies van Sint-Martensheide.



Figuur 16. Dwarsdoorsnede door pingo-ruïne in het Weerterbos (Weert, Nederlands Limburg). In vergelijking met de onderzochte cirkelvormige depressies in de Vlake van Bocholt (cf. Figuur 10) komt hier een dickere opvulling voor van oud en jong veen, met kalkgyttja en kalktufconcretes (naar Hoek & Joosten, 1995, met toelating door het Natuurhistorisch Genootschap in Limburg).

De verhoogde rand die bestaat uit windafzettingen klopt ook niet met de afschuivingsrand volgens de pingoruïne-hypothese. Alhoewel het voorkomen van pingoruïnes in de Vlake van Bocholt hiermee niet uitgesloten kan worden, mag dit zeker niet aanzien worden als een reden voor het ontstaan van de cirkelvormige depressies die er in grote getale voorkomen.

Ontstaansmodel

De cirkelvormige depressies zijn ontstaan als deflatiekomen of windkuilen (blowouts). De definitie van een blowouts is een schotelvormige depressie, gevormd door winderosie in een bestaand zandlichaam. De sikkelvormige accumulatie van het verplaatste zand wordt beschouwd als deel van de blowout (Hesp, 2002). Op zich is dit een banaal maar wel zeer dynamisch erosieproces dat leidt tot sterke ruimtelijke en tijdelijke variabiliteit met voortdurend evoluerende landschapsvormen die ook in de Vlake van Bocholt voorkomen (Figuur 17ab). Meerdere omstandigheden maken echter dat de windkuilen, herkenbaar in de Vlake van Bocholt als cirkelvormige depressies, bijzonder goed bewaard en uniek zijn. Om de huidige toestand te verklaren moet op basis van bekende geomorfologische processen en het geologisch referentiekader hun specifieke ontstaansgeschiedenis gereconstrueerd worden – weliswaar als hypothese vermits exacte ouderdommen niet beschikbaar zijn. Gegevens over de bodem zijn ontleend aan het veldwerk op de Sint-Martensheide te Bree, ruimtelijke gegevens zijn afgeleid uit het DHM Vlaanderen.

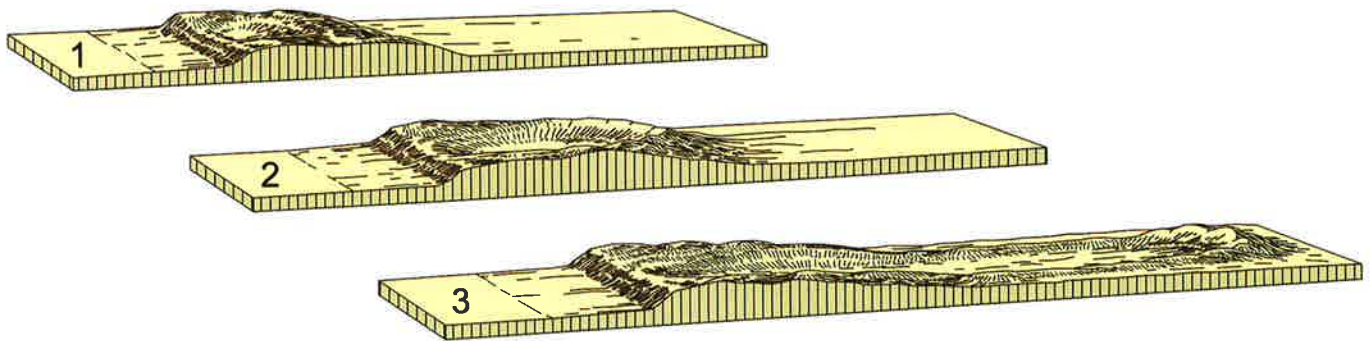
Het verhaal begint op het hoogtepunt van de laatste ijstijd, het Pleniglaciaal, zo 'n 20 000 jaar geleden. Van het dekzand dat toen over het gebied is uitgespreid zijn in het onderzochte gebied weinig sporen overgebleven, hetzij door fluviatiele herwerking en menging met het onderliggende heterogene Zand van Bocholt, hetzij door eolische herwerking in het Duinzand van Bouwel. Dekzand en ouder pleistoceen zand was er wel in overmaat beschikbaar op het Kempens Plateau en de westelijke randzone van de Roerdalslenk waar het Rijnzand van Lommel dagzoomt. Tijdens de koudeperiode van de Jonge Dryas in het Tardiglaciaal, zo 'n 12 000 jaar geleden, kon dit zand door de heersende wind verder in oost-noordoostelijke richting worden getransporteerd. In tegenstelling tot het Kempens Plateau ontstonden er in de Vlake van Bocholt geen hoge duinen. Dit kan wijzen op een beperkte zandverplaatsing in een licht begroeiende omgeving: de windenergie overtrof het zandaanbod, wat leidde tot een onderverzadigd zandtransportsysteem. Zo ontstonden evenwijdig aan de hoofdwindrichting een reeks lage stuifzandruggen in de vorm van lengteduinen of streepduinen, overeenkomend met het Zand van Hechtel.

De ontstaansgeschiedenis van de grote Kempense paraboolduinen toont aan dat deze duinstructuren gefixeerd werden bij de klimaatverbetering aan het begin van het Holoceen, zo 'n 11 430 jaar geleden, maar terug gedestabiliseerd door degeneratie van de vegetatie, allicht ten gevolge van menselijke ingrepen in het landschap sinds 6 000 jaar (begin van het Neolithicum). De periode waarin de deflatiekomen zijn uitgewaaid is niet nauwkeuriger bekend. In ieder geval was de vormingsfase lang afgelopen wanneer de moderne landbouwexploitatie tot stand kwam.

Het vegetatiekleed zal het eerst verdwijnen op de hoogst-

gelegen losse droge zandgrond. De toppen van het eolische microreliëf werden uitgestoven. Door winderosie op de minst beschutte streepduinen ontstaan over de gehele Vlakte van Bocholt reeksen van schotelvormige depressies of windkuilen. Naburige depressies zijn vergelijkbaar in grootte en diepte. Die zijn immers afhankelijk van de breedte en dikte van de stuifzandrug. De depressies worden uitgediept tot aan het contact met het onderliggende grove rivierzand, overeenkomend met het Zand van Bocholt (of meer naar het oosten de Maasterrassen van Lanklaar). De korrelgrootte van deze zanden laat immers geen eolisch transport meer toe. De aanwezigheid van een ondiepe grondwatertafel heeft mogelijk het uitstuiven ook een halt toegeeroepen. Het grondwater en het capillaire water zorgden enerzijds voor een zekere cohesie tussen de zandkorrels waardoor deze aan elkaar bleven kleven en anderzijds voor het begroeien van het zand op de laagste plaatsen waardoor dit ter plekke vastgehouden werd. Zodoende kon een windkuil niet verder uitgroeien. Het uitgeblazen zand omgeeft de lijszijde van de kuil en vormt zo een sikkelvormige zandophoping of lunette bovenop het reeds aanwezige duinzand. Door het beperkte zandaanbod op de

lage streepduinen blijft de ingesloten windkuil relatief immobiel en hij zal zich niet gemakkelijk met de windrichting mee verplaatsen. Hierdoor kan de uiteindelijke vorm de cirkelvorm benaderen, met een platte bodem tot op het grondwater en/of in het grofkorrelige substraat, aan de loefzijde door deflatie in de lage streepduin uitgehold en aan de lijszijde verhoogd met een lunette. Door de immobiliteit van de windkuil en de licht wijzigende westenwinden blijven de armen van de lunette kort en blijft de boog dus rond. Ondanks de ronde vorm vertonen loef- en lijszijde dus een verschillende micromorfologie. De lagere westrand van de deflatiekom is doorgaans wat kwetsbaarder. Onregelmatige randen vertoont op het digitaal hoogtemodel kunnen te wijten zijn aan de lagere resolutie van het hoogtemodel voor hoogteverschillen die minder dan 1 meter bedragen, maar kunnen ook het gevolg zijn van verstoring door landbouwpraktijken of door vee die een kleine trap in het landschap kunnen wegwerken maar een hogere ongemoeid laten. Dat desondanks de cirkelvormige depressies nog zo gemakkelijk herkend en op kaart gebracht kunnen worden is een bewijs voor hun geringe verstoring en dus ook voor de beperkte impact van de mens in het landschap.



Figuur 17a. Evoluteschema van windkuil tot boogduin (paraboolduin), naar van Houten (1939) in Escher (1962), aangepast aan het microreliëf van de Vlakte van Bocholt.



Figuur 17b. Overeenkomstige morfologische evolutiestadia van de windkuilen op het panchromatisch beeld, waargenomen ten noorden van de Zuurbeek, met inbegrip van de onderzochte depressies (Figuur. 9).

De windkuilen zijn vermoedelijk ontstaan gedurende een korte periode, niet gelijktijdig want soms schuift een jongere windkuil gedeeltelijk over een oudere (Figuur 10), maar wel onder dezelfde klimaatsomstandigheden en landgebruik zodat er een tamelijk homogene populatie van cirkelvormige depressies is ontstaan. De windkuilen werden kort na hun ontstaan gefixeerd in eenzelfde juveniel evolutiestadium, in tegenstelling tot de zandverstuivingen in de Kempen. Twee gerelateerde factoren droegen hiertoe bij: de geringe beschikbaarheid van zand en de hoge grondwaterstand. Een derde factor die tot conservering heeft geleid is zo mogelijk nog belangrijker: de geringe ingreep van de mens in het landschap van de Vlakte van Bocholt, de enige streek in Vlaanderen waar dergelijke kleine natuurlijke landschapselementen op zo grote schaal konden overleven (<http://geo-vlaanderen.agiv.be/geo-vlaanderen/landschaps-atlas>)

Besluit: wat maakt deze circulaire depressies zo uniek?

In de Vlakte van Bocholt, het landelijke en rustige gebied gelegen tussen Hamont, Bree en Kinrooi, komt een onopvallend landschapselement voor dat als natuurlijk relict uniek is voor dit gebied. Een tweehonderdtal cirkelvormige depressies met doormeter van gemiddeld 140 meter en verhoogde wallen van gemiddeld 1,50 meter konden dankzij de opmaak van panchromatische beelden en hellingschaduwkaarten op basis van het DHM Vlaanderen in kaart gebracht worden. Veldonderzoek uitgevoerd op de Sint-Martensheide te Bree heeft aangetoond dat ze zijn ontstaan als windkuil of deflatiekom. Die ontstaan meestal in hogere duinen waar hun vorm meer langgerokken is en de morfologie snel verandert. In gebieden met laag zandaanbod en hoge grondwaterstand, zoals in de Vlakte van Bocholt, worden deflatiekommen gefixeerd in een vroeg stadium. Dergelijke morfologische structuren hebben een zeer laag bewaarpotentieel in de bewoonde wereld want zij worden snel vernietigd door grondverzet bij ploegen. Het voorkomen in de Vlakte van Bocholt is dus uitzonderlijk maar ook zeer kwetsbaar, door omzetting in maïsakkers of door ontgronding. Het bevestigt de waarde van het gebied rond de Abeekvallei en Stamprooierbroek als ankerplaats en de noodzaak om een aantal representatieve plaatsen tegen aantasting te beschermen.

Dankwoord

Deze studie kon niet worden uitgevoerd zonder de medewerking van de LIKONA-Werkgroep Geologie. Wij danken dan ook alle boorders, gravers en landmeters, met name Marleen Akkermans, Alida Vanholst, Georges Ruyloft, Luc Paque, Ward Cielen, Bernard Voordecers, Jos Janssen voor hun onverschrokken inzet en het trotseren van de woestere elementen uit de plaatselijke fauna. Prof. em. A. Pissart (Universit  de Liège), Koen Verbeeck (Koninklijke Sterrenwacht van Belg ) en Koen Beerten (sck) leverden een gewaardeerde bijdrage tot de interpretatie.

Referenties

- ANTROP, M., F. DE FACQ, B. DE RICHTER, R. PEEL, L. VAN ZISLANDE & A. VERHOEVE, 1987. De open ruimte in Vlaanderen, een geografisch-landschappelijke en biologische verkenning. Handleiding. Koning Boudewijnstichting, Den Gulden Engel: 38-39.
- BASTIN, B., E. JUVIGN , A. PISSART & J. THOREZ, 1974. Etude d'une coupe d gag e   travers un rempart d'une cicatrice de pingo de la Brackvenn. *Annales de la Société Géologique de Belgique* 97: 341-358.
- BEERTEN, K., 1999. Technische tekst bij de Quartairgeologische kaart 10-18 Maaseik. MVG EWBL ANRE, 50 p.
- BAEYENS, L., 1975. Verklarende tekst bij het kaartblad Bree 48E. Bodemkaart van Belg : 108 p.
- DE GANS, W., 1982. Location, age and origin of pingo remnants in the Drentsche Aa valley area (The Netherlands). *Geologie en Mijnbouw* 61 (2): 147-158.
- DE MOOR, G. & A. PISSART, 1992. Het reliëf. In: Denis, J. *Geografie van Belg *. Gemeentekrediet, Brussel: 130-215.
- ESCHER, B.G., 1962. Grondslagen der algemene geologie. Wereldbibliotheek Amsterdam-Antwerpen, 442 p.
- GERATS, R., 2002. Het Weerterbos. Historische en abiotische achtergronden die richtinggevend zijn in het beleid, inrichting en beheer. *Natuurhistorisch Maandblad* 91 (December 2002): 263-269.
- GEERTS, F., K. DEFORCE, M. VAN GILS & M. DE BIE, 2006. *Federmessersites te Lommel-Maatheide (prov. Limburg)*. Opggravingscampagne 2006 en eerste resultaten van het paleo-ecologisch onderzoek. *Notae Praehistoricae* 26: 125-128.
- GILLIJNS, K., J. POESEN & J. DECKERS, 2005. On the characteristics and origin of closed depressions in loess-derived soils in Europe – a case study from central Belgium. *Catena* 60: 43-58.
- GOUDIE, A.S. & G.L. WELLS, 1995. The nature, distribution and formation of pans in arid zones. *Earth-Science Reviews* 38: 1-69.
- GULLENTOPS, F., 1952. Ph nom nes subkarstiques près de Leefdael (Babant). *Bulletin de la Société belge de G ologie* 61: 120-124.
- GULLENTOPS, F., 1957. Quelques phénomènes g omorphologiques depuis le Pl nium. I. – Dunes paraboliques en Campine. *Bulletin de la Société belge de G ologie* 66: 86-95.
- GULLENTOPS, F. & E. PAULISSEN, 1996. Maasgrind. In: Gullentops, F. & L. Wouters. *Delfstoffen in Vlaanderen*. MVG EWBL ANRE: 80-84.
- HESP, P., 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48: 245-268.
- HOEK, W.Z. & J.H.J. JOOSTEN, 1995. Pinguo nes en kalkgyttja in het Weerterbos. *Natuurhistorisch Maandblad* 84 (Oktober 1995): 234-241.
- HOUTEN, J. VAN, 1939. De oppervlaktevormen van het Haagsche duinlandschap. *Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap* 56: 1-50.
- KOEBERL, C. & V.L. SHARPTON, 2008. *Terrestrial impact craters (second edition)*. Lunar and Planetary Institute, Universities Space Research Association, Houston. www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/craters (consultatie 30/4/2008).
- LATRUBESSE, E.M. & B.W. NELSON, 2001. Evidence for Late Quaternary aeolian activity in the Roraima - Guyana Region. *Catena* 43: 63-80.
- MAY, J.H. & A.G. WARNE, 1999. Hydrogeologic and geochemical factors required for the development of Carolina Bays along the Atlantic and Gulf of Mexico, coastal plain, USA. *Environmental and Engineering Geoscience* 5/3: 261-270.
- PANNEKOEK, A.J. & L.M.J.U. VAN STRAATEN, 1992. *Algemene Geologie*. Wolters-Noordhoff, 5de druk, 599 p.
- PISSART, A., 1965. Les pingos des Hautes Fagnes: les problèmes de leur génèse. *Annales de la Société Géologique de Belgique* 88: 277-289.
- PISSART, A., 2003. The remnants of Younger Dryas lithalsas on the Hautes Fagnes Plateau in Belgium and elsewhere in the world. *Geomorphology* 52: 5-38.
- PISSART, A. & E. JUVIGNÉ, 1980. Génèse et âge d'une trace de butte p riglaciale (pingo ou palse) de la Konnerzvenn (Hautes Fagnes, Belgique). *Annales de la Société Géologique de Belgique* 103: 73-86.
- Provincie Limburg, 2007. Ruimtelijk Structuurplan Provincie Limburg. 293 p. Deel III.6. Landschappelijke structuur. www.limburg.be/structuurplan20071017/html (consultatie 30/4/2008).
- SCHOKKER, J., H.J.T. WEERTS, W.E. WESTERHOFF, H.J.A. BERENDSEN & C. DEN OTTER, 2007. Introduction to the Bostel Formation and implications for the Quaternary lithostratigraphy of the Netherlands. *Netherlands Journal of Geoscience - Geologie en Mijnbouw* 86-3: 197-210.
- TIMMERS, E., 2000. Duinen vind je niet alleen aan de kust. *Natuureservaten* 22-4: 8-11.
- TNO Bouw en Ondergrond, 2007. *Natuurinformatie: Pingo en pinguo ne*. www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/1000308.html (consultatie 30/4/2008).
- VAN DEN EECKHAUT, M., J. POESEN, M. DUSAR, V. MARTENS & Ph. DUCHATEAU, 2007. Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium). *Geomorphology* 91: 19-37.
- VAN DEN EECKHAUT, M., J. POESEN, M. DUSAR, V. MARTENS & Ph. DUCHATEAU, 2007. Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium). *Geomorphology* 91: 19-37.
- VANWALLEGHEM, T., J. POESEN, I. VITSE, H. BORK, M. DOTTERWEICH, G. SCHMIDTCHEN, J. DECKERS, A. LANG, B. MAUZ, 2007. Origin and evolution of closed depressions in central Belgium, European loess belt. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 574-586.