Aardappels of Archeologie?

Effecten van landgebruik op verstoring van gestratificeerde bodemlagen

Maurice Meuwissen

20-4-2012
MSc-thesis Soil Science

Begeleiders:
Marthijn Sonneveld (WUR)
Hans Huisman (RCE)
Jeroen Schoorl (WUR)

WAGENINGEN UR
For quality of life

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

Samenvatting

De eerste bewoning in het kustgebied van Friesland en Groningen ontstond rond 700 v. Chr. toen, als gevolg van een minder sterke zeespiegelstijging, enkele hoger gelegen kwelderwallen niet meer dagelijks overstroomd werden door het getij. In tijden waarin de zeespiegel steeg werden de terpen geleidelijk opgehoogd met plaggen, huishoudelijk afval en mest. Daarnaast werd er materiaal afgezet tijdens overstromingen. Dit leidde ertoe dat de terpen gestratificeerde bodemlagen kennen met daarin archeologisch waardevolle materialen. Vanwege de belangrijke historische waarde die terpen vertegenwoordigen hebben veel terpen een monumentale status en er wordt gepoogd de in de terp aanwezige archeologische resten zo goed mogelijk te conserveren. Ondanks deze bescherming vindt er nog steeds verstoring plaats van archeologische resten. Een voorgestelde oplossing voor dit probleem is stoppen met ploegen zodat de bovenste 20-35 cm van de bodem niet langer gehomogeniseerd wordt. Bovendien wordt voorkomen dat als gevolg van ploegerosie en de daarmee samenhangende daling van het maaiveld, steeds iets dieper in tot dan toe onverstoorde lagen wordt geploegd. Als gestopt wordt met ploegen zal het landgebruik veranderen in grasland. Echter onder grasland komt tot 3 keer zoveel bodemfauna voor als onder akkerland. Dit bodemleven zorgt voor verstoring (bioturbatie) van bodemlagen. Het is daarom de vraag of het omzetten van akkerland naar grasland wel de beste keuze is voor het behoud van de archeologische resten. Op dit moment is 17% van het terpoppervlak in gebruik als akkerland en 46% is grasland. Om de gevolgen van permanent gras- of akkerland te kunnen evalueren werd onder andere gekeken naar het aantal poriën in het bodemprofiel. De gedachte hierachter is dat het aantal poriën een indicatie is voor de intensiteit van de bioturbatie, het aanwezige bodemleven maakt immers poriën. Niet alle aanwezige poriën hoeven samen te hangen met het huidige landgebruik, ze kunnen ook gevormd zijn tijdens het ontstaan van de laag of in een periode met een ander landgebruik. Daarom werd ook gekeken naar de verspreiding van antropogeen lood door het bodemprofiel. Van ploegerosie was wel bekend wat de effecten zijn maar niet hoe groot de gevolgen van dit proces op de langere termijn zijn en tot welke diepte verstoring plaatsvindt. Daarom werd met behulp van het LAPSUS landschapsevolutiemodel gekeken wat de effecten zijn van ploegen op het hoogteprofiel. Uit een analyse van landgebruikskaarten met ArcGIS bleek dat er alleen op de terp van Hogebeintum percelen met permanent akker- en grasland naast elkaar liggen. In Hogebeintum werd een verkennend booronderzoek gedaan met de edelmangrondboor waarbij gekeken werd naar de algemene opbouw van het bodemprofiel. Uit dit onderzoek bleek dat de terp bestaat uit een ondergrond van klei met daar bovenop een laag zavel. Deze laag zavel was op diverse plaatsen afgraven tot op de onderliggende kleilaag. De afgegraven gedeelten hebben een lage ligging en daardoor een lage ontwateringsdiepte. Door de afgravingen zijn de resterende terpresten onstabiel zijn geworden. Beheersmaatregelen om de terp in stand te houden en maatregelen ten behoeve van de waterhuishouding hebben ervoor gezorgd dat de bodem op diverse plaatsen flink verstoord is. Op basis van het booronderzoek werden locaties gekozen die representatief zijn voor het huidige landgebruik. Op de representatieve locaties werden mechanische steekboringen gedaan tot 80 centimeter diepte met een boorrups. Van de boorkern werd met intervallen van 2,5 en 5 cm de loodconcentratie resp. het porieoppervlak bepaald. Uit deze analyse bleek dat bij akkerlanden de bovenste 30 cm sterk gehomogeniseerd is en dat er nauwelijks bodemleven voorkomt. Rond 30 cm diepte is er een abrupte overgang naar onverstoorde bodemlagen. In deze onverstoorde lagen komt ook nauwelijks bodemleven voor. Bij graslanden is de bodem verstoord door het bodemleven. Deze

verstoring neemt geleidelijk af met de diepte maar komt voor tot 50 cm diepte. Uit het landschapsevolutiemodel bleek dat op de meeste plekken na 100 jaar ploegen slechts enkele millimeters bodem is geërodeerd. Echter, lokaal kan er tot een halve meter bodem eroderen wat zou betekenen dat er over 100 jaar geploegd wordt in een laag die tegenwoordig 80 cm onder maaiveld ligt. De hoeveelheid bodem die verplaatst wordt door ploegerosie is afhankelijk van de richting waarin geploegd wordt maar ook van het hoogteverschil binnen een perceel. Perceelsgrenzen op de juiste plaats en ploegen in de juiste richting kunnen de gevolgen van ploegerosie verkleinen.

De vraag welk landgebruik gekozen moet worden om de archeologische sporen het best te beschermen tegen verstoring is vooral een beleidsvraag die afhangt van het belang dat wordt gehecht aan die enkele plekken (minder dan 1% van de hele terp) met tot 50 cm ploegerosie. Er kan worden gekozen om die plekken te behouden en het akkerland te veranderen in grasland. Dit betekent ook dat op de rest van het perceel de dikte van de verstoorde laag toeneemt met 20 cm. Blijft het landgebruik akkerland dan zijn er enkele plekken met 50 cm ploegerosie maar op het overgrote deel van de terp worden gedurende 100 ploegen slechts enkele millimeters van de onderliggende bodemlagen verstoord. Verder kan op basis van het veldwerk worden geconcludeerd dat het veranderen van landgebruik om verstoring van de bodem tegen te gaan alleen zinvol is als gestopt wordt met alle andere vormen van bodemverplaatsing.

Voorwoord

Dit rapport is het eindverslag van mijn MSc-thesis die onderdeel is van de Master Soil Science aan de Wageningen Universiteit. Ik heb deze thesis uitgevoerd tussen november 2011 en mei 2012 in opdracht van de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Mijn dank gaat uit naar mijn begeleider Hans Huisman voor de mogelijkheid om dit onderzoek te doen, voor een eerste kennismaking met de 'echte' wereld en meedenken met het onderzoek. Van het RCE wil ik verder Bertil van Os bedanken voor de hulp met de XRF-metingen en het evalueren van een eerdere versie van dit rapport, Jos Stöver voor het contacteren van de gemeente en medewerking bij het opstellen van het PVE, Wim Jong voor het regelen van de betredingstoestemming en het inmeten van de boorlocaties, Jan-Willem de Kort en Menno van der Heiden voor hun betrokkenheid bij het veldwerk. Tevens wil ik graag Johan Nicolay van de Rijksuniversiteit Groningen bedanken dat ik een week mee mocht lopen bij de archeologische opgraving in Arkum, Friesland.

Van de Wageningen Universiteit wil ik mijn begeleider Marthijn Sonneveld bedanken voor zijn kritische blik en waardevolle commentaren. Verder wil ik Jeroen Schoorl bedanken voor het ter beschikking stellen en hulp bij het LAPSUS model. Ook wil ik graag Mirjam Pulleman bedanken voor de achtergrondinformatie over bioturbatie en Roel Dijksma voor het lenen van de materialen voor het veldwerk.

Verder wil ik graag de landeigenaren: J. van der Weg, A. Talsma, S. Braaksma, S. Hilleger bedanken voor hun toestemming om handboringen en mechanische steekboringen te mogen doen op hun eigendommen en voor de waardevolle informatie over het landgebruik.

Als laatste wil ik graag Kim bedanken voor de bereidwilligheid om een paar foto's te analyseren, hulp bij de (foto)grafische aspecten van dit onderzoek maar vooral voor de morele steun.

Wageningen, 25 mei 2012 Maurice Meuwissen

Bij het doen van onderzoek moeten soms de nodige hindernissen overwonnen worden...
(Foto H. Huisman)

Inhoudsopgave

LIJST VAN FIGUREN EN TABELLEN 6

1. INLEIDING 8

1.1 ONTSTAAN VAN TERPEN IN FRIESLAND 8

1.2 PROBLEEMSTELLING 8

1.3 ONDERZOEKSVRAGEN 9

2. ACHTERGROND 10

2.1 BIOPORIËN 10

2.2 BODEMVERPLAATSING DOOR BODEMFAUNA 11

2.3 AANTAL WORMEN ONDER AKKERBOUW EN GRASLAND 12

2.4 PLOEGEROSIE 13

2.5 LOODVERONTREINIGING 13

3. MATERIAAL EN METHODEN 15

3.1 GIS-ANALYSE 15

3.1.1 Gebruikte kaarten 15

3.1.2 Geoprocessing 17

3.2 DE TERP VAN HOGEBEINTUM 20

3.3 VELDWERK 23

3.3.1 Bemonsteringspatroon 23

3.3.2 Handboringen 23

3.3.3 Representatieve locatie per landgebruik 24

3.3.4 Mechanische steekboringen 24

3.3.5 Bepalen van waterdoorlatendheid 25

3.4 FOTO-ANALYSE 29

3.4.1 Meettechnieken voor het porieoppervlak 29

3.4.2 Prepareren van de boorkern 29

3.4.3 Fotograferen van de boorkern 30

3.4.4 Foto-analyse software 31

3.5 XRF-METINGEN 34

3.6 LAPSUS 35

4. RESULTATEN 39

4.1 HANDBORINGEN 39

Codering bodemhorizonten 39

Bodemopbouw 41

Overige waarnemingen *44*
4.2 BODEMEIGENSCHAPPEN 45
4.2.1 Porieoppervlak *45*
4.2.2 Rondheid van de poriën *46*
4.2.3 Loodconcentratie *47*
4.2.4 Verhouding lood en porieoppervlak *49*
4.2.5 Niet-minerale bestanddelen *49*
4.3 WATERDOORLATENDHEID (K_{SAT}) 50
4.4 LAPSUS 51
Hogebeintum *51*
Berlikum *55*
DISCUSSIE 59
PORIEOPPERVLAK 59
XRF-METINGEN 60
LOCATIE VOOR MECHANISCHE STEEKBORINGEN. 61
MODELLEREN VAN PLOEGEROSIE MET LAPSUS 62
BESTE LANDGEBRUIK OM ARCHEOLOGISCHE RESTEN TE BEHOUDEN 62
CONCLUSIE 63
AANBEVELINGEN 64
LITERATUUR 66
BIJLAGEN 70
BIJLAGE 1: GIS-MODELLEN 70
BIJLAGE 2: TOPOGRAFISCHE KAARTEN VAN HOGEBEINTUM 72
BIJLAGE 3: BOORBESCHRIJVING EN DWARSDOORSNEDEN 76
BIJLAGE 4: DOORLATENDHEIDMETINGEN 92

Lijst van figuren en tabellen

Alle figuren en tabellen zijn gemaakt door de auteur tenzij anders vermeld.

Figuur 1.1 De verdeling van landgebruik op terpen in Friesland 9
Figuur 2.1 Verplaatsing van bodemmateriaal door wormen 10
Figuur 2.2 Hoofdgroepen ongewervelde bodemorganismen volgens lichaamsbreedte 11
Figuur 2.3 De biomassa van de wormen onder akkerland en grasland 12
Figuur 2.4 Het aantal wormen per vierkante meter op 14 testvelden in Indiana en Illinois (VS) 13
Figuur 2.5 Verdeling van lood door de bodem onder permanent grasland en akkerland 14
Figuur 3.1 Detail van het ArcGIS model 17
Figuur 3.2 De terpen van Jewier en Koudehuizum 18
Figuur 3.3 Historisch landgebruik in Hogebeintum op basis van analyse van de HGN- en LGN-kaarten 19
Figuur 3.4 Afgraving van de terp van Hogebeintum 20
Figuur 3.5 Bodemkaart 1:10.000 21
Figuur 3.6 Percelen in Hogebeintum waar veldwerk werd gedaan 21
Figuur 3.7 Dwarsdoorsnede van een kruinig perceel 22
Figuur 3.8 Kruinige percelen in Hogebeintum 22
Figuur 3.9 Gebruikte materialen bij de handboringen 24
Figuur 3.10 Het maken van mechanische steekboringen met de boorrups 25
Figuur 3.11 Samenhang tussen de waterdoorlatendheid en de porositeit van de bodem 26
Figuur 3.12 De boorgatmethode; meetopstelling en symbolen 27
Figuur 3.13 Gebruikte materialen bij de boorgatmethode. 27
Figuur 3.14 Voorbeeld van een 3D-analyse met behulp van beelden gemaakt met een CT-scanner 29
Figuur 3.15 Het verwijderen van bodem zonder de bodemstructuur te beschadigen 30
Figuur 3.16 De opstelling voor de foto's voor de foto-analyse. 31
Figuur 3.17 Schermafbeelding van het tabblad Output in Pixcavator 6.0 32
Figuur 3.18 De meetopstelling voor de XRF-metingen. 34
Figuur 4.1 Overzicht van de boorraaien inclusief perceelsnummers 40
Figuur 4.2 Doorsnede A-'A 41
Figuur 4.3 Doorsnede B-'B 42
Figuur 4.4 Doorsnede C-'C 43
Figuur 4.5 Doorsnede D-'D 43
Figuur 4.6 Het verloop van het porieoppervlak 45
Figuur 4.7 Het verloop van de rondheid van de poriën met de diepte 46
Figuur 4.8 Enkele objecten en de bijbehorende rondheid 47
Figuur 4.9 Verspreiding van lood door de bodem 47
Figuur 4.10 Cumulatieve verdeling van het lood 48
Figuur 4.11 Verdeling van lood en porieoppervlak bij akker- en graslanden. 49
Figuur 4.12 Verdeling van het percentage niet-minerale bestanddelen over de diepte 49
Figuur 4.13 Verandering van de maaiveldhoogte in Hogebeintum 52
Figuur 4.14 Histogram van de bodemredistributie in Hogebeintum als dwars op de contouren geploegd wordt 53
Figuur 4.15 Histogram van de bodemredistributie in Hogebeintum als parallel aan de contouren geploegd wordt . 53
Figuur 4.16 Verandering van de maaiveldhoogte in Berlikum 56
Figuur 4.17 Histogram van de bodemredistributie in Berlikum als dwars op de contouren geploegd wordt 56
Figuur 4.18 Histogram van de bodemredistributie in Berlikum als parallel aan de contouren geploegd wordt 57
Figuur 4.19 Verloop van gemiddelde erosiediepte over tijd in Hogebeintum en Berlikum 58

TABEL 3.1 VERSCHILLEN TUSSEN DE GEBRUIKTE LGN-BESTANDEN. 15
TABEL 3.2 LANDGEBRUIK VAN DE ONDERZOCHTE PERCELEN VOLGENS TOPOGRAFISCHE KAARTEN. 21
TABEL 3.3 PLOEGCONSTANTES 36
TABEL 4.1 LOCATIES VAN DE MECHANISCHE STEEKBORINGEN 45
TABEL 4.2 RESULTATEN VAN DE WATERDOORLATENDHEIDSMETINGEN 50
TABEL 4.3 EROSIE EN DEPOSITIE IN HOGEBEINTUM 54
TABEL 4.4 EROSIE EN DEPOSITIE IN BERLIKUM. 57

1. Inleiding

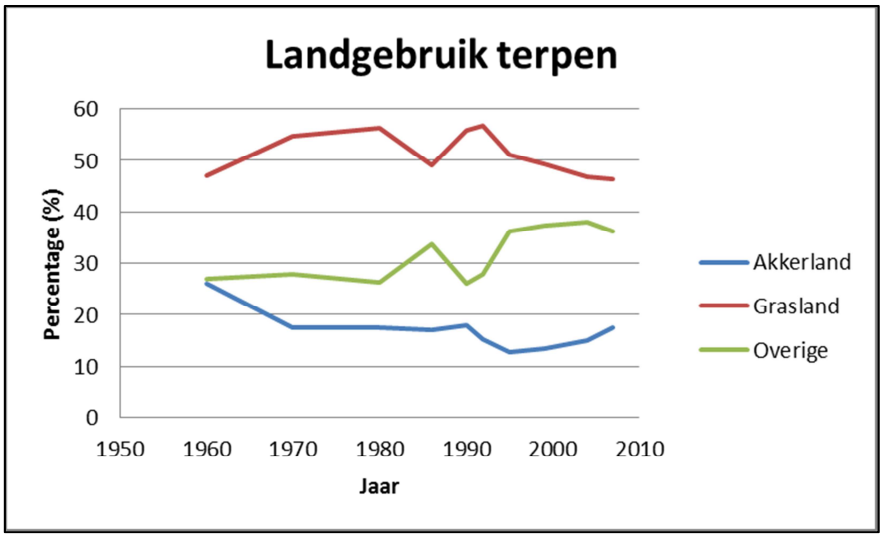
1.1 Ontstaan van terpen in Friesland.

De eerste tijdelijke bewoning in het kustgebied van Friesland en Groningen ontstond rond 700 v. Chr. toen, als gevolg van een minder sterke zeespiegelstijging, enkele hoger gelegen kwelderwallen niet meer dagelijks overstroomd werden door het getij (Bazelmans et al., 2009). De eerste permanente bewoning ontstond rond 300 v.Chr. (Vos & Lange, 2010) toen op deze kwelderwallen verhogingen gemaakt werden van plaggen, daarbovenop ontstond de eerste bebouwing. In perioden met een stijgende zeespiegel werden de terpen opgehoogd met huishoudelijk afval, mest en plaggen. Daarnaast werd er materiaal afgezet tijdens overstromingen. Dit leidde ertoe dat de terpen gestratificeerde bodemlagen kennen met daarin archeologisch waardevol materiaal (Bazelmans et al., 2009). Aan het ontstaan van terpen kwam een einde toen rond 1100 na Chr. de eerste dijken opgeworpen werden die het achterland permanent beschermden tegen overstromingen. Door hun ontstaansgeschiedenis bestaan de terpen voor een groot gedeelte uit organisch en mineraal materiaal. Deze zogenaamde terpaarde werd gebruikt als bodemverbeteraar bij het in cultuur brengen van arme zandgronden. Daartoe werden vanaf de 19e eeuw stukken terp afgegraven en de terpaarde werd verkocht en afgevoerd. Tijdens de opgravingen werden de nodige archeologische vondsten gedaan hetgeen ertoe leidde dat er belangstelling ontstond voor de terpen en hun ontstaansgeschiedenis. In 1943 werd gepoogd het afgraven aan banden te leggen en in 1961 kwam er een monumentenwet die het mogelijk maakte de terpen wettelijk te beschermen (Elzinga, 1988).

1.2 Probleemstelling

In Friesland liggen ongeveer 600 terpen waarvan er 160 aangewezen zijn als rijksmonument. Ondanks deze bescherming vindt er nog steeds aantasting plaats van archeologische resten. Het terpenproject Fryslân zoekt naar nieuwe oplossingen om de terpen zo goed mogelijk te beheren zodat de resten zo goed mogelijk geconserveerd blijven (Cultureel Erfgoed, 2011). Een van de oplossingen die overwogen wordt is om percelen met akkerland om te zetten naar grasland. Percelen die in gebruik zijn als akkerland worden regelmatig geploegd waarbij resten beschadigd raken en de aanwezige bodemstratificatie verdwijnt doordat deze gehomogeniseerd wordt. Een ander gevolg van ploegen is ploegerosie waarbij bodem erodeert van hoger gelegen gedeelten. Dit zorgt ervoor dat bij iedere ploeggang dieper in de onaangetaste lagen geploegd wordt (zie paragraaf 2.4). Een voor de hand liggende oplossing om deze degradatie tegen te gaan is om het landgebruik te veranderen in grasland (Langen & Nierstrasz, 1999). Echter, onder grasland vindt meer bioturbatie (menging en verplaatsing van bodemmateriaal door bodemfauna, zie Hoofdstuk 2) plaats dan onder akkerland.

In Friesland is ongeveer 17% van het terpoppervlak in gebruik als akkerland en 46% is grasland (Figuur 1.1). Het totale terpoppervlak bedraagt volgens de Friese Archeologische Monumentenkaart Extra (FAMKE) ongeveer 950 ha.



Figuur 1.1 *De verdeling van landgebruik op terpen in Friesland gebaseerd op de landgebruikskaarten Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland 1 t/m 6 en Historisch Grondgebruik Nederland van 1960, 1970, 1980 en 1990. De categorie 'Overige' bestaat voornamelijk uit bebouwing.*

1.3 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag: Wat zijn de gevolgen van permanent akker- of grasland voor gestratificeerde bodemlagen in terpen?

Deelvragen:

- Hoe verloopt het porieoppervlak door het bodemprofiel van een akkerland of grasland?
- Hoe verloopt de homogenisatie door het bodemprofiel van een akkerland of grasland?
- Wat zijn de effecten van ploegen op het hoogteprofiel bij een akkerland of grasland?

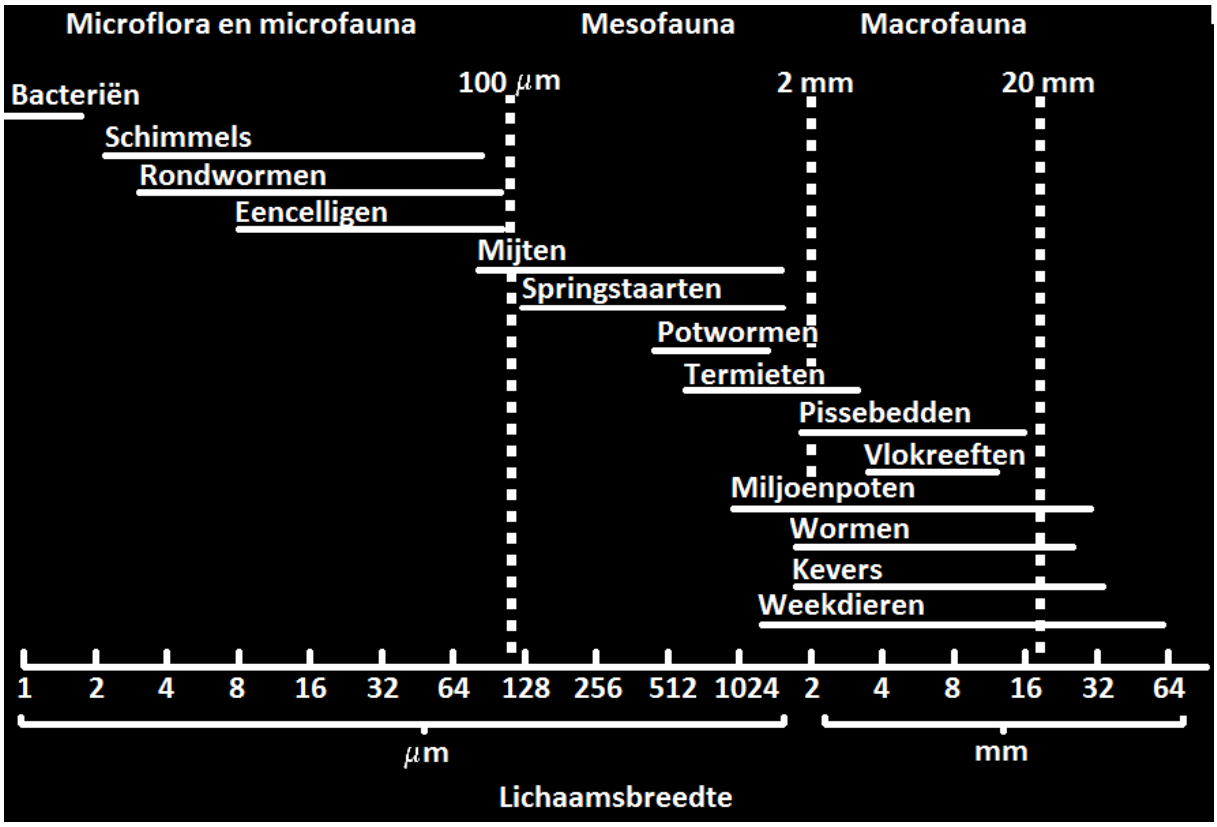
De eerste twee deelvragen hebben betrekking op het bepalen van de mate waarin een bodem gehomogeniseerd wordt door het huidige landgebruik. Het porieoppervlak (oppervlakte poriën/ totale oppervlak) geeft informatie over de intensiteit van het bodemleven. Niet alle poriën zijn ontstaan door het huidige landgebruik, ze kunnen ook zijn gevormd tijdens het ontstaan van de bodemlaag of in een tijd met ander landgebruik. Daarom wordt in de tweede deelvraag gekeken naar de verspreiding van antropogeen lood door het profiel om te zien tot welke diepte verstoring plaatsvindt. De chemische analyse maakt de porieoppervlakmetingen niet overbodig, de eerste deelvraag kan antwoord geven over de manier waarop de bodem is gehomogeniseerd. Deze twee deelvragen staan dan ook niet op zichzelf maar geven samen een indicatie tot welke diepte gehomogeniseerd wordt en welke processen hiervoor verantwoordelijk zijn. De derde deelvraag geeft inzicht in de gevolgen van bodemerosie door ploegen. Van ploegerosie was wel bekend wat de effecten zijn maar niet hoe groot de gevolgen van dit proces op de langere termijn zijn en tot welke diepte verstoring plaatsvindt. Daarom werd met behulp van het LAPSUS landschapsevolutiemodel gekeken wat de effecten zijn van ploegen op het hoogteprofiel.
Onder grasland vallen zowel intensief als extensief beheerd grasland maar niet het gras in bebouwd gebied (gazons, bermen) omdat dit gras meestal met enige regelmaat verstoord wordt. Onder akkerland vallen alle soorten landgebruik waarbij de bodem met enige regelmaat geploegd wordt. Aangezien dit onderzoek onderdeel is van het Terpenproject Fryslân beperkt dit onderzoek zich tot terpen in Friesland.

2. Achtergrond

2.1 Bioporiën

Bioporiën in bodem bestaan uit ‘gangen’ en ‘kamers’ die worden gevormd door het verwijderen van bodemmateriaal, door materiaal weg te drukken of een combinatie van beide. Dit kan gebeuren door planten maar ook door bodemfauna. Niet alle fauna zijn in staat om hun eigen gangen te maken, de kleinere soorten gebruiken bestaande poriën en vergroten ze (Kooistra & Pulleman, 2010). Ditzelfde geldt voor planten: bepaalde soorten kunnen zelf nieuwe poriën maken terwijl kleine eenjarige planten bestaande poriën gebruiken voor hun wortels. Door de jaren heen raken de wortelgangen dan ook gevuld met een combinatie van dode wortelresten, nieuwe wortels en materiaal dat door bodemfauna is verplaatst (Oades, 1993). Onderzoek in Zuidwest-Duitsland met keramische plaatjes liet zien dat er nauwelijks verplaatsing is in horizontale richting maar dat er in verticale richting jaarlijks 2 mm verplaatsing is (Boels & Zweers, 2001). Deze verplaatsing van bodemmateriaal zorgt ervoor dat bestaande bodemstructuur verandert door homogenisatie (Figuur 2.1). Aanwezige kleine archeologische resten zoals visbotjes, houtskool en zaden worden van hun oorspronkelijke plek verplaatst waardoor ze geen informatie meer kunnen leveren over het ontstaan van die laag. Karakteristieke kenmerken van een bodemlaag kunnen verdwijnen waardoor de lagen moeilijker te herkennen zijn. De poriën zorgen tevens voor een open structuur waardoor er meer gaswisseling plaatsvindt en organische stoffen (hout, textiel) sneller kunnen oxideren. Water met daarin opgeloste zuurstof kan sneller infiltreren en versterkt de in- en uitspoeling van materialen.

Figuur 2.1 *Verplaatsing van bodemmateriaal door wormen (M. Pulleman).*



Figuur 2.2 *Hoofdgroepen ongewervelde bodemorganismen volgens lichaamsbreedte (Swift et al., 1979).*

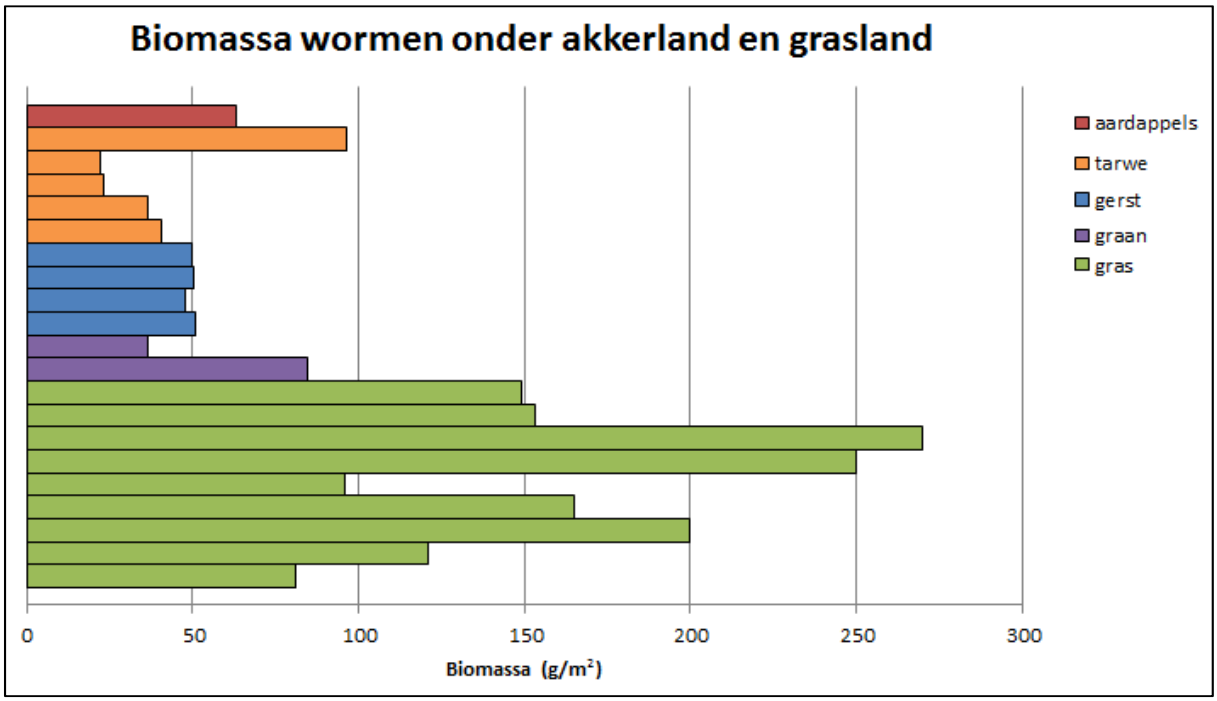
2.2 Bodemverplaatsing door bodemfauna

Naast allerlei gewervelden zoals konijnen, muizen, mollen etc. zijn er maar een paar ongewervelden die bodemeigenschappen kunnen beïnvloeden, dit zijn potwormen, regenwormen, vliesvleugeligen (Curry, 1989). Volgens Swift et al. (1979) is de breedte van het organisme belangrijker voor impact op de bodemstructuur dan de lengte. Figuur 2.2 classificeert ongewervelde bodemorganismen op basis van hun lichaamsbreedte. Bouché (1981) stelt dat wormen met een biomassa van 100 g/m^2 ongeveer 2 kg/m^2 per jaar kunnen verplaatsen. Gabet et al. (2003) concluderen na literatuuronderzoek dat wormen zijn in staat om tussen 0,00054 en 0,01 m^3/m^2/jaar te verplaatsen, het meeste van alle door hun bestudeerde bodemfauna. Mieren kunnen tot 0,0018 m^3/m^2/jaar verplaatsen. Volgens Scheffer et al. (1989) kunnen wormen in grasland 0,5 tot 12 kg/m^2/jaar verplaatsen. In een voetnoot staat dat dit geen fluxen zijn omdat er geen materiaal uit het systeem verdwijnt.

Sommige wormsoorten zoals de *Lumbricus terrestris* kunnen tot een diepte van 3 meter voorkomen (Müller-Lemans & Dorp, 1996) maar maken over het algemeen niet veel gangen. Andere soorten zoals *Allolobophora caliginosa* maken veel meer gangen maar gaan niet veel dieper dan een paar decimeters. Daarnaast zijn er andere soorten die een tussenpositie hebben. In perioden met een ruim voedselaanbod op het maaiveld graven wormen zoals de *Lumbricus terrestris* nauwelijks gangen. Maar zodra dat schaars wordt gaan ze organische stof in de bodem consumeren en graven weer gangen (Boels & Zweers, 2001).

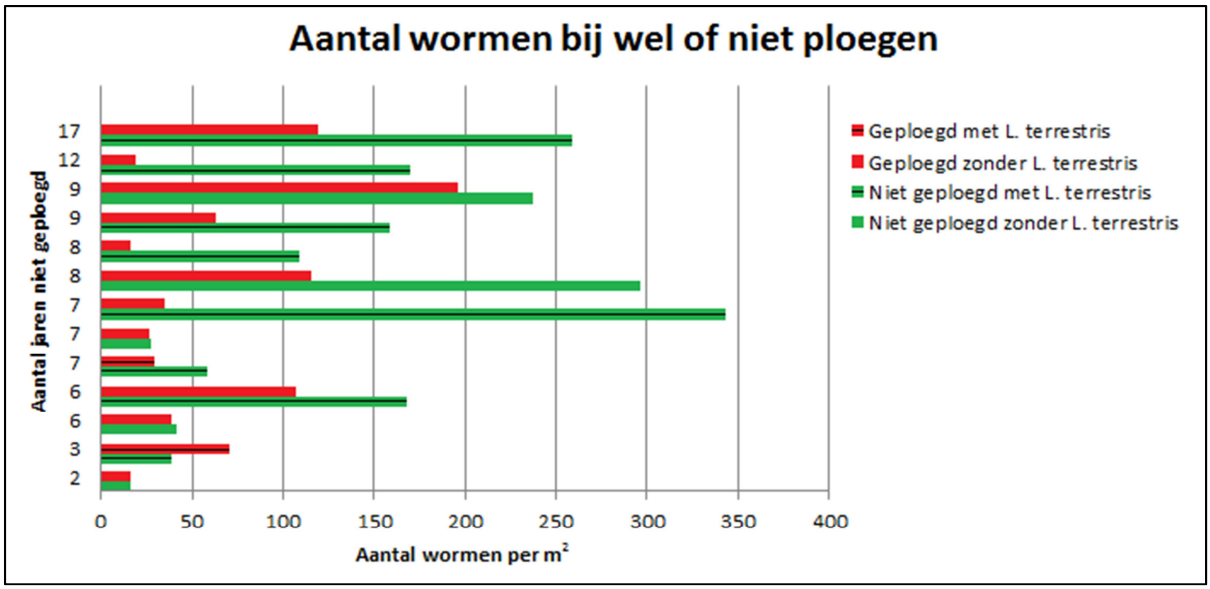
2.3 Aantal wormen onder akkerbouw en grasland

Mechanische bewerking van het land verstoort de aanwezige bodemfauna, dit is duidelijk te zien in Figuur 2.3. De biomassa van het aantal wormen onder akkerland is 1/3 van de biomassa onder grasland. Uit Figuur 2.4 blijkt dat het aantal wormen onder akkerland de helft is van het aantal wormen onder grasland.



Figuur 2.3 *De biomassa van de wormen onder akkerland en grasland. De waarden zijn afkomstig uit onderzoeken in Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, Duitsland, Nederland en Zwitserland (Müller-Lemans & Dorp, 1996).*

Bij ploegen wordt de bodemstructuur verstoord en verdwijnen de aanwezige gangen en kamers, daar staat tegenover dat er ook nieuwe poriën worden gevormd. Op velden waar niet geploegd wordt blijven gewasresten langer beschikbaar als voedselbron dan als ze door ploegen in de bodem terecht komen. Een laag met gewasresten of gras beschermt de bodem tegen uitdroging en bevriezing. De laag zorgt er ook voor dat de bodem minder snel opwarmt en afkoelt. Hierdoor kunnen wormen langer actief zijn in de bodem en kunnen zo meer materiaal consumeren en zich vaker voortplanten. Soorten die diep in de grond voorkomen voeden zich vooral met voedselrijke bodem van het oppervlak en zijn daardoor extra gevoelig voor ploegen *(Kladivko, 2001)*, zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4 *Het aantal wormen per vierkante meter op 14 testvelden in Indiana en Illinois (VS). De testvelden werden voor de helft geploegd volgens gangbare methoden, de andere helft werd niet geploegd. De y-as geeft weer hoe lang de graslanden niet geploegd zijn, de akkerlanden werden jaarlijks geploegd. De zwarte lijn geeft weer of de Lumbricus terrestris voorkomt in de percelen (Kladivko, 2001).*

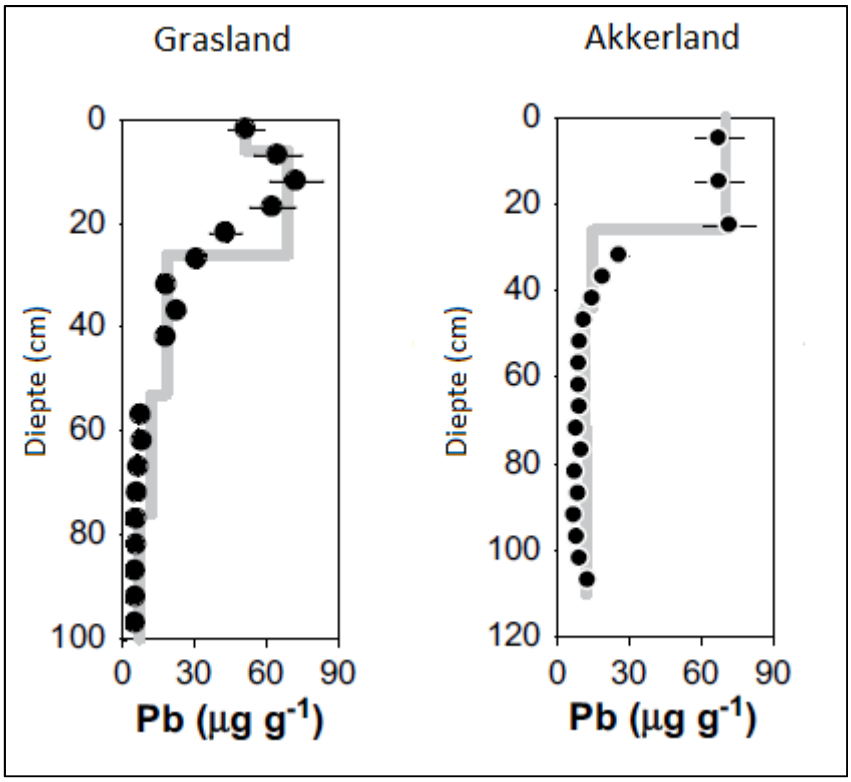
2.4 Ploegerosie

Bij mechanische verstoring van de bodemstructuur als gevolg van ploegen, cultiveren etc. wordt de bodemstructuur beschadigd maar dit gebeurt tot een bepaalde diepte, meestal tussen de 20 en 30 cm beneden maaiveld. Onder de ploegvoor kan een zogenaamde ploegzool ontstaan, dit is een verdichte bodemlaag die ontstaat door langdurig ploegen op dezelfde diepte. Bij grondbewerking in gebieden met hoogteverschillen, zoals bij terpen, kan ploegerosie plaatsvinden. Ploegerosie is het verplaatsen van bodem van de bovenkant van een helling naar beneden doordat het materiaal dat wordt opgetild door de ploeg door de zwaartekracht op een lagere positie wordt teruggelegd. Het effect van een enkele ploeggang is gering maar de effecten op de langere termijn kunnen groot zijn. Doordat het maaiveld daalt worden bij iedere ploegbeurt nieuwe, lager gelegen en dus oudere, lagen aangetast.

De hoeveelheid bodem die verplaatst wordt is afhankelijk van de gradiënt van de helling, ploegdiepte en de snelheid waarmee geploegd wordt. De grootte van dit effect is afhankelijk van de richting waarin geploegd wordt. Bij gronden met een soortelijk gewicht van 1300-1500 kg/m^3 wordt bij ploegen parallel aan de contouren 180 kg/m en bij ploegen dwars op contouren 260 kg/m verplaatst (Muysen et al., 2002). Meer over dit onderwerp is te vinden in paragraaf 3.6.

2.5 Loodverontreiniging

Naast lood dat van nature aanwezig is in het moedermateriaal is er ook depositie van lood uit de atmosfeer afkomstig van loodhoudende brandstoffen en uitstoot door industrie. Met name deze depositie heeft ertoe geleid dat de bovenste bodemlagen aanzienlijke concentraties lood kunnen bevatten (Huisman et al, 1997; De Vleeschouwer et al., 2007; Fernandez et al., 2008). In Figuur 2.5 is de verspreiding van lood door het bodemprofiel onder een akkerland en een grasland weergegeven.



Figuur 2.5 *Verdeling van lood door de bodem onder permanent grasland en akkerland in Noord-Frankrijk. De zwarte punten zijn puntmetingen, de grijze lijn is het gemiddelde per bodemhorizont op basis van bulkmonsters (Fernandez et al., 2008).*

Vanwege de atmosferische herkomst zal het lood dat wordt aangetroffen in de bodem afkomstig zijn van de bovenste bodemlaag en door verplaatsing door ploegen of bodemfauna op de huidige positie terecht zijn gekomen. Daardoor kan het patroon waarin het lood verspreidt is informatie geven over de mate van gehomogeniseerdheid van een bodemlaag.

3. Materiaal en Methoden

3.1 GIS-analyse

Om de verschillen tussen akkerland en grasland zo goed mogelijk te kunnen vergeleken zijn locaties nodig die zo lang mogelijk grasland of akkerland zijn. Daarnaast moet het akkerland en grasland op dezelfde terp liggen om verschillen in ondergrond uit te sluiten. Daartoe worden terpen gekozen waar momenteel grasland of akkerland is. Vervolgens worden op oudere kaarten locaties gekozen die géén akkerland respectievelijk grasland zijn. Deze kaart wordt vervolgens 'afgetrokken' van de huidige kaart. Het resultaat is een kaart met daarop terpen die tegenwoordig en in het verleden altijd grasland respectievelijk akkerland waren.

3.1.1 Gebruikte kaarten

Zoals vermeld in paragraaf 1.3 beperkt het onderzoeksgebied zich tot de provincie Friesland. Als eerste werd een zogenaamde clipbox gemaakt voor de provincie Friesland. Deze clipbox is te vergelijken met een uitsteekvorm; uit kaartlagen op nationaal niveau kan de provincie Friesland worden gehaald. Dit is gedaan om de hoeveelheid data zo klein mogelijk te houden.

Met behulp van de clipbox werden de benodigde brondata geclipt. De brondata zijn:

- Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN)
- Historisch Grondgebruik Nederland (HGN)
- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Friese Archeologisch Monumentenkaart Extra (FAMKE)
- Archeologische Monumentenkaart (AMK)

Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN)

Sinds 1986 wordt met een frequentie van eens per 3-5 jaar een Landelijk Grondgebruiksbestand voor Nederland gemaakt. Het is een landsdekkend bestand gebaseerd op een combinatie van geodata waarbij satellietgegevens een belangrijke informatiebron zijn (Alterra, 2012). De kaarten hebben een grid van 25 *25 meter en verschillen onderling in nauwkeurigheid en aantal landgebruiksklassen (Tabel 3.1). De nauwkeurigheid is bepaald door de berekende landgebruikskaart steekproefsgewijs te valideren met de situatie in het veld. De nauwkeurigheid verschilt per provincie.

Tabel 3.1 Verschillen tussen de gebruikte LGN-bestanden.

	Opnamejaar Friesland	Aantal landgebruiksklassen	Nauwkeurigheid Friesland	Nauwkeurigheid landbouwgewassen	Referentie
LGN-1	1986	17 landgebruiksklassen	67%*	-	Thunissen & Noordman, 1996
LGN-2	1992	25 + 20 agrarische mengklassen	70-80%*	-	Noordman et al., 1997
LGN-3	1995	25 +14 natuurklassen	85%*	-	Wit et al., 1999
LGN-4	1999	25 +14 natuurklassen	90%	90%	-

LGN-5	2004	25 +14 natuurklassen	80%	80%	Hazeu, 2005
LGN-6	2007	45 landgebruiksklassen	90%	85%	Hazeu et al., 2010

* Deze waarde geld voor heel Nederland, er is geen specifieke waarde voor Friesland bekend.

De data zijn beschikbaar gesteld door Alterra.

Historisch Grondgebruik Nederland (HGN)

HGN-1960, ’70, ’80, ’90: deze rasterbestanden met gridcellen van 25*25m zijn gebaseerd op de topografische kaarten 1:25.000 van 1961, 1970, 1982, 1992 (Kramer & Dorland, 2009). De data zijn beschikbaar gesteld door Alterra.

Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)

Het Actueel Hoogtebestand Nederland is een bestand met daarin voor heel Nederland de hoogte ten opzichte van NAP(Heerd et al., 2000). De gebruikte kaart heeft een grid van 5*5m. De AHN-kaart is eigendom van Het Waterschapshuis en is beschikbaar gesteld door Alterra.

Friese Archeologische Monumentenkaart Extra (FAMKE) / Bodemkaart 1:50.000

Onderdeel van de FAMKE is het bestand Aardkunde-Terpen. Dit is een kaart van de provincie Friesland met daarop de terpen in Friesland. Uit nader onderzoek bleek dat deze kaart gebaseerd is op de bodemkaart 1:50.000 van Nederland. FAMKE wordt steeds aangepast aan de hand van nieuwe inzichten op basis van nieuwe ontdekkingen en verdiepingsslagen (FAMKE, 2012). De terpen op FAMKE komen grotendeels overeen met de subcategorie ‘oude bewoningsplaatsen’ op de bodemkaart. De digitale bodemkaart van Nederland bestaat uit een vectorbestand met 19 hoofdklassen en 300 subklassen (Vries et al, 2003). De bodemkaart 1:50.000 is uit 1981 (Stichting voor Bodemkartering, 1981) maar er is al in 1968 een detailkarting gepubliceerd voor de ruilverkaveling Ferwerderadeel (Holst, 1968). Waarschijnlijk heeft men voor de bodemkaart 1:50.000 dan ook deze detailkarteringen gebruikt, er zijn geen grote verschillen te vinden tussen de beide bodemkaarten. De FAMKE kan worden gedownload van de website van de provincie Friesland.

Archeologische Monumentenkaart (AMK)

De Archeologische Monumentenkaart is gebaseerd op het Archeologisch Informatie Systeem (ARCHIS) en de provinciale monumentenkaarten. ARCHIS is een database met daarin gegevens van archeologische vondsten en vindplaatsen maar ook van systematische veldkarteringen door in archeologie gespecialiseerde bedrijven. De AMK is gebaseerd op de provinciale bodemkaarten met een beredeneerde selectie uit een veel groter archeologisch potentieel (Sloos, 2009). De gebruikte AMK kaartbestanden zijn ‘Monumenten’ en de AMK ‘Catalogus’. De Monumenten-kaart is een vector bestand met daarop alle monumenten in Nederland. Ieder monument heeft een eigen nummer “monumentnr” en de mate waarin het beschermd is. In de Catalogus staan de monumentnummers, het type complex en de begin- en eindtijd waarin het complex ontstaan is. De AMK kan worden gedownload van de website van het RCE.

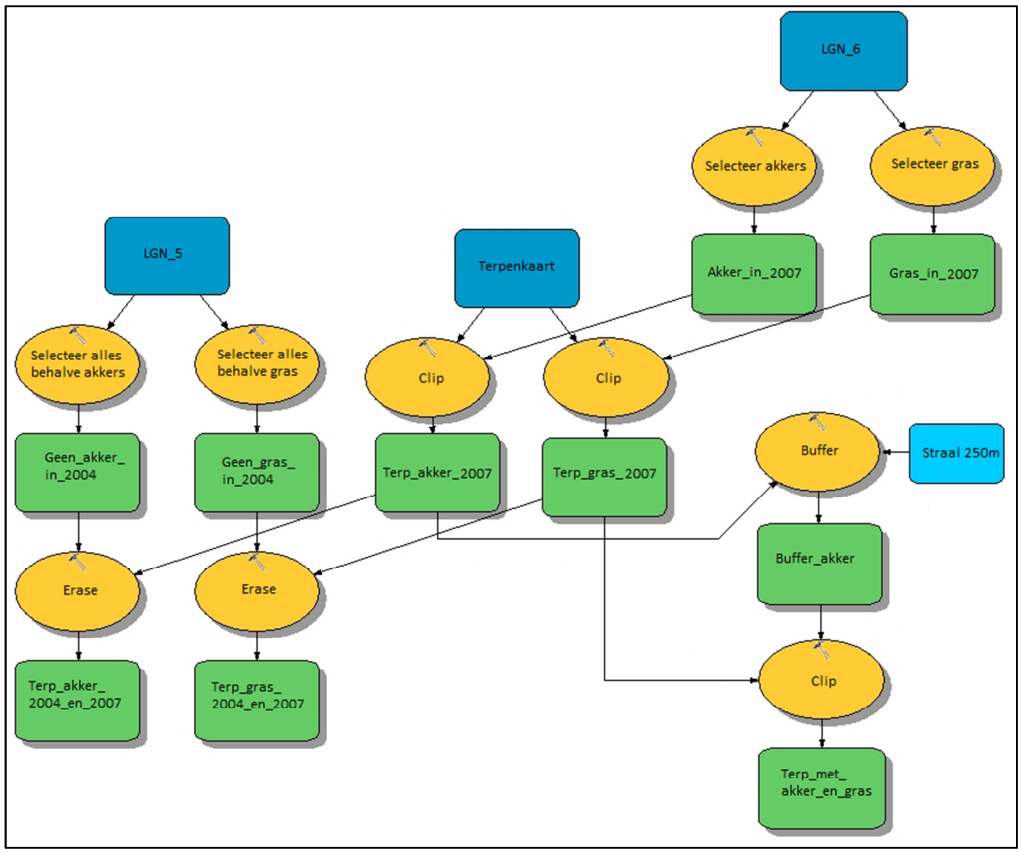
3.1.2 Geoprocessing

Terpenkaart

Om een kaart te maken met daarop de geschikte terpen zijn in de Catalogus van de AMK de monumentnummers met objectnaam 'Terp/Wierde' geselecteerd. Deze monumentnummers zijn gecombineerd (join) met het kaartbestand Monument. Het eindresultaat is een vectorkaart met daarop de terpen in Nederland op basis van de AMK. Deze kaart wordt gecombineerd met FAMKE tot een nieuwe terpenkaart met daarop alleen objecten die volgens AMK én FAMKE terp zijn. Gebieden die in het kaartbestand Monument de waarde 'Terrein van zeer hoge archeologische waarde, beschermd' hebben zijn niet meegenomen in de berekening omdat voor deze gebieden een vergunning nodig is om er veldwerk te mogen doen, gelet op de duur van dit onderzoek was het niet mogelijk om de vergunningsaanvraag af te wachten. Het gebruikte model is te vinden in Bijlage 1.

Gebieden met permanent gras of akkerland

In Figuur 3.1 is een detail van het belangrijkste ArcGIS-model weergegeven. Allereerst worden van alle rasterkaarten vectorkaarten gemaakt. Als uitgangsbasis wordt de meest recente kaart voor landgebruik, LGN-6, genomen. Van deze kaart zijn twee selecties gemaakt: gebieden met gras en gebieden met akkerland waarbij mechanische grondbewerking plaatsvindt. De beide LGN-6 selecties zijn geclipt met de terpenkaart waardoor alleen akkerland en grasland overbleef dat op terpen ligt. Deze twee ontstane kaarten zijn de uitgangssituaties voor de verdere GIS-bewerkingen. Vervolgens worden van de op één na nieuwste kaart (LGN-5) twee selecties gemaakt: gebieden die géén grasland zijn en gebieden die géén akkerland zijn. Van de uitgangskaart met gras worden de

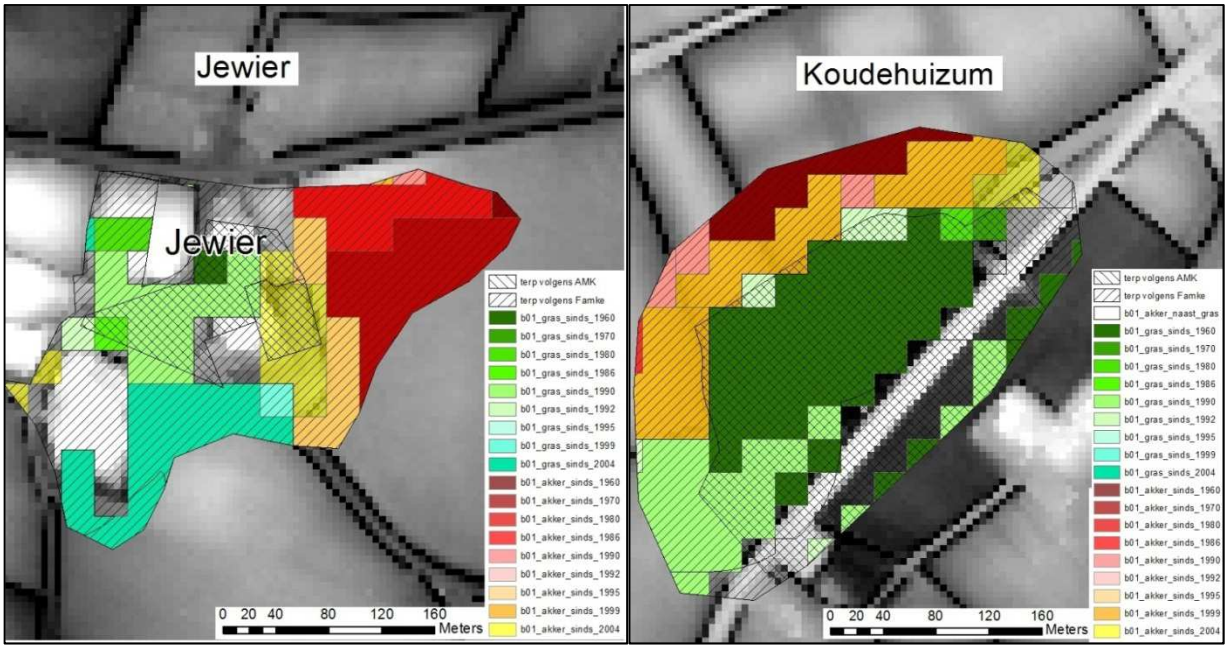


Figuur 3.1 *Detail van het ArcGIS model met daarin de belangrijkste stappen. Het volledige model is te vinden in Bijlage 1.*

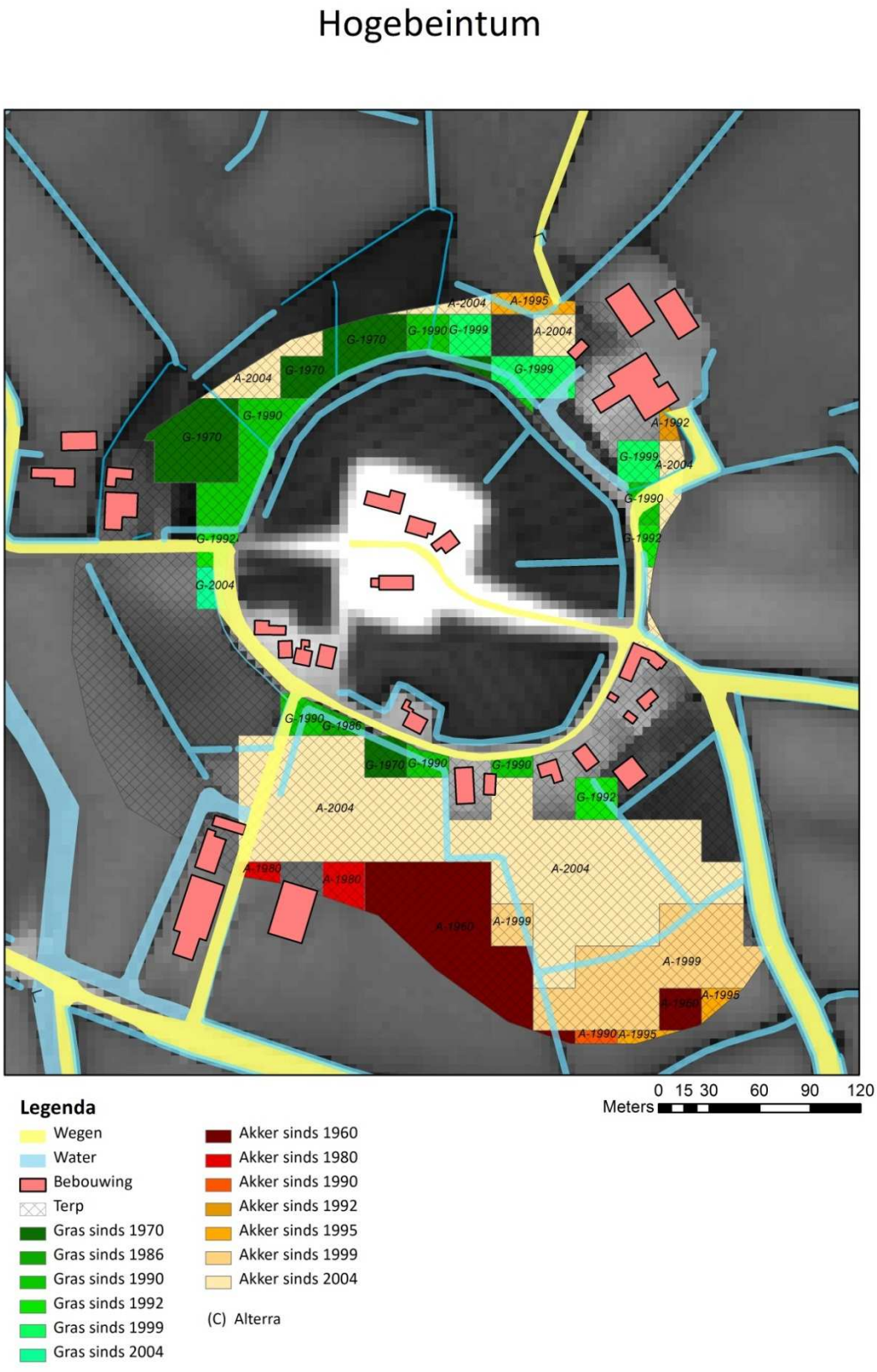
gebieden die geen grasland zijn afgetrokken (Erase) zodat een kaart overblijft met gebieden die in 2004 én 2007 gras waren, ditzelfde gebeurt voor akkerland. Vervolgens herhaalt dit principe zich met alle beschikbare landgebruikskaarten. Door dit chronologisch te doen wordt het mogelijk om naast percelen die al sinds 1960 akker of grasland zijn percelen te vinden die bijvoorbeeld sinds 1980 gras zijn. Het eindresultaat van alle bewerkingen zijn verschillende kaarten met gebieden die sinds 1960, 1970, 1980 et cetera hetzelfde landgebruik hebben. Er bestaat ook een landgebruikskaart uit 1900 maar deze is niet meegenomen in de berekening omdat deze een grid heeft van 50*50 meter. Dit blijkt iets te grof te zijn vergeleken met de gemiddelde perceelsgrootte op een terp.

Vervolgens is een module gebouwd om terpen te vinden met zowel akkerland als grasland. Rond de percelen met akkers -er zijn op terpen minder akkers dan grasland- is een buffer gemaakt met een straal van 250 m, vervolgens wordt gekeken welke graslanden binnen deze buffer vallen. Het volledige ArcGIS model is te vinden in Bijlage 1.

Bovenstaande GIS-analyse levert slechts één overtuigende locatie op: de terp van Hogebeintum (Figuur 3.3). De overige terpen hebben akkerland of grasland dat vrij recent is of zijn geselecteerd door onnauwkeurigheden door het gebruik van rasterbestanden. Ook blijkt dat er een verschil kan zitten tussen de AMK en FAMKE. In Figuur 3.2 zijn twee voorbeelden gegeven van terpen die niet geschikt waren.



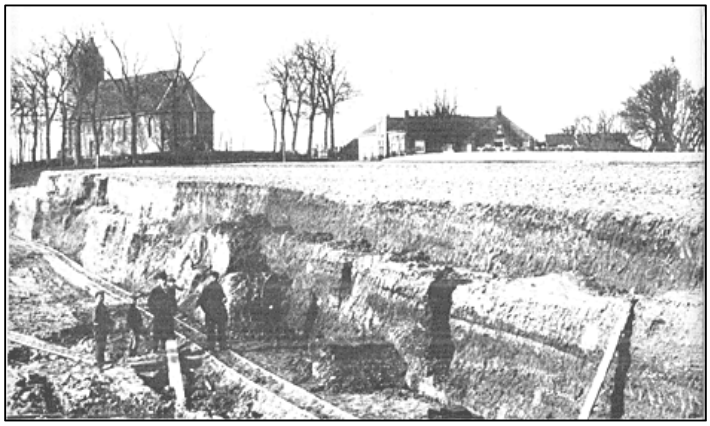
Figuur 3.2 *De terpen van Jewier en Koudehuizum. Bij deze terpen ligt het akkerland buiten het gebied dat zowel volgens de AMK als FAMKE terp is en daarom vielen deze af. In Koudehuizum is bij het akkerland te zien dat binnen één perceel 4 verschillende tijdstippen kunnen zijn waarop het landgebruik voor het laatst veranderd is. Bij de weg door de terp van Koudehuizum is te zien dat het gebruik van rasterbestanden zorgt voor onnauwkeurigheden.*



Figuur 3.3 *Historisch landgebruik in Hogebeintum op basis van analyse van de HGN- en LGN-kaarten. De kaart laat zien hoe lang percelen al hetzelfde landgebruik hebben. De codes zijn een verwijzing naar het landgebruik (A)kker of (G)ras met daarachter het jaartal waarin dit landgebruik voor het laatst is veranderd.*

3.2 De terp van Hogebeintum

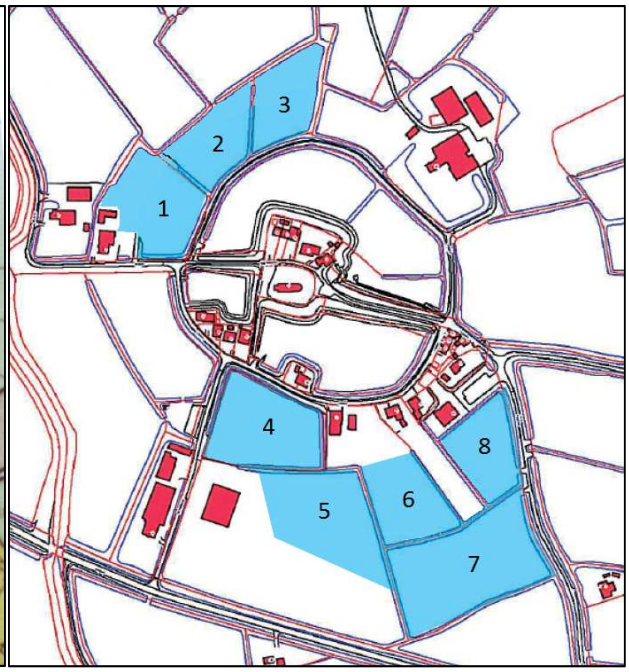
De terp van Hogebeintum ligt in de gemeente Ferwerderadeel, ongeveer 10 km ten westen van Dokkum in het Noorden van Friesland op 185838|594613 (Rijksdriehoekcoordinaten). Het hoogste gedeelte van de terp ligt op 8,80 meter boven NAP, hiermee is het de hoogste terp van Nederland. De terp is opgeworpen rond 600 v.Chr. en is tot circa 1000 na Chr. opgehoogd. Oorspronkelijk was de terp 9,5 ha. groot maar daar is door afgravingen van terpaarde nu nog 1,5 ha. van over. De terp lijkt in alle perioden bewoond te zijn geweest. De aanwezigheid van diverse kostbare importgoederen uit diverse perioden duiden op intensieve handelscontacten. Er zijn aanwijzingen dat Hogebeintum een uithof was van het klooster Foswerd ten zuiden van Ferwerd. De terp is afgegraven tussen 1870 en 1926 (Figuur 3.4). Bij deze afgravingen is onder meer een grafveld uit de Volksverhuizingstijd (300-500 na Chr.) tevoorschijn gekomen. Na de afgravingen bleven de oost-west lopend weg over de terp, het centrale middendeel en een zuidwestelijk segment bestaan. Hierop bevinden zich de kerk, het kerkhof en enige woningen. Verder bleef de rondweg bewaard en enkele daarbuiten gelegen ophogingen. Opvallend is de nog aanwezige radiaire verkaveling rondom de terp. Door de steile afgraving zijn de terprestanten erg kwetsbaar geworden. Het natuurlijke evenwicht is verstoord, waardoor de terp steeds verder afbrokkelt. In 1988 heeft een grondverzakking plaatsgevonden waarna boringen zijn gedaan waaruit werd geconcludeerd dat uitdroging en oxidatie van de mestlaag en constant hoge belasting van het talud hebben geleid tot scheurvorming. Daarnaast bleek dat de bovenste 0,3 meter van de terp ernstig verstoord zijn door ploegwerkzaamheden. In 1990 werd middels verzwaring verdere verschuiving bestreden en gezorgd voor een betere afwatering. Om de terp beter te verstevigen werd de bovengrond gemengd met cement. Er werd een monument opgericht ter herinnering aan het afgraven van de terpaarde (ARCHIS, 2011).



Figuur 3.4 *Afgraving van de terp van Hogebeintum. (Foto Fries Museum, Leeuwarden)*

Volgens de Bodemkaart 1:10.000 bestaat de terp uit Kalkrijke Terpgronden. De omliggende gebieden bestaan uit Kalkrijke Poldervaaggronden (Figuur 3.5). Percelen, waarvan op basis van het ArcGIS-model bleek dat er al lang hetzelfde landgebruik plaatsvindt, werden genummerd (Figuur 3.6). Van deze percelen werd op de ongedigitaliseerde topografische kaarten en in het kadaster van 1832 het landgebruik opgezocht. De resultaten zijn in Tabel 3.2 te vinden en de uitsneden van de topografische kaarten zijn te vinden in Bijlage 2.

Figuur 3.5 *Bodemkaart 1:10.000 Code T20A zijn kalkrijke terpgronden. De omlaag gerichte pijlen betekend dat het betreffende perceel is afgegraven (Holst, 1968).*



Figuur 3.6 *Percelen in Hogebeintum waar veldwerk werd gedaan (H. Huisman).*

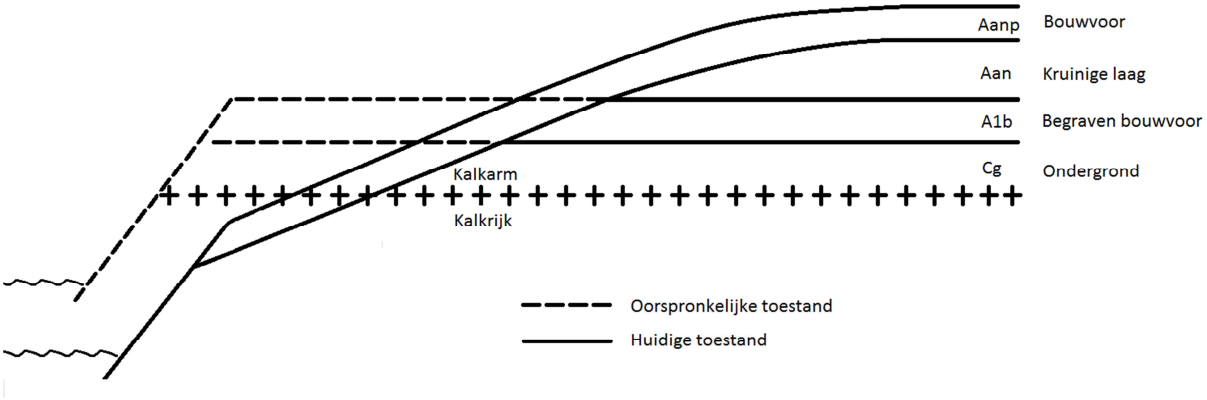
Tabel 3.2 Landgebruik van de onderzochte percelen volgens topografische kaarten.

	Kad. 1832	TMK 1854	1931	1952	1961	1970	1982	1992	2012
Perceel 1	Boomgaard/ akkerland	Boomgaard/ akkerland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland
Perceel 2	Akkerland	Akkerland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland
Perceel 3	Akkerland	Akkerland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland
Perceel 4	Boomgaard/ akkerland	Boomgaard/ akkerland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland
Perceel 5	Weiland	Weiland	Grasland	Grasland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland
Perceel 6	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Grasland	Grasland
Perceel 7	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland	Akkerland
Perceel 8	Akkerland	Akkerland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland	Grasland

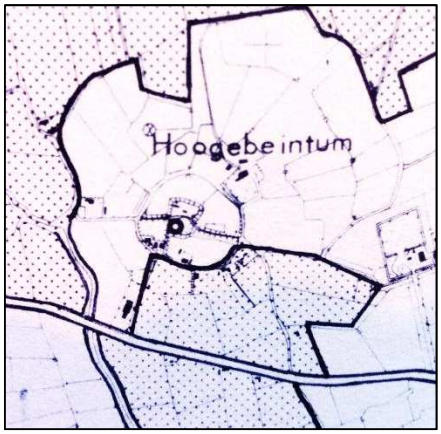
Kruinige percelen

Op de oude kwelderruggen en in de jongere gronden rondom de voormalige Lauwerszee worden bij de zavelgronden en plaatselijk bij de kleigronden sterk bolvormige percelen aangetroffen. Deze zogenaamde ‘kruinige percelen’ zijn in het midden duidelijk hoger dan aan de randen. De laagste gedeelten komen voor in de vier hoeken. In Figuur 3.7 is een dwarsdoorsnede te vinden van een kruinige akker. Het kruinig maken van de bodem werd gedaan om de ontwatering te verbeteren. Hierdoor komen binnen één perceel grote verschillen in bodemgesteldheid voor (Stichting voor Bodemkartering, 1981). Uit de homogeniteit van de kruinige laag (Aan-horizont) valt af te leiden dat

het kruinig maken een geleidelijk proces moet zijn geweest. Er wordt verondersteld dat daarbij de keerploeg het voornaamste landbouwwerktuig geweest zal zijn. Uit een berekening van het grondverzet blijkt dat op sommige sterk kruinige percelen meer grond is gebruikt voor de ophoging dan uit de verlaging van de randstroken verklaard kan worden. Dit zou verklaard kunnen worden door het gebruik van kwelderslib als bemesting, hetgeen tot ongeveer 1900 in bepaalde gebieden is toegepast (Bakker & Marsman, 1981). Figuur 3.8 laat de kruinige akkers in Hogebeintum zien. In 1971 was 80% van de akkerlanden gedraineerd maar door gebrekkige waterbeheersing lagen deze meestal niet op de optimale diepte, grasland werd slechts bij hoge uitzondering gedraineerd (Rapport voor de ruilverkaveling Ferwerderadeel, 1971). Sindsdien heeft deze ruilverkaveling inclusief de benodigde verbeteringen in ontwatering plaatsgevonden dus mag worden aangenomen dat tegenwoordig bijna alle akkerbouwpercelen gedraineerd zullen zijn.



Figuur 3.7 *Dwarsdoorsnede van een kruinig perceel (Stichting voor Bodemkartering, 1981).*



Figuur 3.8 *Kruinige percelen in Hogebeintum, de gestippelde gebieden zijn kruinig (Holst, 1968).*

3.3 Veldwerk

Voor onderzoek naar homogenisatie zijn onverstoorde bodemprofielen nodig. Deze zijn kunnen worden waargenomen in profielkuilen en in boorkernen van mechanische steekboringen. Het gebruik van een handboor is niet mogelijk omdat bij het boren verstoring van het profiel plaatsvindt. Bij een boorguts is het bemonsterde oppervlak te klein en de guts kan niet altijd gebruikt kan worden omdat deze zeer moeilijk in zandige bodems gestoken kan worden. Voor het maken van profielkuilen is een vergunning nodig omdat het graafwerkzaamheden zijn in een archeologische vindplaats. De bijbehorende procedure kon met het oog op het tijdsbestek van dit onderzoek niet worden afgewacht. Voor graafwerkzaamheden waarvan het oppervlak niet meer dan 0,1 m^2 bedraagt is geen vergunning nodig en daarom is gekozen voor mechanische steekboringen. Er was budget om 3-4 van deze mechanische steekboringen uit te laten voeren. De locaties van de mechanische steekboringen dienen representatief te zijn en daarom werd eerst een verkennend booronderzoek uitgevoerd.

3.3.1 Bemonsteringspatroon

Het hoofddoel van dit onderzoek is het vinden van verschillen in gehomogeniseerdheid tussen akkerland en grasland. Als het veldwerk gericht zou zijn op archeologisch onderzoek zou bij deze terp een stervormig (met boorraaien die haaks op de hoogtelijnen staan) bemonsteringspatroon toegepast kunnen worden omdat bij een terp de variatie in de bodem samenhangt met de afstand tot het midden van de terp. Voor het vinden van verschillen in gehomogeniseerdheid werd per perceel gezocht naar een locatie die representatief is voor het gehele perceel. Om deze locatie te kunnen bepalen is gekozen voor een kruispatroon per perceel. Er is getracht om de kruizen aan elkaar aan te laten sluiten zodat lange doorlopende boorraaien ontstaan. Bij de raaien is de afstand tussen de monsterpunten ongeveer 25 meter. In enkele gevallen is hier van afgeweken omdat anders gemonsterd zou moeten worden in of aan de rand van een sloot of op een plek die duidelijk verstoord was. De kaart met daarop de boorraaien en de boorlocaties is te vinden in Figuur 4.1.

3.3.2 Handboringen

De handboringen op de raaien zijn gedaan met een edelmangrondboor. Er werd steeds 10 cm grond geboord en de boorkern werd op een plastic zak gelegd. De handboring werd bodemkundig beschreven waarbij gekeken is naar textuur, kleur (met behulp van een Munsell-kleurenboekje) en de aanwezigheid van wortels, wormen en mogelijke poriën. De eerste handboring op een perceel werd gedaan tot 120 cm (de lengte van de grondboor) om een indruk te krijgen van de opbouw van het perceel. De volgende handboringen op het perceel zijn gedaan tot de C-horizont (onveranderd moedermateriaal) bereikt werd. Bij sommige handboringen in klei werd een boorguts gebruikt omdat dit sneller en gemakkelijker ging dan met het grondboor. Iedere handboring werd gefotografeerd en er werd een piketpaaltje geplaatst met daarop het nummer van de handboring. De locaties zijn later ingemeten met een GPS-ontvanger. In Figuur 3.9 is een afbeelding te zien van de situatie in het veld. Om meer te weten te komen over het gebruik van de percelen werd informatie ingewonnen bij de eigenaren.

Figuur 3.9 *Gebruikte materialen bij de handboringen; Edelmanboor in het boorgat, daarnaast een piketpaaltje ter markering. Op de plastic zak ernaast liggen de boorkernen, ter referentie zijn bij 50 cm en 100 cm boordiepte piketpaaltjes tussen de bodemmonsters gelegd. Het notitieboekje deed tevens dienst als fotobordje. Inzet: boorkop van de Edelmanboor.*

3.3.3 Representatieve locatie per landgebruik

De locaties voor de mechanische steekboringen zijn gekozen op basis van de handboringen waarbij vooral gelet is of de diktes van de verschillende horizonten representatief zijn voor de rest van het perceel.

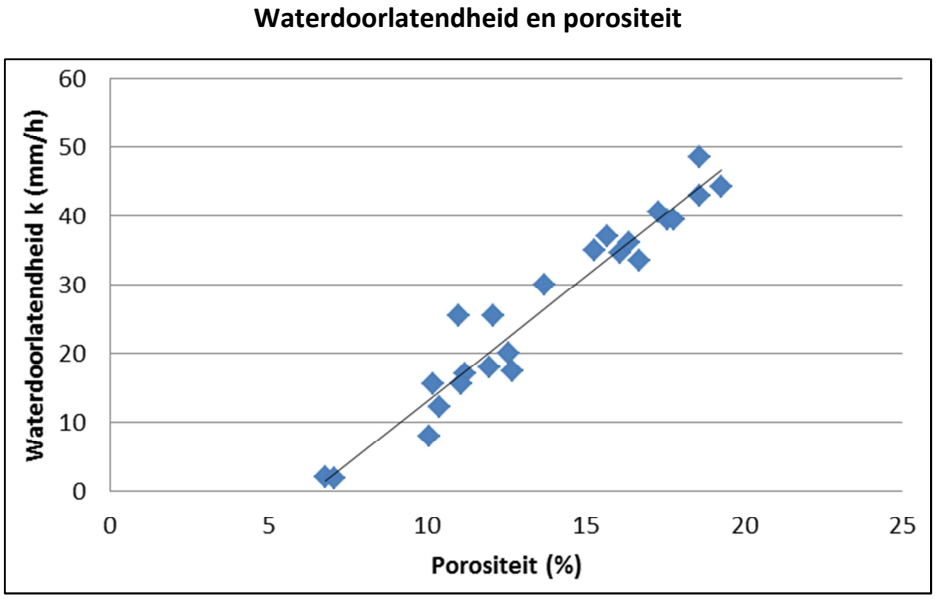
3.3.4 Mechanische steekboringen

De mechanische steekboringen zijn uitgevoerd door de firma Wiertsema & Partners uit Tolbert (Figuur 3.10). De boorrups drukte een stalen pijp met daarin een pvc-buis met een diameter van 10 cm tot ongeveer 100 cm de grond in waarna ongeveer 80 cm bruikbaar monster achterbleef. Deze stalen pijp werd vervolgens uit de bodem gehesen en de pvc-buis werd uit de stalen pijp gehaald. In het laboratorium werden de pvc-buizen aan twee kanten opengesneden. Om het geheel te kunnen transporteren zijn de ontstane helften met daartussen het bodemmonster met tape aan elkaar geplakt. Er werd een dop op de onderkant geplaatst en de bovenkant werd afgedekt met proppen plastic om te voorkomen dat de bodemkolom ging schuiven. Om uitdroging te voorkomen is het geheel verpakt in een plastic zak.

Figuur 3.10 *Het maken van mechanische steekboringen met de boorrups (H.Huisman).*

3.3.5 Bepalen van waterdoorlatendheid

Als controlemiddel voor het bepaalde porieoppervlak is de verzadigde waterdoorlatendheid gemeten. Het aantal poriën in de bodem heeft namelijk invloed op de verzadigde waterdoorlatendheid K_{sat} (mm/uur) in de bodem en kan zodoende gebruikt worden als controlemiddel voor de porieoppervlakmetingen. Uit Figuur 3.11 blijkt dat er een hoge correlatie is tussen poriën groter dan 50 μm en de verzadigde waterdoorlatendheid. De doorlatendheid kan worden uitgezet tegen het gemiddelde porieoppervlak per kern (gemiddeld omdat de doorlatendheid ook over de volledige lengte berekend is). Er kan dan voor de 4 porieoppervlak- en waterdoorlatendheidsmetingen een correlatiecoëfficiënt berekend worden. Deze coëfficiënt geeft geen oordeel over de exacte waarden van de porieoppervlakmetingen maar geeft aan of de onderlinge verhoudingen tussen de 4 porieoppervlakmetingen juist of onjuist zijn.

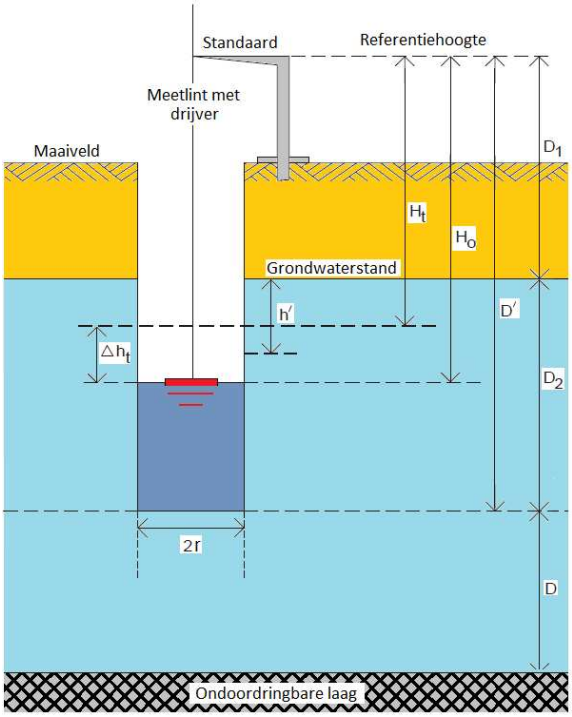


Figuur 3.11 *Samenhang tussen de waterdoorlatendheid en de porositeit van de bodem. De correlatie is 0,97 (data uit Pagliai et al., 2000).*

De vorm, grootte, oriëntatie en de continuïteit van de poriën beïnvloeden de waterdoorlatendheid. Volgens Pagliai & Kutilek (2008) bestaat er een duidelijk verband tussen langwerpige doorgaande poriën en de verzadigde waterdoorlatendheid van de bodem. Aan het oppervlak is het voorkomen van ronde poriën gecombineerd met langgerekte poriën die parallel lopen aan het bodemoppervlak een belangrijke factor voor het verklaren van een teruggang in de waterdoorlatendheid.

De waterdoorlatendheid (K_{sat}) kan met behulp van ringmonsters bepaald worden in het laboratorium maar dit kan ook in het veld gebeuren met de zogenaamde boorgatmethode zoals beschreven door Oosterbaan & Nijland (1994). Bij dit onderzoek is gekozen om de boorgatmethode toe te passen omdat deze snel en in eigen beheer kan worden uitgevoerd. Bovendien zijn alle benodigde middelen aanwezig: een boorgat blijft over na de handboring en de bodem van de ontstane gaten ligt beneden de grondwaterstand. De metingen werden gedaan op dezelfde locaties als waar de mechanische steekboringen zijn gedaan.

De methode werk als volgt: zodra het water in het boorgat zich hersteld heeft tot de oorspronkelijke grondwaterstand wordt een gedeelte ervan uit het gat gehaald. Vervolgens wordt gemeten hoe snel het grondwater weer stijgt door toestroming van grondwater. De snelheid (K_{sat})waarmee dit gebeurt is afhankelijk van de waterdoorlatendheid van de bodem. In Figuur 3.12 is de meting schematisch weergegeven en in Figuur 3.13 de meetopstelling in het veld. De waterdoorlatendheid wordt berekend met Vergelijking 3.1.



Figuur 3.12 *De boorgatmethode; meetopstelling en symbolen* (Oosterbaan & Nijland, 1994)

Figuur 3.13 *Gebruikte materialen bij de boorgatmethode. Zichtbaar is de standaard met daarop een rolmaat als meetlint. Naast het boorgat ligt een klepmonsternemer waarmee grondwater uit het boorgat gehaald wordt. Niet zichtbaar op de foto is de drijver onderaan het meetlint. Doordat deze op het grondwater drijft kan op het meetlint de stijging van de grondwaterstand af worden gelezen.*

$$K_{sat} = C(H_0 - H_t)/t \qquad (3.1)$$

Waarbij

K_{sat} = verzadigde waterdoorlatendheid van de bodem (m/dag)

C = een factor bepaald met behulp van Vergelijking 3.2 of 3.3

t = de verstreken tijd sinds het verwijderen van het water (s)

H_t = hoogte van het waterpeil in het boorgat op tijdstip t (cm)

H_0 = diepte van het waterpeil bij aanvang: t =0

De C-factor is afhankelijk van de afstand tussen een ondoordringbare laag en de onderkant van de het boorgat (D) en het gemiddelde waterpeil onder het grondwaterpeil (h')

Als D > 0,5 D_2

$$C = \frac{4000\ r/h'}{(20+\frac{D_2}{r})(2-\frac{h'}{D_2})} \qquad (3.2)$$

Als D = 0

$$C = \frac{3600\ r/h'}{(10+\frac{D_2}{r})(2-\frac{h'}{D_2})} \qquad (3.3)$$

Waarbij

D = diepte van de ondoordringbare laag onder de het bodem van het boorgat

D_2 = afstand tussen de bodem van het boorgat en het grondwaterpeil, met voorwaarde: 20 < D2 < 200 cm

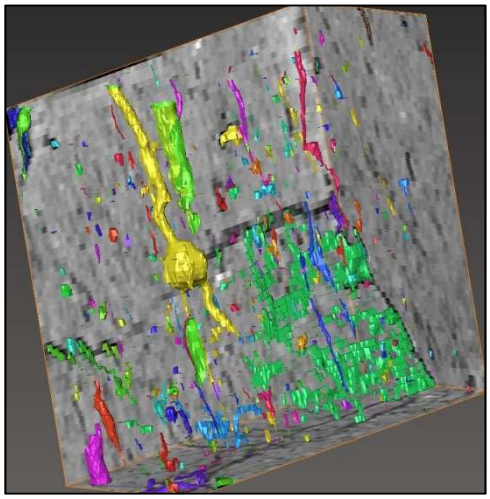
r = radius van het boorgat (cm): 3 < r < 7

h' = gemiddelde diepte van de waterstand in het boorgat onder de eigenlijke grondwaterspiegel gedurende het meetinterval, gemeten vanaf maaiveld en met voorwaarde: h' > D_2/5

3.4 Foto-analyse

3.4.1 Meettechnieken voor het porieoppervlak

Bij bodemkundig onderzoek kan fotoanalyse gebruikt worden om bodemporiën te meten; aan de hand van de grootte en verdeling over het profiel kunnen uitspraken gedaan worden over de intensiteit van het bodemleven in de bodem. Er bestaan zeer geavanceerde en nauwkeurige meetinstrumenten om objecten grafisch te analyseren, echter deze zijn kostbaar en vaak niet geschikt voor grote bodemmonsters. De algoritmes voor deze analyse kunnen gebruikt worden om foto's van bodemprofielen te analyseren, de stand van de techniek is hierbij een belangrijke factor (Wuest, 2001). In het tijdperk van de analoge fotocamera's werd een foto gemaakt, ontwikkeld en vervolgens gedigitaliseerd met behulp van een scanner. Dit alles maakte het analyseren van bodemprofielen complex en vanwege licentiekosten van de software en de benodigde dure scanner ongeschikt voor snelle en eenvoudige toepassingen. Met de komst van de digitale camera werd het digitaliseren van een foto overbodig en daarmee de techniek toegankelijker. Tegenwoordig zijn hoogwaardige digitale camera's beschikbaar voor het grote publiek en de analyse-software kan in sommige gevallen zelfs gratis worden gedownload. Voor het bepalen van het porieoppervlak is een laboratorium niet meer noodzakelijk en het kan zelfs met eigen middelen thuis worden gedaan. Digitale bodemanalyse is op het moment al een stap verder; tegenwoordig gaan onverstoorde bodemmonsters in een CT-scanner en worden 3D geanalyseerd (Figuur 3.14).



Figuur 3.14 *Voorbeeld van een 3D-analyse met behulp van beelden gemaakt met een CT-scanner. Het gele object is een wormgang met daarin een zogenaamde 'hybernating chamber'. De rode en paarse objecten zijn poriën en wormgangen. Het grote groene object rechtsonder in de afbeelding is een breukvlak in het bodemmonster.*

3.4.2 Prepareren van de boorkern

Om het aantal poriën te kunnen bepalen moet worden voorkomen dat de poriën dichtgesmeerd raken. Een gladgemaakt bodemprofiel is dus onbruikbaar. De bodemstructuur kan het best bekeken worden op een onverstoord ruw bodemprofiel. Daartoe werd een troffeltje in de zijkant van de boorkern gezet waarmee stukken van de boorkern af konden worden gebroken, dit is aan beide zijkanten gebeurd. De ontstane rug kon met de duimen gebroken en verwijderd worden. Voor het fijnere werk is een klein spateltje gebruikt. Het profiel moet enigszins vlak worden afgewerkt; enerzijds omdat het lastig is om de focus van de camera goed te krijgen bij close-up opnames van ruwe oppervlakken, anderzijds omdat de ruwe oppervlakken zorgen voor schaduw. De hoeveelheid schaduw op de foto moet zo klein mogelijk zijn om te voorkomen dat de schaduw wordt aangezien voor porie (op foto's zien poriën en schaduwen hetzelfde uit). Losse deeltjes en stukken die niet volledig afgebroken waren werden verwijderd met het spateltje of door het oppervlak met de mond

schoon te blazen. Perslucht is niet geschikt omdat dit te krachtig is en net als een kwast zorgt voor het dichtsmeren van de poriën. Bij een stofzuiger bestaat het gevaar dat deze zich op een gegeven moment vastzuigt aan het profiel en er een ring in het profiel komt te staan. Bij alle handelingen geldt dat voorkomen moet worden dat poriën dicht worden gesmeerd. Onderstaande fotoserie (Figuur 3.15) geeft een overzicht van de handelingen.

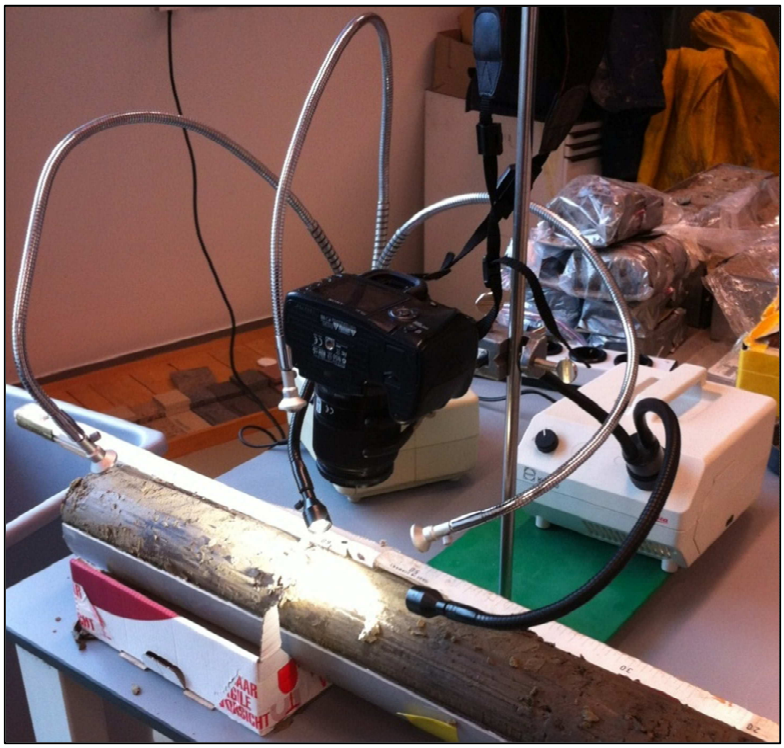
Figuur 3.15 *Het verwijderen van bodem zonder de bodemstructuur te beschadigen. Linksboven: een troffeltje wordt in de zijkant van het profiel gezet om bodem mee te verwijderen. Rechtsboven: Het omhoog wippen van bodem. Linksonder: het ruwe onbewerkte oppervlak zoals het achter blijft na het verwijderen van bodem met de troffel. Rechtsonder: met een fijn spateltje worden losse deeltjes verwijderd en wordt het profiel vlakker afgewerkt.*

Het maken van een mooi breukvlak lukt niet bij alle grondsoorten even gemakkelijk; bij hoge kleigehaltes breken slechts kleine stukken af. Door het oppervlak iets te laten drogen breken er grotere stukken af.

3.4.3 Fotograferen van de boorkern

Om het bodemprofiel digitaal te kunnen analyseren zijn goede foto's van het bodemprofiel nodig. Vanwege de benodigde hoge kwaliteit van de foto's is het gebruik van een spiegelreflexcamera noodzakelijk. De gebruikte camera is een SONY DSLR-A100, de geproduceerde afbeeldingen zijn 3872*2592 pixels, de sluitertijd is 1/200sec, het diafragmagetal (brandpuntsafstand/apertuur) is 6,3. Van het gehele profiel worden met een interval van 5 cm foto's genomen die gedeeltelijk overlappen. De positie van de camera ten opzichte van het profiel dient constant te zijn, daartoe werd de camera op een statief gezet en de boorkern onder de camera doorgeschoven. Door een meetlint mee te fotograferen kon later de pixelgrootte worden bepaald en was er een

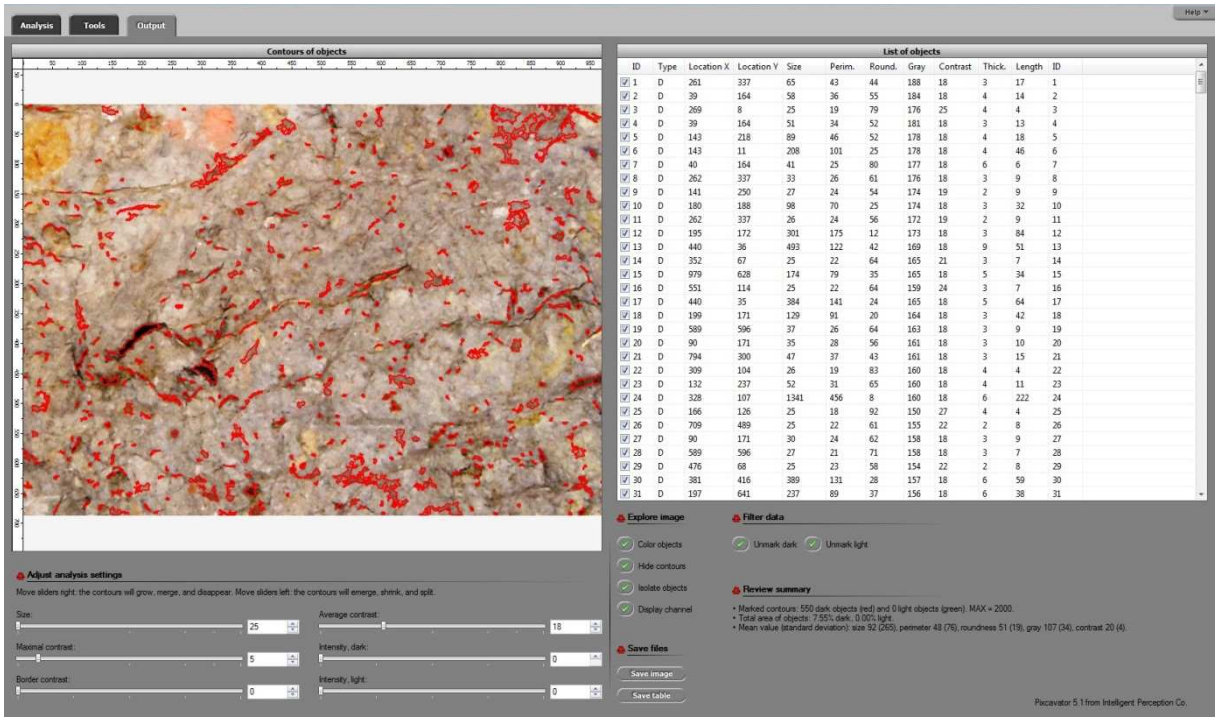
referentieobject. Een zogenaamde koudlichtbron werd gebruikt om het profiel van zoveel mogelijk kanten te belichten ter voorkoming van schaduwen. Er moet gezorgd worden dat het object gelijkmatig verlicht wordt maar het gebruikte licht mag niet te fel zijn omdat anders de zijkanten van de foto te donker worden. De foto-opstelling is te vinden in Figuur 3.16.



Figuur 3.16 *De opstelling voor de foto's voor de foto-analyse. De camera staat op een vaste positie in een statief. De koudlichtbronnen belichten het profiel van meerdere kanten zodat de belichting constant is. De boorkern ligt in een geïmproviseerde houder om te voorkomen dat het profiel kantelt. Naast de boorkern ligt de meetlat die als referentie dient. De camera en de koudlichtbronnen staan op een vaste plaats en de boorkern plus meetlat worden voor iedere foto een stukje verplaatst*.

3.4.4 Foto-analyse software

Er bestaan verschillende softwarepakketten voor het analyseren van foto's. Voor sommige pakketten moeten licenties gekocht worden, anderen zijn open source en gratis. Om te kunnen te bepalen welk softwarepakket het best gebruikt kan worden voor de foto-analyse zijn enkele programma's getest en vergeleken. Dit zijn: JMicrovision 1.2.7 (Roduit, 2012), ImageJ (Abramoff et al., 2004), Pixcavator 6.0 (Saveliev, 2011). De programma's verschillen onderling sterk in mogelijkheden en gebruiksvriendelijkheid. Pixcavator springt er wat betreft gebruiksgemak bovenuit: het programma kan met meer bestandsformaten overweg, de resultaten kunnen worden geëxporteerd naar Excel en het selecteren van objecten gebeurt aan de hand van 6 schuifknoppen waarna het programma automatisch de selectie aanpast. Bij de overige software moet na een aanpassing van de parameters de hele berekening opnieuw worden uitgevoerd. In tegenstelling tot de andere vergeleken programma's is Pixcavator niet helemaal gratis; er moet een licentie worden gekocht maar het programma is de eerste maand gratis te gebruiken en er bestaat een gratis studentenversie (weliswaar met enige beperkingen). In Figuur 3.17 is een printscreen te zien van Pixcavator 6.0.



Figuur 3.17 *Schermafbeelding van het tabblad Output in Pixcavator 6.0. Links de geanalyseerde afbeelding, de contouren zijn rood gekleurd. Daaronder de schuifregelaars en rechts de tabel met meetgegevens.*

Voor de foto-analyse moeten de afbeeldingen eerst worden bijgesneden zodat alle foto's dezelfde afmetingen hebben en de verstoorde randen van het bodemprofiel niet mee worden genomen in de berekening. De foto wordt in het tabblad 'Analysis' ingeladen, deze kan worden verkleind zodat het programma sneller kan rekenen. In het tabblad 'Tools' zitten functies waarmee de foto indien noodzakelijk bewerkt kan worden alvorens te worden geanalyseerd. Als in 'Analysis' op 'Run' wordt geklikt berekent het programma de contouren rond de pixels. In het tabblad 'Output' is een afbeelding zichtbaar van de geanalyseerde foto met daarin de contouren. Daarnaast staat een tabel met de gegevens van de contouren, deze tabel kan worden opgeslagen als Excel-bestand. De schuifregelaars hebben de volgende functies:

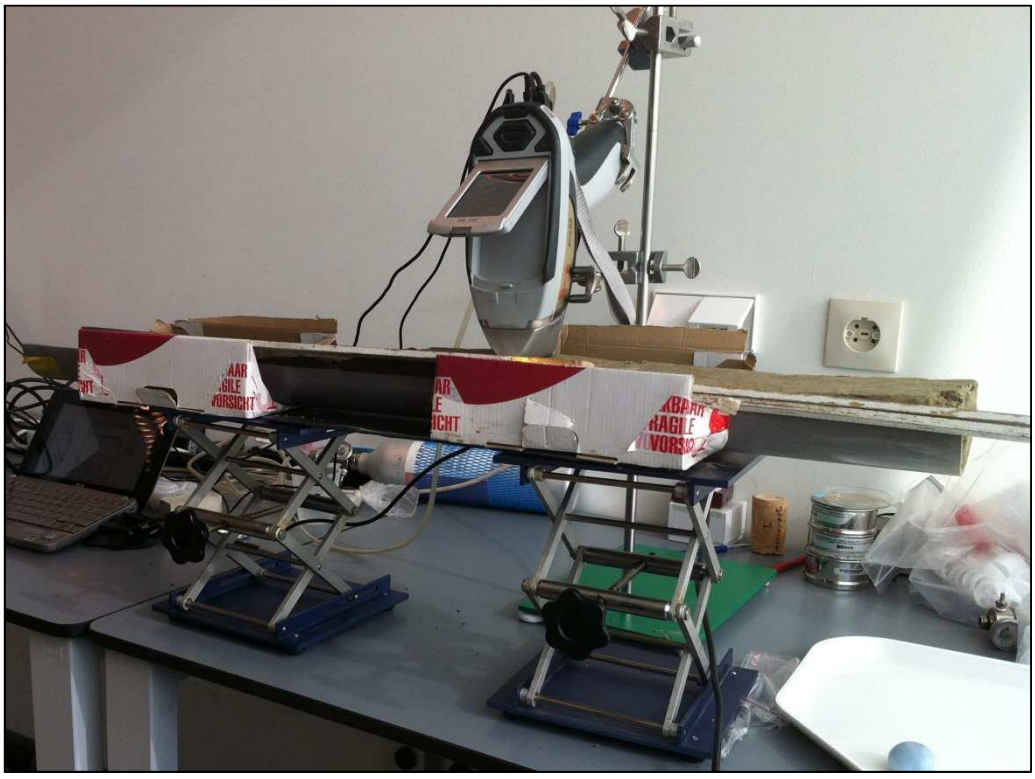
- Size — Het minimum aantal pixels binnen een contour
- Maximal contrast — Het maximale kleurverschil tussen de waarden binnen de contour en de contour zelf
- Border contrast — Het maximale kleurverschil tussen de contour en de directe omgeving
- Average contrast — Het minimale kleurverschil tussen de contour en de gehele afbeelding
- Intensity, dark — Minimale kleurniveau van de contouren voor donkere kleuren
- Intensity, light — Maximale kleurniveau van de contouren voor lichte kleuren

Door met de regelaars te schuiven kunnen de contouren worden aangepast totdat de gewenste gebieden geselecteerd zijn. Ondanks dat belichting en camerastandpunt constant zijn moet dit voor iedere afbeelding individueel gebeuren omdat door verschillen in de bodemkleur niet alle foto's hetzelfde zijn: donkere bodemlagen absorberen meer licht dan lichtere lagen waardoor de kleurbalans per foto verschillend is. Op foto's zijn de poriën zichtbaar als donkere punten, Pixcavator

werd daarom ingesteld om zwarte punten te tellen. Daartoe zijn bij het onderzoek maximal contrast, intensity dark en intensity white steeds op 0 gezet omdat deze parameters geen effect mogen hebben op de contouren. Size stond steeds op 1 omdat het programma geregeld vastliep als het naar objecten moest zoeken die kleiner waren dan de input. Border contrast en average contrast zijn veranderd om de contouren op de juiste positie te krijgen. De analist bepaalt of de contouren op de juiste positie staan en de waarneming is daarmee subjectief. Daarom werden uit alle foto's 15 afbeeldingen random geselecteerd en deze werden door een 2^{e} persoon geanalyseerd. Naast het oppervlak van de poriën berekent de software ook de rondheid van de poriën. Volgens Pagliai (2008) spelen langgerekte poriën een belangrijke rol bij de verzadigde waterdoorlatendheid en de stabiliteit van de poriën.

3.5 XRF-metingen

Met een portable XRF-meter (Niton XL3t GOLDD+) werd op verschillende plaatsen de loodconcentratie van de bodem gemeten. Helium werd gebruikt als 'spoeling' voor de ruimte tussen de sensor en het bodemoppervlak om ook lichtere scheikundige elementen te kunnen meten. Voor een goede meting is een vlak meetoppervlak nodig en daarom werd het bodemprofiel gladgemaakt met een spatel, dit gebeurde van beneden naar boven om te voorkomen dat er loodhoudende bodem naar beneden verplaatst werd. De XRF werd net als het fototoestel opgesteld in een statief. Bij XRF-metingen is het belangrijk dat het meetoppervlak zo dicht mogelijk bij de sensor ligt, daarom lag de boorkern op twee kleine heftafels zodat deze tegen de XRF aangedrukt kon worden. Na een meting werden de heftafels omlaag gedraaid, de boorkern doorgeschoven en weer tegen de sensor gedrukt. Langs de boorkern lag een meetlat ter referentie, van iedere meting werd het nummer en de positie opgeschreven. De opstelling is te zien in Figuur 3.18.

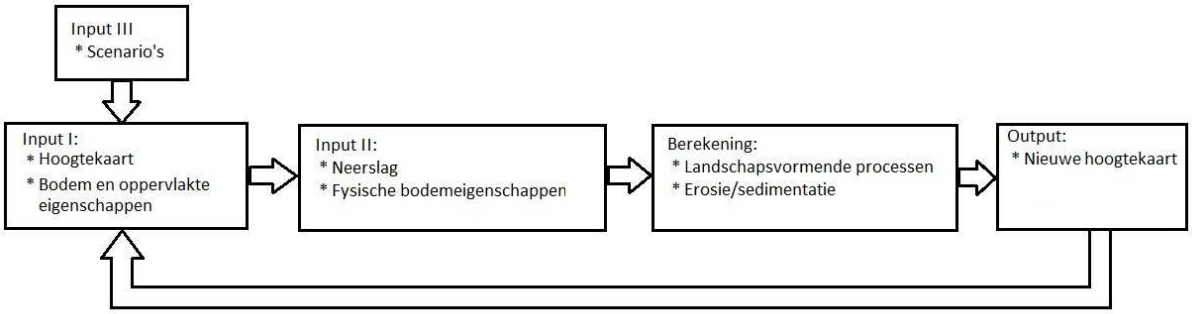


Figuur 3.18 *De meetopstelling voor de XRF-metingen. De XRF-meter staat in het statief en is verbonden met een computer waarin de data worden opgeslagen.*

De gemeten loodwaarden werden genormaliseerd met de aluminiumconcentratie en het percentage niet-minerale bestanddelen (100 minus de som van de fracties Al_2O_3, K_2O, CaO, TiO_2, MnO, Fe_2O_3, P_2O_5, SiO_2, zie paragraaf 4.2.5). Het normaliseren met aluminium is gedaan om te kunnen corrigeren voor de natuurlijke loodconcentratie in het profiel en het lood dat er door antropogene invloeden terecht is gekomen (Huisman et al, 1997). Het normaliseren met het percentage niet-minerale bestanddelen is gedaan om te corrigeren voor verschillen in dichtheid door bodemvocht en organische stof. Dit betekent dat de loodconcentratie gedeeld wordt door het percentage niet-minerale bestanddelen/aluminiumconcentratie uit dezelfde meting en vervolgens vermenigvuldigd wordt met de gemiddelde waarde van de niet-minerale bestanddelen/aluminium in het profiel.

3.6 LAPSUS

Het LandscApe ProcesS modelling at mUlti-dimensions and Scales (LAPSUS) model is een landschapsevolutie model; het model berekent hoe een landschap veranderd in de tijd. Het model doet dit door het effect van landschapsvormende processen op het hoogteprofiel zichtbaar te maken (Schoorl et al., 2002). In Figuur 3.19 is te zien hoe het model werkt.



Figuur 3.19 Werking van het LAPSUS model *(LAPSUS, 2012)*

Invoer

*Hoogtekaar*t: de hoogtekaart voor Hogebeintum is geclipt uit de AHN die ook is gebruikt voor de GIS analyse (paragraaf 3.1). Om de AHN geschikt te maaken voor LAPSUS dienen eerst enkele bewerkingen uitgevoerd te worden: het drainagepatroon moet kloppend worden gemaakt en met behulp van het programma ArcFlat worden kleine depressies opgevuld en vlakke oppervlakken krijgen een lichte gradiënt zodat het water ongehinderd kan afstromen (Sonneveld et al., 2006).

Neerslag: volgens de gemiddelde Jaarlijkse Neerslagsom valt in de omgeving van Hogebeintum ongeveer 0,825 m neerslag per jaar (KNMI, 2000).

Landgebruik: er is een kaart gemaakt waarin is aangegeven of er op een bepaald gebied wel of niet geploegd wordt. Dit is van belang voor het proces dat bepaalt of ergens ploegerosie plaatsvind. Gebieden waar niet geploegd wordt zijn: bebouwing, wegen, sloten en perceelsgrenzen. De eerste 5 meter naast de sloot zijn ook niet meegenomen in de berekening om te voorkomen dat het model materiaal de sloot in verplaatst, iets dat in het veld niet zo snel zal voorkomen. De percelen die door afgraving op klei liggen zijn niet meegenomen in de berekening omdat het onwaarschijnlijk is dat deze percelen gebruikt worden voor akkerland.

Ploegconstante: Ploegerosie werkt volgens Vergelijking 3.4 (Muysen et al., 2006).

$$Q_s = -k * \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) \qquad (3.4)$$

Waarbij

Q_s = Hellingafwaartse flux per ploeggang (kg/m)

K = Coëfficiënt voor de verplaatsing door ploegen (kg/m) Deze waarde wordt bepaald met Vergelijking 3.5.

(∂h/∂x) = Tangens van de helling

$$k = \rho_d * k_{pv} * H \qquad (3.5)$$

Waarbij

ρ_d = Volumedichtheid (kg/m^3)

K_{pv} = Ploegverplaatsingscoëfficiënt (kg/m)

H = Ploegdiepte (m)

De ploegverplaatsingscoëfficiënt is de helling van de lineaire regressie tussen gemiddelde bodemverplaatsing en de gradiënt van de helling (Oost et al., 2006). De in dit onderzoek gebruikte waarden zijn afkomstig uit literatuuronderzoek, zie Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Ploegconstantes (Oost et al., 2006)

	K_{pv} (kg/m)	P_d (kg/m^3)	H (m)	K (m)
Parallel aan contouren	363	1350	0.24	1.12
	184	1540	0.26	0.46
	134	1420	0.2	0.47
	252	1420	0.3	0.59
	360	1420	0.4	0.63
	164	1370	0.24	0.50
	49	1529	0.23	0.14
	132	1490	0.26	0.34
	64	1239	0.16	0.32
	109	1310	0.23	0.36
			Gemiddeld	0.49
Dwars op contouren	324	1350	0.17	1.41
	330	1350	0.24	1.02
	234	1350	0.28	0.62
	245	1070	0.33	0.69
	85	1650	0.15	0.34
	224	1500	0.25	0.60
	169	1560	0.21	0.52
	184	1350	0.15	0.91
	346	1350	0.23	1.11
	263	1350	0.27	0.72
	24	1155	0.08	0.26
	153	1420	0.2	0.54

383	1420	0.3	0.90
670	1420	0.4	1.18
204	1370	0.24	0.62
200	1517	0.25	0.53
335	1507	0.26	0.85
770	1680	0.39	1.18
101	1374	0.21	0.35
63	1598	0.18	0.22
159.8	1598	0.25	0.40
		Gemiddeld	0.71

Gegevens uit Oost et al. (2006) De volumedichtheid van lichte zavel ligt tussen 1300 en 1700 kg/m^3. Alle experimenten waarbij de dichtheid niet in dit interval ligt zijn niet meegenomen in de berekening.

De k_{pv}-waarden in Tabel 3.3 zijn in kg/m, terwijl de invoer voor LAPSUS in meter is. Daarom is met Vergelijking 3.5 en de gegevens uit de originele onderzoeken *K* (m) berekend. De in LAPSUS gebruikte *K*-waarden zijn de gemiddelde van bovenstaande berekening. De eigenaar van perceel 5 ploegt altijd dwars over de bolling in het perceel en op perceel 7 stonden de ploegvoren ook dwars op bolling. Voor ploegen dwars op de contouren is een *K* gebruikt van 0,71 m. Om te kijken wat er gebeurt als er parallel aan de contouren zou worden geploegd is ook een waarde van 0,49 m gebruikt .

Ploegdiepte: deze factor is ook gebaseerd op gesprekken met de boer en waarnemingen in het veld. Volgens de boer werd ongeveer tot 20 cm diepte geploegd. In het veld bleek dat de Ap-horizont op enkele plekken iets dieper is en daarom is de waarde van 0,25 meter gebruikt.

Op basis van deze gegevens berekent LAPSUS de veranderingen voor één jaar, door de berekening meerdere keren te herhalen kan de verandering over lange tijd worden bepaald.

Uitvoer

De uitvoer van LAPSUS is een nieuw hoogtekaartje. Van de nieuwe hoogtes werd de oorspronkelijke hoogte afgetrokken om te zien waar bodem erodeert en waar deze bodem terecht komt. Eerst werd gesimuleerd dat er 25, 50 en 100 jaar niet geploegd werd (grasland) door als ploegconstane 0 m te gebruiken. Vervolgens 25, 50 en 100 jaar dwars over de contouren (de huidige manier van ploegen) door als ploegconstante 0,71 m te gebruiken en wat er zou gebeuren als er 25, 50 en 100 jaar parallel aan de contouren wordt geploegd door als ploegconstante 0,49 m te gebruiken.

Tijdens het veldwerk viel op dat er op de terp van Hogebeintum binnen de sommige percelen enkele hoogteverschillen zitten doordat ze kruinig zijn. De grootste hoogteverschillen zijn echter te vinden tussen de percelen onderling. Doordat alle percelen omringd zijn door sloten en de gronden ‘opgesloten’ zijn was de verwachting dat door ploegerosie hoogstens de kruinigheid van de percelen verdwijnt. Om een indruk te krijgen van het effect van perceelsgrenzen op bodemredistributie en om te simuleren wat de gevolgen zijn als perceelsgrenzen verdwijnen is een andere locatie gezocht waar naast de terp een lager gelegen gebied ligt. Dit is het geval in Berlikum, een terp met akkerbouw waarvan de provincie Friesland overweegt om het landgebruik om te zetten in permanent grasland.

Tussen de terp en het lager gelegen gebied ligt een sloot waardoor ook deze terp opgesloten is. Om het gewenste scenario te kunnen uitvoeren is de sloot uit het hoogtemodel gehaald en vervolgens zijn er modelruns gedaan met precies dezelfde parameters als in Hogebeintum. Dit scenario bood tevens de mogelijkheid om de ordes van grootte van ploegerosie van Hogebeintum te vergelijken met een andere terp.

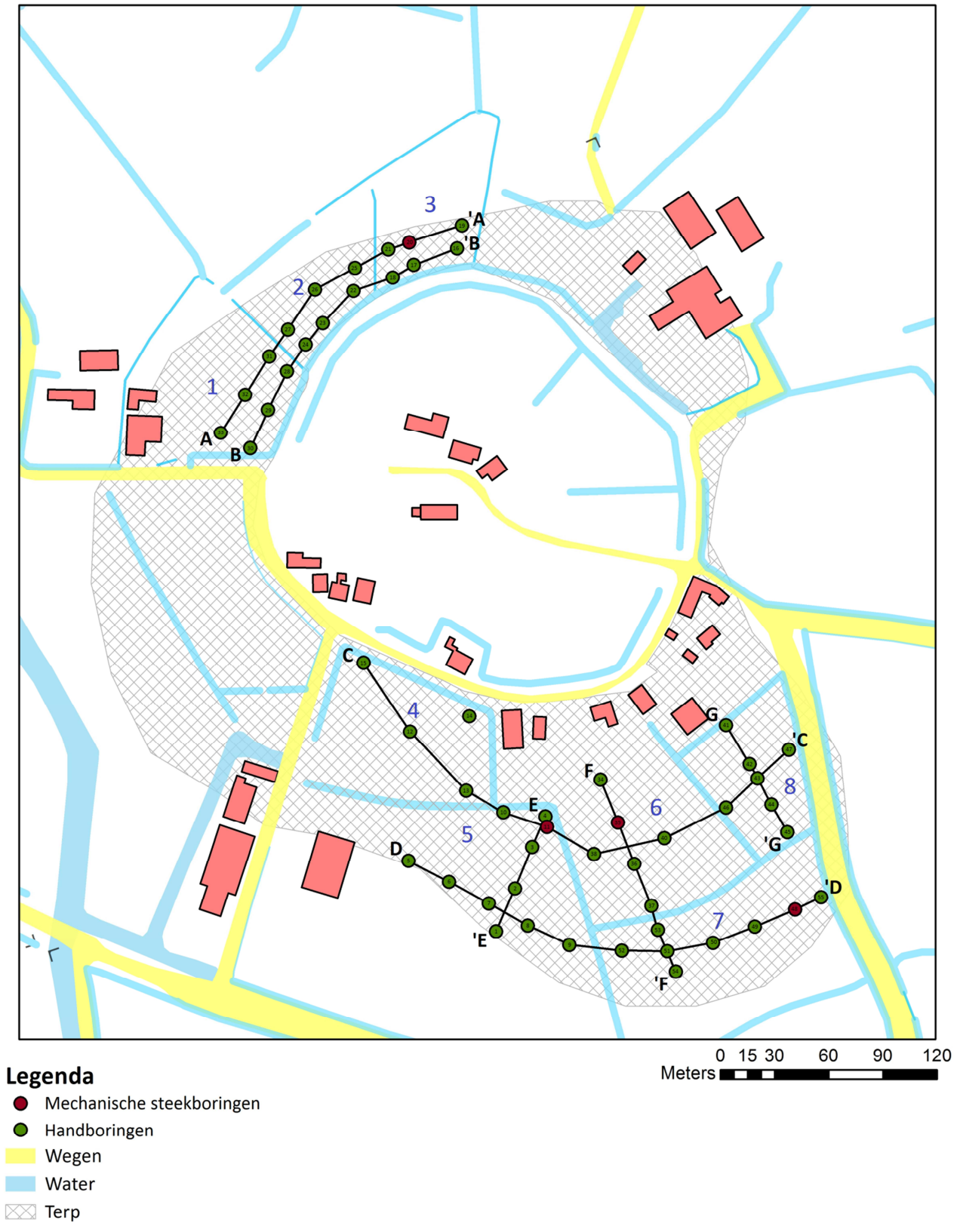
4. Resultaten

4.1 Handboringen

Codering bodemhorizonten

In de archeologie krijgt iedere laag een code en deze code wordt consequent toegepast voor die specifieke laag over het hele profiel. Deze code bestaat uit een letter voor het opgravingsvlak en een nummer. Deze codering zegt niets over de eigenschappen van de laag maar is slechts ter identificatie. Bij bodemkunde bestaat de codering uit een letter die een indicatie geeft over verschillen in chemische en minerale samenstelling bijvoorbeeld: A voor een horizont die direct beïnvloedt wordt door de processen aan het oppervlak en C voor het onveranderde moedermateriaal. Hierachter kan nog een kleine letter komen die iets vertelt over de eigenschappen bijvoorbeeld: g voor gley vlekken, p verstoord door ploegen. Als er dan nog verschillen zijn tussen lagen (zoals kleur) wordt onderscheid gemaakt met een nummer. De codering wordt per boringen bepaald en laag Bg2 in boring X hoeft niet hetzelfde te zijn als Bg2 in boring Y. De in dit rapport gebruikte codering van de bodemhorizonten is een combinatie van de archeologische en bodemkundige codering. De horizonten zijn gecodeerd met de letters zoals gebruikelijk in de bodemkunde, het getal erachter maakt verschil tussen de samenstelling van de bodemlagen. Zo is C1 moedermateriaal bestaand uit zavel en C2 moedermateriaal bestaand uit ongereduceerde klei. Er is gekozen voor deze manier van coderen om te voorkomen dat de verschillende vakgebieden de doorsnedes op een andere manier aflezen.

Hogebeintum

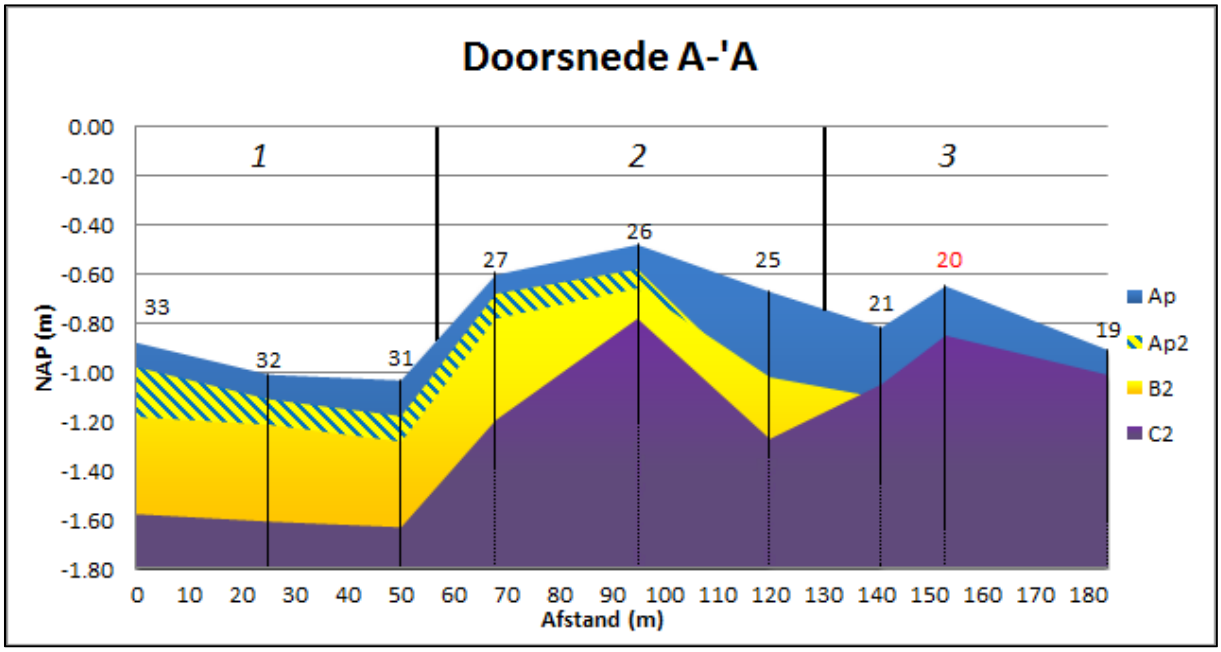


Figuur 4.1 *Overzicht van de boorraaien inclusief perceelsnummers*

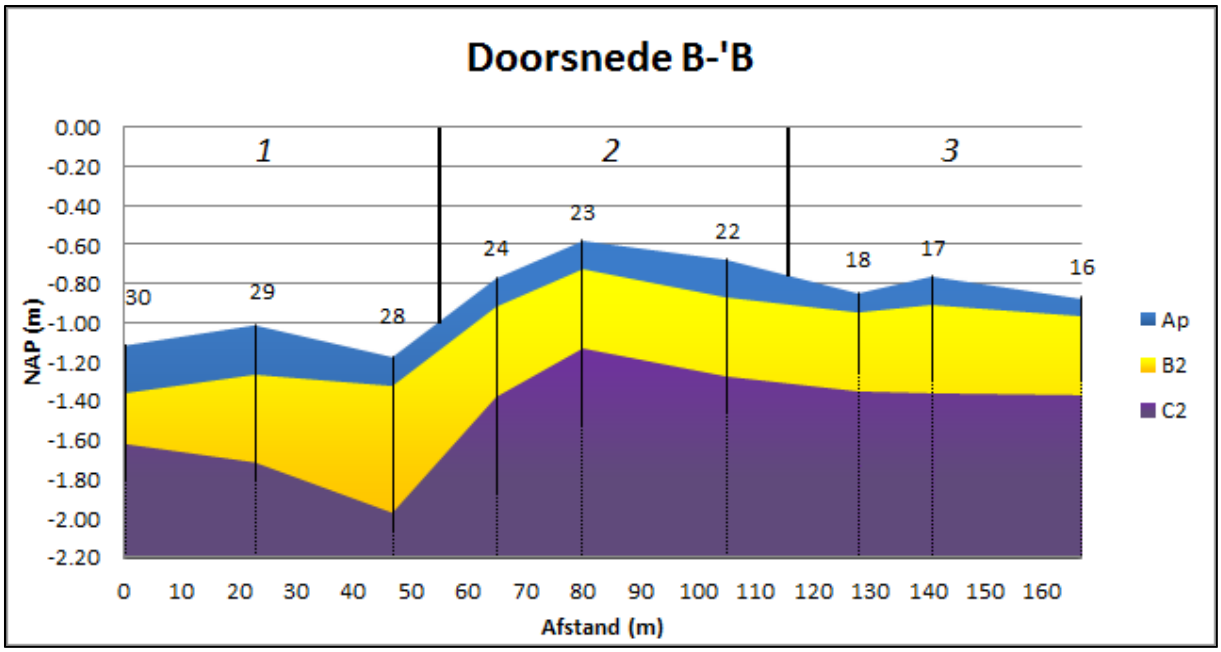
(C) Alterra

Bodemopbouw

Percelen 1, 2 en 3 liggen minimaal 0,50 meter beneden NAP. De percelen zijn allen afgegraven tot een niveau dat dieper ligt dan de omliggende percelen, het lijkt erop of behalve de terpaarde ook de onderliggende zavel is afgegraven tot op de klei (C2). Bovenop de klei ligt een laag gerijpte klei (B2), daarboven ligt op perceel 1 en 2 een laag die door ploegen gemengd is met de Ap-horizont (Ap2). De Ap bestaat uit een humushoudende laag die vertrapt is door schapenpoten. In Figuur 4.2 en 4.3 zijn de dwarsdoorsnedes van de percelen 1 t/m 3 weergegeven. Door de lage ligging hebben de velden een lage ontwateringsdiepte, tijdens het veldwerk stond het grondwater 10 centimeter beneden maaiveld. De landeigenaar heeft wat grond herverdeeld; om de ontwateringsdiepte te verbeteren zijn geultjes gemaakt, op sommige plaatsen zijn de slootranden opgehoogd, en recentelijk is de sloot tussen perceel 2 en 3 gedempt. Ook zijn alle percelen wel eens geploegd. Door deze handelingen zijn er geen locaties waar de grond niet bewerkt is. De eigenaar vertelde over perceel 1 dat er enkele punten zijn waar zout kwelwater voorkomt, dat het af en toe onder water staat en dat het vroeger rietland is geweest, dit is op oude luchtfoto's terug te vinden. Dit alles maakt perceel 1 geen representatieve locatie voor grasland. De mechanische steekboring werd gezet in perceel 3 nabij handboring 20 omdat dit perceel het langst onbewerkt leek te zijn; de zijkanten van de aanwezige ontwateringsgeultjes waren grotendeels verzakt. Bij perceel 2 waren deze zijkanten nog vrij recht.



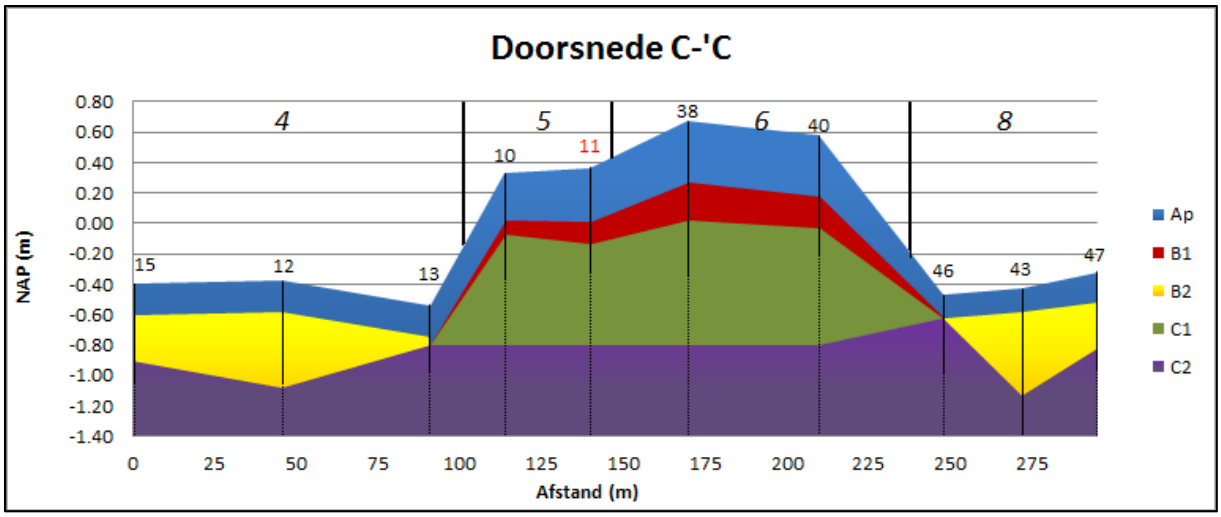
Figuur 4.2 *Doorsnede A-'A*



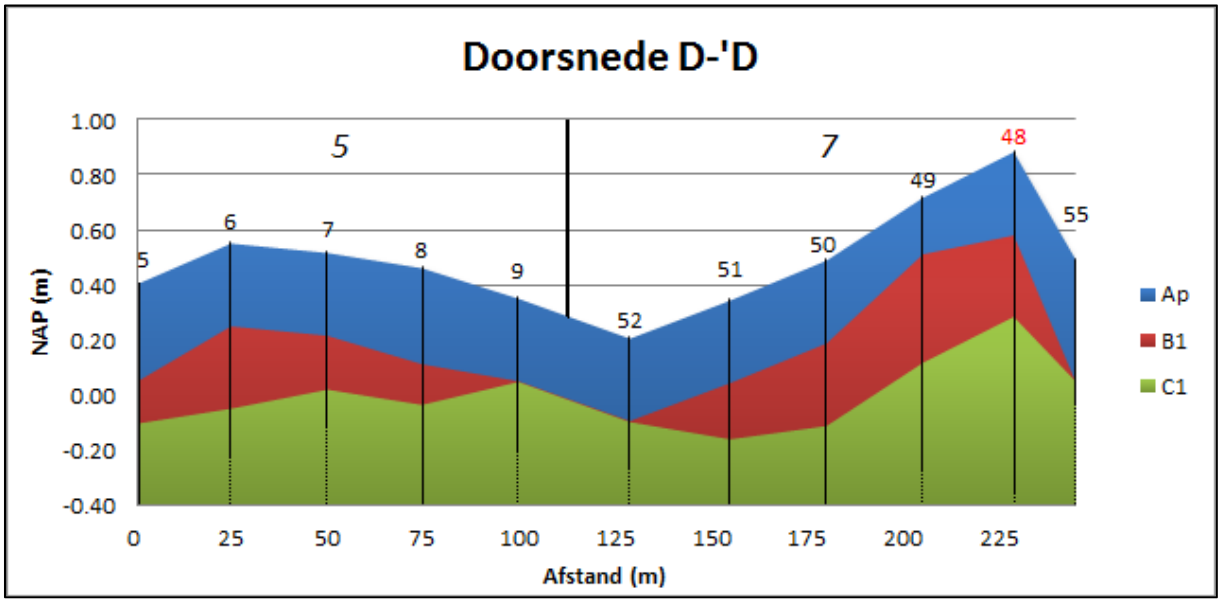
Figuur 4.3 *Doorsnede B-'B*

Perceel 4 is ook laaggelegen door afgraving maar in de (B1)-horizont zit nog zavel, daaronder komt klei voor (C2). In Figuur 4.4 (handboringen 15, 12, 13) is een doorsnede van perceel 4 te zien. Volgens de eigenaar was de grond niet geschikt om te ploegen, het veld werd daarom gebruikt om aarde die overblijft na de aardappeloogst te storten. Dit veld is dan ook niet representatief voor grasland.

Perceel 5 is in gebruik als akkerland. Er wordt gewerkt met een gewasrotatiesysteem van aardappelen, tarwe en bieten. De bodem wordt geploegd tot een diepte van 20 cm en in de ploegvoor worden tot op die diepte gewasresten aangetroffen. Figuur 4.4 (handboringen 10 en 11) en Figuur 4.5 (handboringen 5 t/m 9) zijn dwarsdoorsneden van dit perceel. In Bijlage 3 is doorsnede E-'E te vinden, dit is een raai die dwars staat op C-'C en D-'D. De ingetekende kleiige laag is niet aan te treffen binnen de geboorde diepte maar omdat aan beide laaggelegen zijdes de klei aan het oppervlak ligt wordt aangenomen dat deze er wel onder ligt. Tot 120 cm diepte ligt een laag zavel (C1) met daarin schelpresten en enkele gley-vlekken. Daarboven ligt een laag zavel die iets gerijpt is (B1) en daarboven de ploegvoor. Bij het kiezen van een geschikte monster locatie was van belang dat de mechanische steekboring aan de rand van het perceel moest plaatsvinden omdat er op korte termijn aardappelen gepoot zouden worden en de bodemstructuur daarom zo min mogelijk verstoord mocht raken. De mechanische steekboring is bij handboring 11 gedaan.



Figuur 4.4 *Doorsnede C-'C*



Figuur 4.5 *Doorsnede D-'D*

Perceel 6 was volgens de eigenaren lange tijd akkerland maar is ongeveer 25 jaar geleden omgezet naar grasland waarop schapen en paarden grazen. Het perceel lijkt qua bodemopbouw op het naastgelegen perceel 5 maar bij dit perceel bevat de bovenlaag veel meer organische stof. De laag is ook dikker, er werd zelfs een worm gevonden op 60 cm diepte. De locatie van de mechanische steekboring is bij handboring 35 maar dit is redelijk willekeurig, het perceel is redelijk homogeen. Figuur 4.4 (handboringen 38 en 40) zijn handboringen op dit perceel. In Bijlage 3 is doorsnede F-'F te vinden, dit is een raai die dwars staat op C-'C .

Perceel 7 is ook akkerland. Door omstandigheden was het niet mogelijk om informatie te krijgen over de bewerking van het perceel. In tegenstelling tot wat op de GIS-landgebruikskaart staat is het land volgens de omliggende boeren wel altijd akkerland geweest. In doorsnede D-'D (handboringen 52 t/m 48 en 55) is een dwarsdoorsnede te zien die sterk lijkt op die van perceel 5, opvallend is de hoogte rond meting 48. Bij handboring 49 werd secundaire kalk aangetroffen in de B-horizont. De gewenste locatie voor een mechanische steekboring zou bij handboring 50 zijn geweest maar ten

tijde van het veldwerk was perceel 7 net ingezaaid. Teneinde de schade aan de gewassen zoveel mogelijk te beperken moest de mechanische steekboring zo dicht mogelijk bij de rand van het perceel worden gezet. Handboring 48 was het beste alternatief en daar is dan ook de mechanische steekboring gezet.

Perceel 8 is een grasland dat op klei ligt. In tegenstelling tot het op dezelfde hoogte gelegen perceel 4 wordt hier geen zavel aangetroffen in de B-horizont. In dit perceel zijn ook ontwateringsgeultjes gemaakt. Omdat het perceel qua bodemopbouw lijkt op perceel 2 en 3 werd op dit perceel geen mechanische steekboring gedaan omdat perceel 3 minder verstoord lijkt dan perceel 8 omdat ook hier de geultjes nog behoorlijk recht zijn.

Overige waarnemingen

Tijdens het veldwerk is ook gelet of wormen werden aangetroffen in de handboringen. In totaal zijn 5 hele wormen opgeboord waarvan 2 in perceel 6. In sommige boormonsters zaten resten van wormen, afkomstig van wormen die doormidden zijn gegaan tijdens het boren. Deze zijn niet genoteerd omdat niet kon worden vastgesteld of de worm daadwerkelijk op die diepte voorkwam of dat de resten uit de boorwand gevallen zijn.

Bij de akkerlanden komen wortels voor in de bovenste 30 cm net als gewasresten. Daarbeneden zijn er nauwelijks nog wortels aan te treffen in de profielen. Bij de graslanden op klei gaan de wortels tot 35-80 cm diep. Bij het grasland op zavel komen over de volledige boordiepte wortels voor.

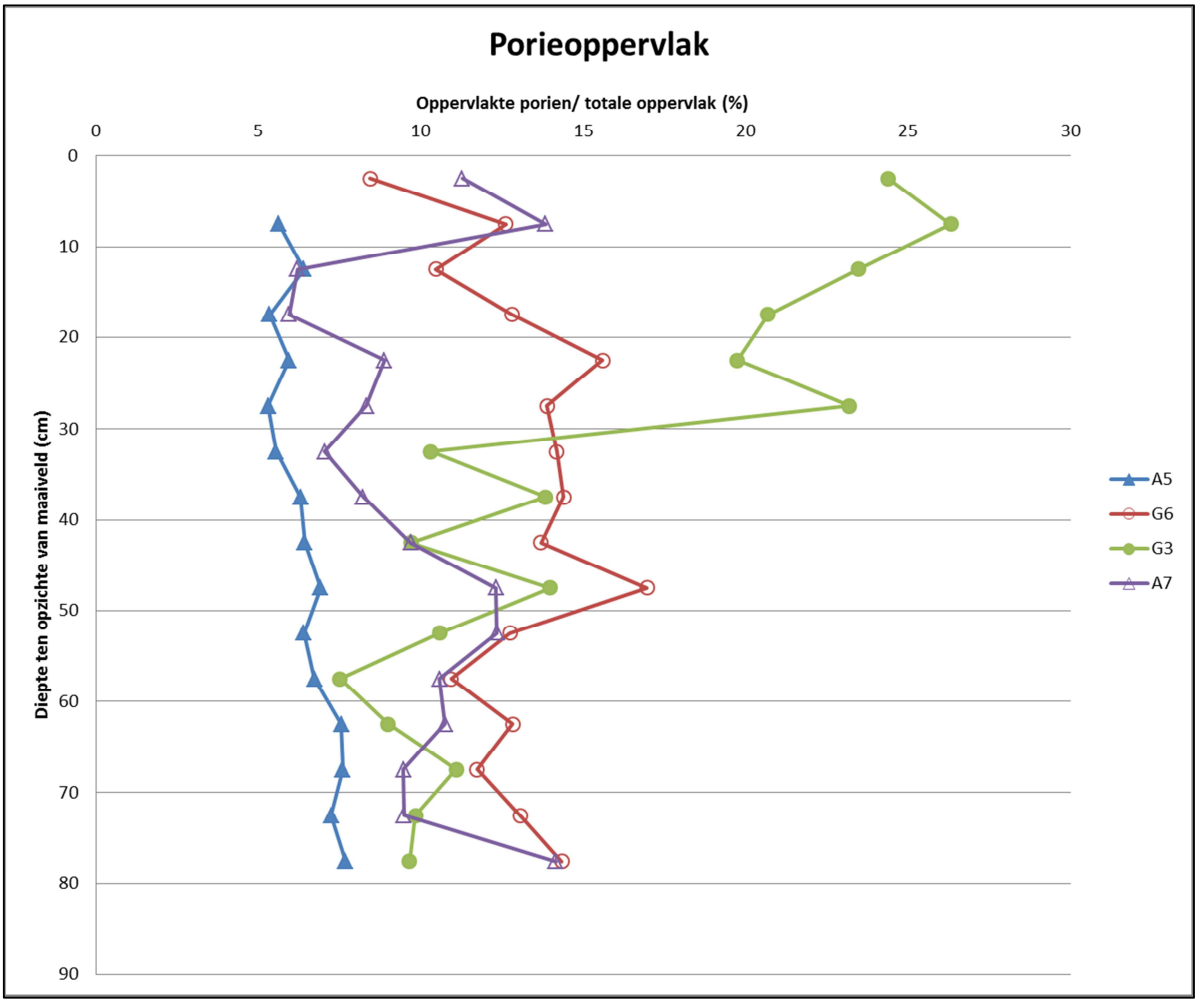
4.2 Bodemeigenschappen

Na bestudering van de boorkern afkomstig uit de mechanische steekboring bleek dat de bodemkolom lichtjes is samengedrukt in de lengterichting. In Tabel 4.1 staan van de mechanische steekboringen de locaties en hoogte ten opzichte van NAP.

Tabel 4.1 Locaties van de mechanische steekboringen

Perceel	Handboring	Toponiem	Code	Hoogte t.o.v. NAP (m)
5	11	Akker sinds +/- 1955	A5	0,37
6	35	Gras sinds +/- 1985	G6	0,71
3	20	Gras op klei	G3	- 0,65
7	48	Akker sinds 1832	A7	0,84

4.2.1 Porieoppervlak

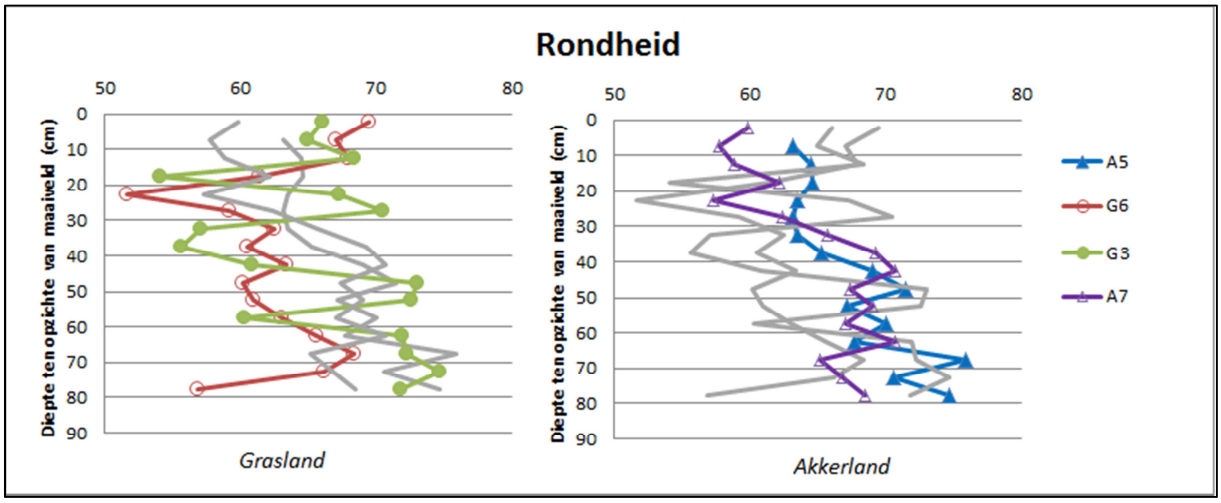


Figuur 4.6 *Het verloop van het porieoppervlak (oppervlakte poriën/totale oppervlak) over de diepte.*

Uit Figuur 4.6 blijkt dat bij de akkerlanden het porieoppervlak over bijna het gehele profiel lager is dan bij de graslanden, het porieoppervlak boven de bouwvoor is groter dan het porieoppervlak onder in de bouwvoor. De graslanden hebben gemiddeld een hoger porieoppervlak en dit neemt ook af met de diepte. Perceel 7 heeft de in bovenste 15 cm een hoog porieoppervlak door ingeploegde gewasresten. Rond 35 cm diepte lijkt een ploegzool te zitten. Verder neemt de porositeit iets toe met de diepte. Bij het akkerland op perceel 5 komen in de bovenste centimeters ook gewasresten voor, hierdoor was het zelfs onmogelijk om van de bovenste centimeters het porieoppervlak te bepalen. De bij perceel 7 aanwezige ploegzool lijkt hier niet voor te komen. Maar ook hier neemt de porositeit weer toe met de diepte. Het grasland op perceel 6 heeft een lage porositeit in de bovenste 15 cm, waarschijnlijk afkomstig van de beweiding van het perceel. Tot 55 cm diepte heeft dit perceel een groter porieoppervlak dan de percelen met akkerland. Het grasland op perceel 3 heeft bovenin een groot porieoppervlak en dit gaat door tot een diepte van 30 cm waarna het porieoppervlak snel afneemt. Deze bovenste laag bevat ook veel niet-minerale bestanddelen (zie ook paragraaf 4.2.5), waarschijnlijk veroorzaakt door de hoge grondwaterstand waardoor er minder organisch materiaal kan oxideren. Vanwege de hoge grondwaterstand en de onderliggende kleibodem zal de bioturbatie vooral bovenin de bodem voorkomen.

Bij de analyse van de 15 random gekozen foto's die door een 2^{e} persoon werd gedaan lag het porieoppervlak gemiddeld 3 procentpunten hoger dan de eigen resultaten. Deze resultaten zijn niet weergegeven in bovenstaande grafiek.

4.2.2 Rondheid van de poriën



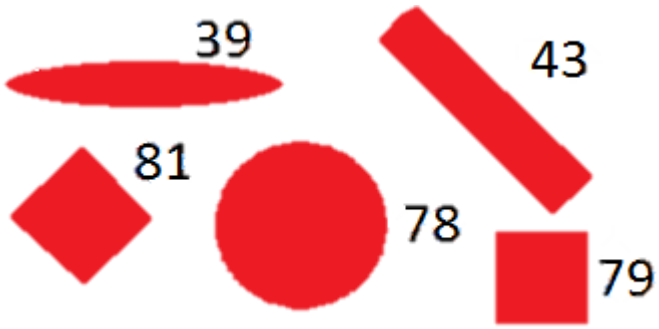
Figuur 4.7 *Het verloop van de rondheid van de poriën met de diepte*

In Figuur 4.7 is het verloop van rondheid met de diepte weergegeven. Zoals vermeldt in paragraaf 3.3.5 spelen langgerekte poriën een belangrijke rol bij de verzadigde waterdoorlatendheid en de stabiliteit van de poriën. Rondheid wordt berekend met Vergelijking 4.1

$$Rondheid = 4\pi * \frac{oppervlak}{omtrek^2} \quad (4.1)$$

Doordat de afmetingen van een object wegvallen wordt het mogelijk om objecten van verschillende grootte met elkaar te vergelijken. Rondheid geeft niet aan of een object rond of vierkant is maar wel of een object langgerekt is of niet. In Figuur 4.8 zijn enkele objecten en de bijbehorende rondheid

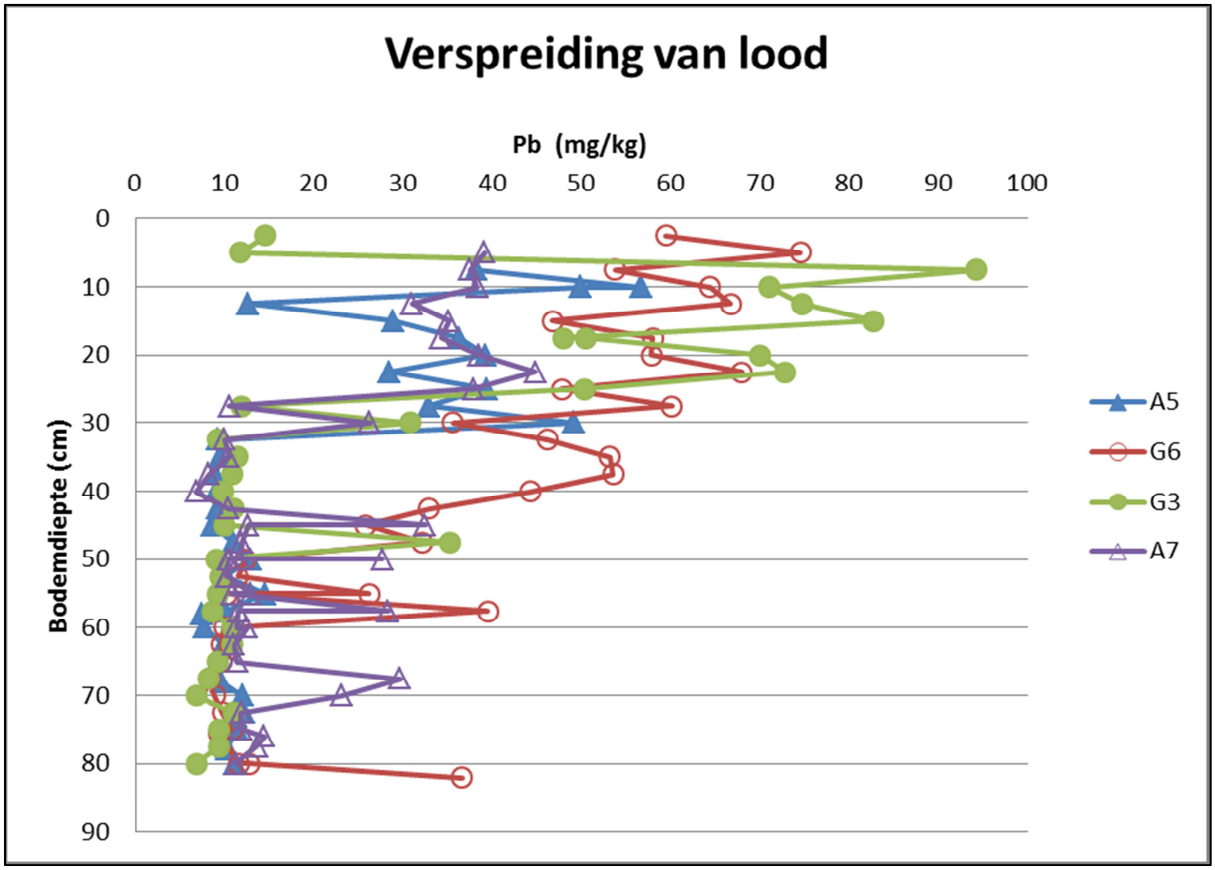
weergegeven. Opgemerkt moet worden dat objecten bestaand uit pixels nooit volledig rond kunnen zijn (Inperc, 2012).



Figuur 4.8 *Enkele objecten en de* bijbehorende rondheid *(Inperc, 2012).*

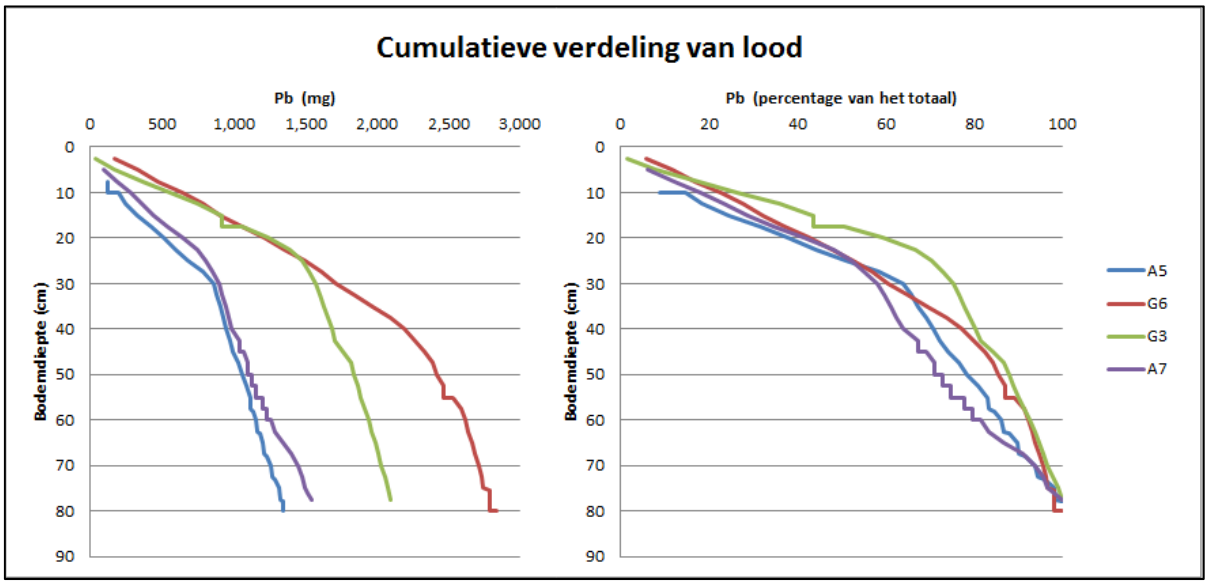
Bij de graslanden zijn de poriën in de bovenste 15 cm ronder dan de poriën in het akkerland. Beneden de ploegvoor zijn de poriën onder grasland langgerekter dan de poriën onder akkerland. Bij beide landgebruiken neemt de rondheid toe met de diepte. De poriën onder het grasland op perceel 6 zijn het meest langgerekt. De poriën onder het grasland op perceel 3 zijn afwijkend, er zijn lagen met langgerekte poriën en lagen met vooral ronde poriën.

4.2.3 Loodconcentratie



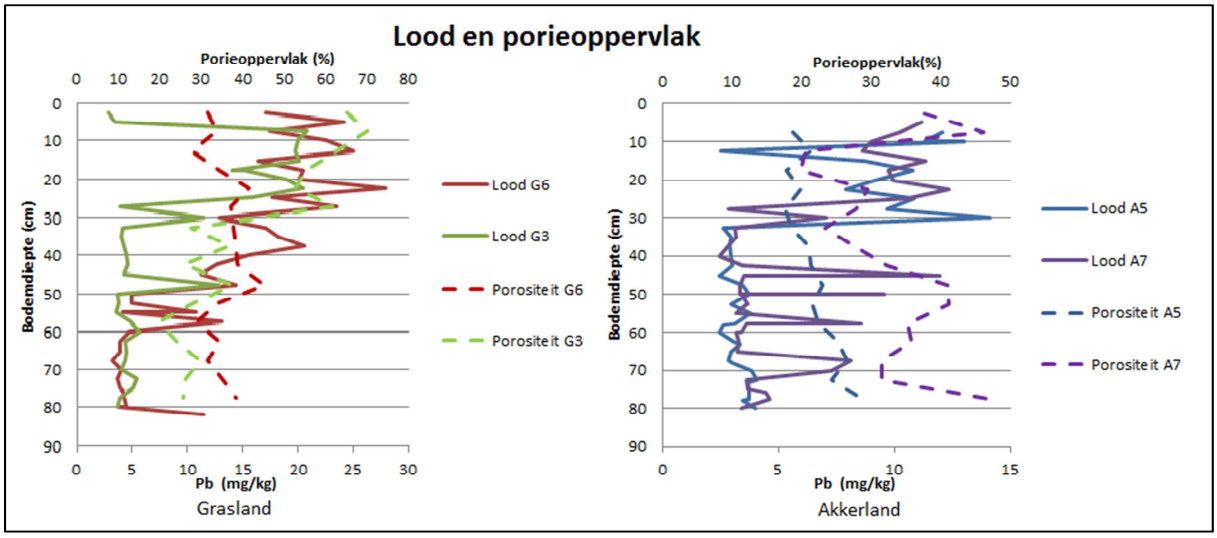
Figuur 4.9 *Verspreiding van lood door de bodem. De loodconcentraties zijn na normalisatie met aluminium en niet-minerale bestanddelen*.

Over het algemeen kan gesteld worden dat bij akkerlanden de loodconcentratie in de bouwvoor hoger is dan de concentratie onder de bouwvoor (Figuur 4.9). De overgang van de hoge naar lage concentraties verloopt redelijk abrupt. Op enkele pieken na blijft de loodconcentratie onder de bouwvoor constant. Bij enkele pieken is een tweede meting gedaan op dezelfde bodemdiepte, hier lag de concentratie weer in lijn met de gemiddelde waarden, de pieken zijn dus te verklaren door puntverontreinigingen van individuele poriën. Het grasland op klei vertoont hetzelfde patroon, behalve dat de concentraties in de bovenste 30 cm groter zijn. Het akkerland op perceel 6 laat zien dat bij grasland op zavel de overgang van de hoge naar lage loodconcentratie veel geleidelijker gaat en ook dat de loodverontreiniging tot op grotere diepte voorkomt. Opvallend is dat bij graslanden de loodconcentratie in de bovenste lagen hoger is dan bij de akkerlanden. Dit is ook duidelijk te zien wanneer een sommatiecurve gemaakt wordt van het lood (Figuur 4.10). Bij de akkerlanden verloopt de cumulatieve loodconcentratie lineair tot 30 cm diepte. Ditzelfde gebeurt bij de graslanden. Echter bij perceel 3 stopt de verontreiniging rond 25 cm diepte en neemt dan abrupt af. Bij perceel 6 neemt de hoeveelheid lood na 35 cm tot ongeveer 50 cm geleidelijk af. Beneden de 50 cm hebben de cumulatieve functies dezelfde ongeveer gradiënt. Deze lineariteit duidt er op dat er in de afgelopen 50 jaar nauwelijks verstoringen plaats hebben gevonden op grotere diepte.



Figuur 4.10 *Cumulatieve verdeling van het lood na normalisatie met aluminium en niet-minerale bestanddelen. De linker grafiek zijn de absolute loodconcentraties. De rechter grafiek is het percentage ten opzichte van de totale loodconcentratie per profiel. De knikken in de grafiek worden veroorzaakt door de tweede meting die werd uitgevoerd op enkele locaties met een grote loodconcentratie.*

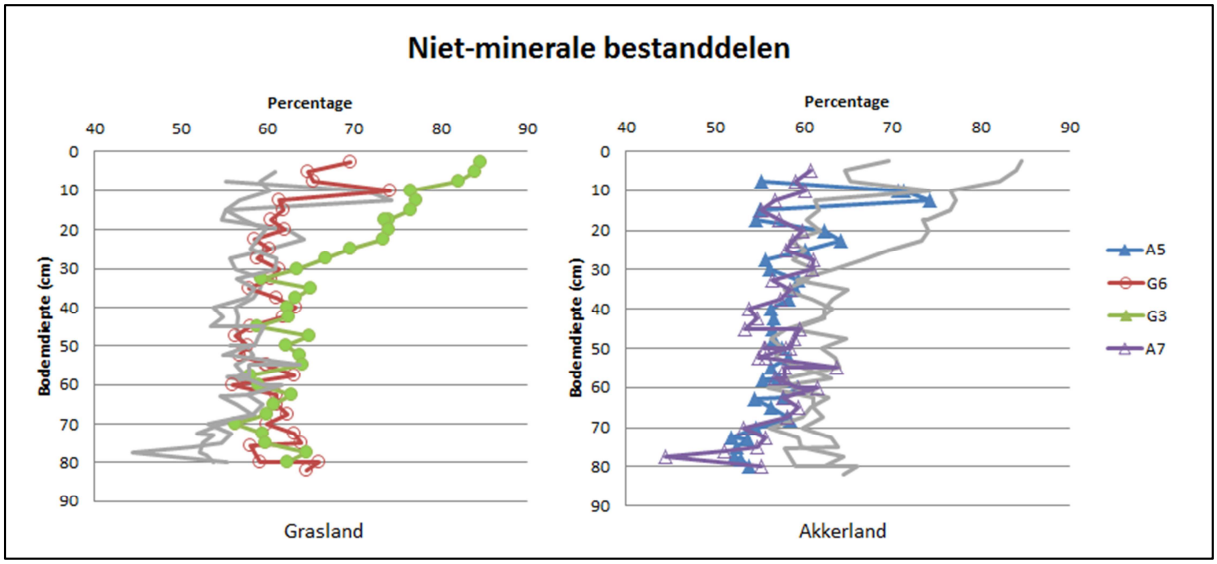
4.2.4 Verhouding lood en porieoppervlak



Figuur 4.11 *Verdeling van lood en porieoppervlak bij akker- en graslanden.*

Bij het akkerland op perceel 7 zitten de pieken in een gedeelte met een groter porieoppervlak (Figuur 4.11). Bij het grasland op perceel 6 komen de pieken in de loodconcentratie niet noodzakelijk voor in een laag met een groter porositeit.

4.2.5 Niet-minerale bestanddelen



Figuur 4.12 *Verdeling van het percentage niet-minerale bestanddelen over de diepte*

De XRF-meter meet naast loodconcentraties ook nog de percentages van de mineralen Al_2O_3, K_2O, CaO, TiO_2, MnO, Fe_2O_3, P_2O_5, SiO_2. De percentages van deze mineralen werden bij elkaar opgeteld en de som werd afgetrokken van 100. Het eindresultaat wordt niet-minerale bestanddelen genoemd. Deze fractie is een indicatie voor het percentage vocht en organische stof in de bodem. Als gekeken wordt naar het percentage niet-minerale bestanddelen in de bodem dan valt perceel 3 weer op (Figuur 4.12). Zoals ook in het veld werd waargenomen bevat dit profiel in de bovenste 30 cm meer

organische stof dan de andere profielen. De graslanden hebben een hogere concentratie niet-minerale bestanddelen dan de akkerlanden.

4.3 Waterdoorlatendheid (K_{sat})

Tabel 4.2 Resultaten van de waterdoorlatendheidsmetingen

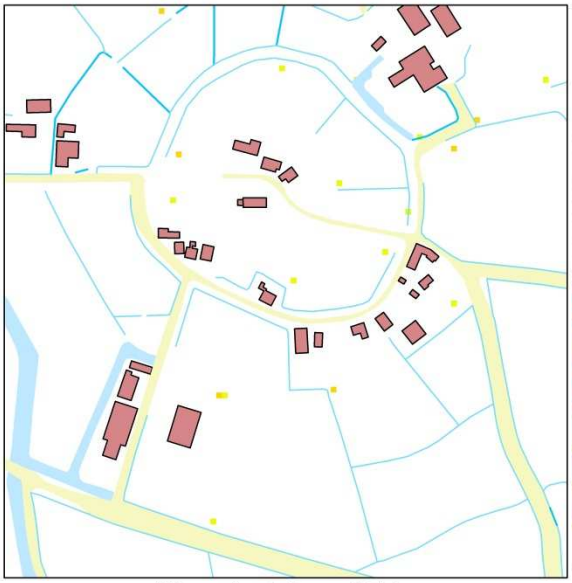
Perceel	K_{sat} (m/d)	Diepte grondwaterstand (m)
Akker 5	0,04	0,90
Gras 6	0,25	0,62
Gras 3	159	0,12
Akker 7	0,18	0,75

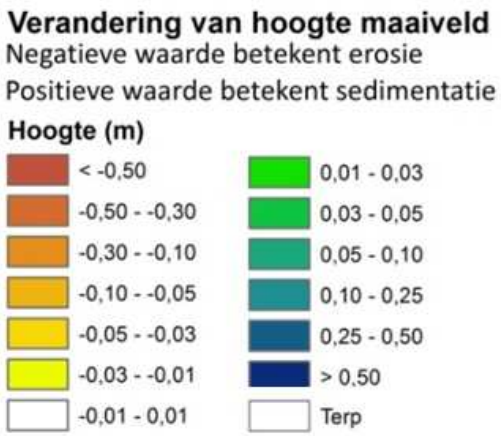
De doorlatendheidsmetingen zijn allen gedaan bij droog weer en nadat de grondwaterstand zich hersteld had tot het oorspronkelijke peil. In Tabel 4.2 is te zien dat de gronden een lage doorlatendheid hebben met uitzondering van het grasland op perceel 3. Met uitzondering van perceel 3 zijn alle percelen behoorlijk diep ontwaterd. De volledige metingen zijn te vinden in Bijlage 4.

4.4 LAPSUS

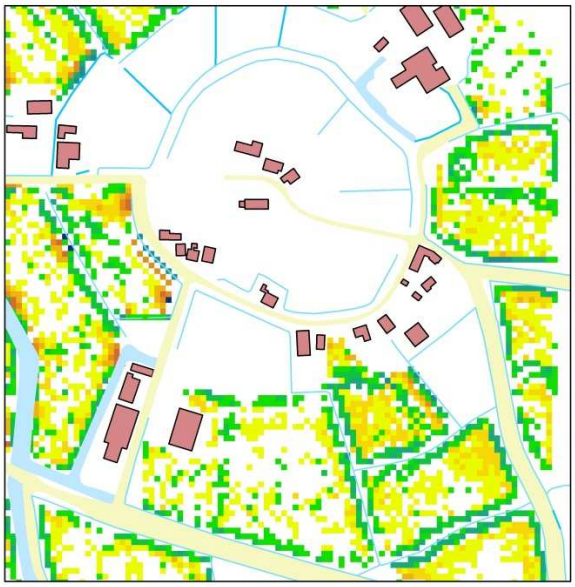
Hogebeintum

Hogebeintum 100 jaar
Niet geploegd

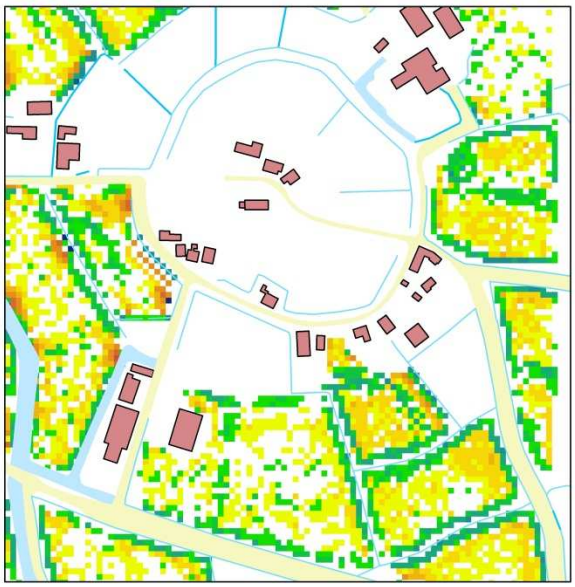


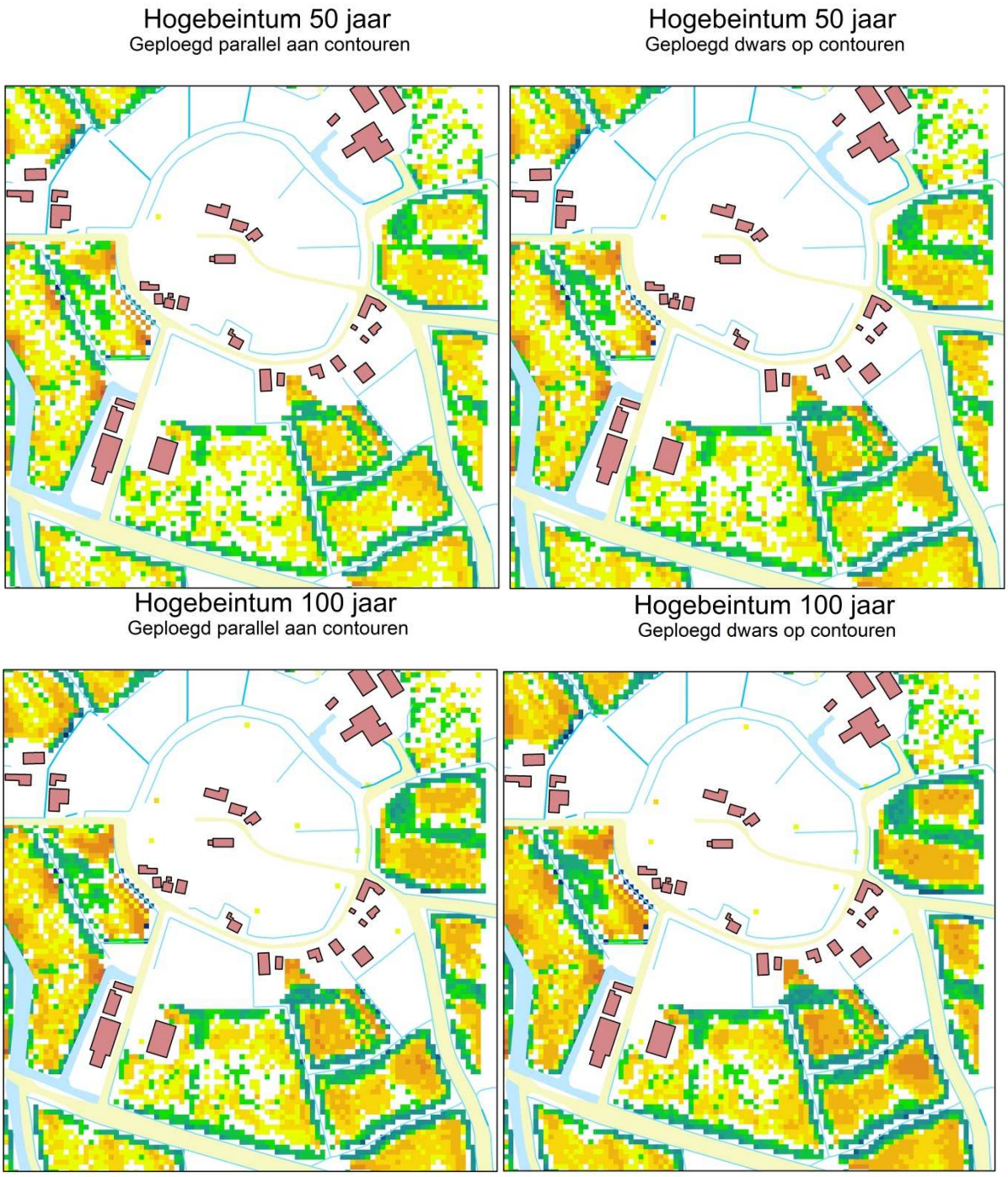


Hogebeintum 25 jaar
Geploegd parallel aan contouren



Hogebeintum 25 jaar
Geploegd dwars op contouren

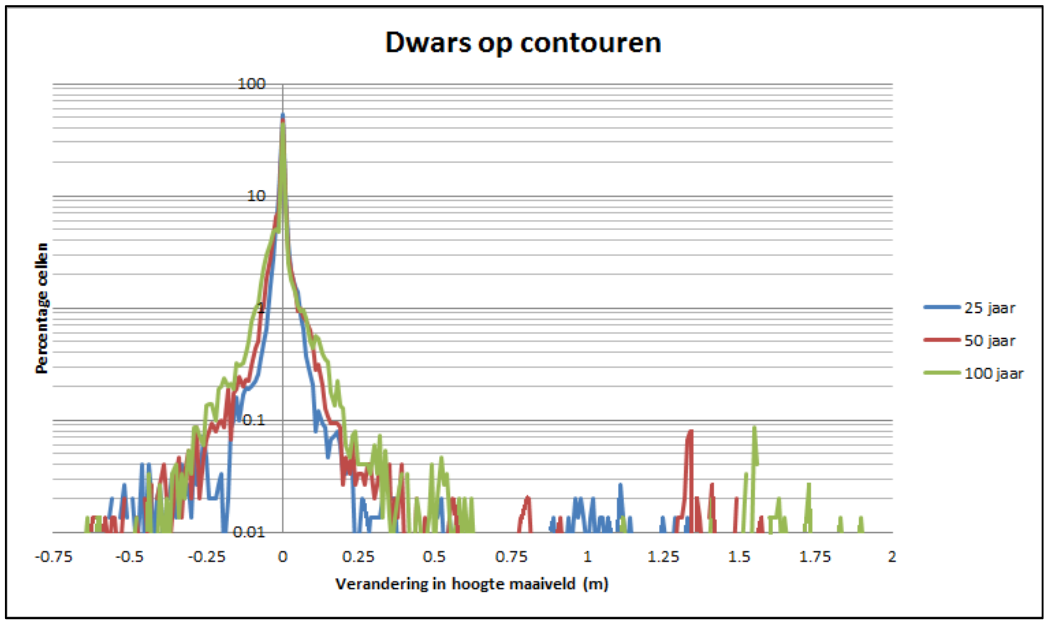




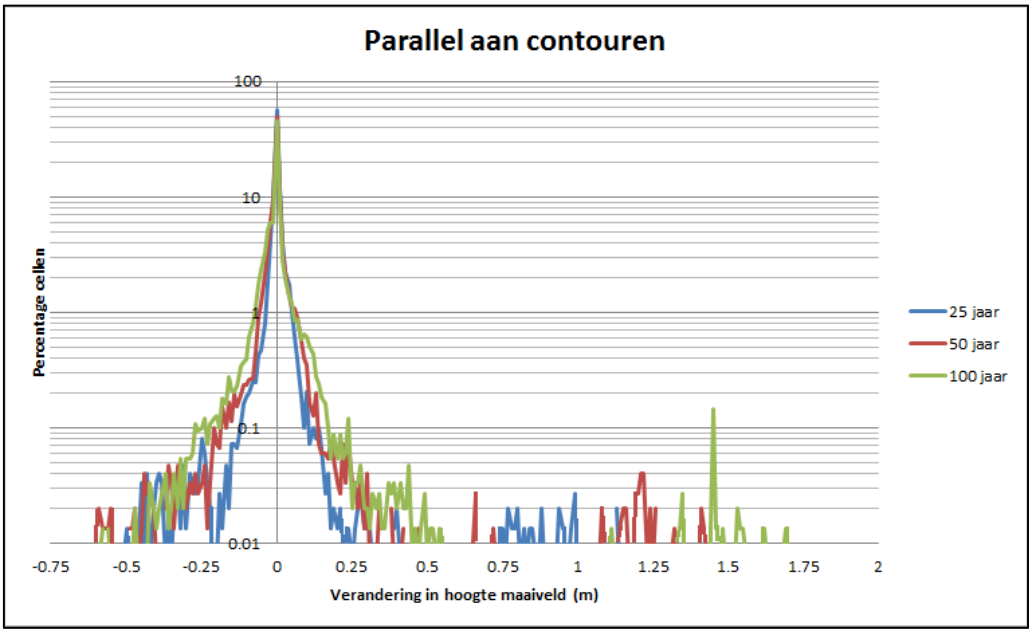
Figuur 4.13 *Verandering van de maaiveldhoogte in Hogebeintum over de tijd bij niet ploegen, ploegen parallel aan contouren of dwars op contouren. Gele of oranje kleuren betekent dat er erosie plaats heeft gevonden, groene en blauwe kleuren betekent dat hier sedimentatie plaatsvind. De bijbehorende legenda is te vinden op de vorige pagina.*

Uit Figuur 4.13 blijkt dat als de akkerlanden niet meer geploegd zouden worden er nauwelijks nog erosie en sedimentatie is. Wordt er wel geploegd dan verplaatst het materiaal zich vooral richting de sloten, dit is te verklaren doordat dit kruinige akkers zijn. Het verschil in ploegrichting is vooral zichtbaar bij de hogere plekken, hier erodeert meer bodem indien parallel aan de contouren wordt geploegd, op de lagere plekken is dit effect kleiner. Het verschil in ploegrichting heeft vooral effect in de eerste jaren, daarna maakt dit niet meer zo veel uit en wordt er bij beide ploegrichtingen

ongeveer evenveel bodem verplaatst. Als gekeken wordt naar de langere termijn erodeert er bij ploegen dwars op de contouren meer bodem dan bij ploegen parallel aan de contouren. De totale hoeveelheid bodem die per ploegbeurt verplaatst wordt neemt af over de tijd (zie Tabel 4.3 en Figuur 4.19) Bij gebieden met erosie erodeert er gemiddeld 2-3 cm bodem bij 100 jaar. Uit Figuur 4.14 en 4.15 blijkt dat er op enkele locaties tot 50-65 cm bodem kan eroderen door ploegen.



Figuur 4.14 *Histogram van de bodemredistributie in Hogebeintum als dwars op de contouren geploegd wordt. Op de X-as staat van de hoeveelheid bodem die verplaatst wordt. Op de logaritmische y-as staat het percentage van de terp met die hoeveelheid erosie/sedimentatie. De punten met meer dan 0,5 meter depositie liggen vooral aan de randen van de akkers linksmidden (zie Figuur 4.13)*



Figuur 4.15 *Histogram van de bodemredistributie in Hogebeintum als parallel aan de contouren geploegd wordt.*

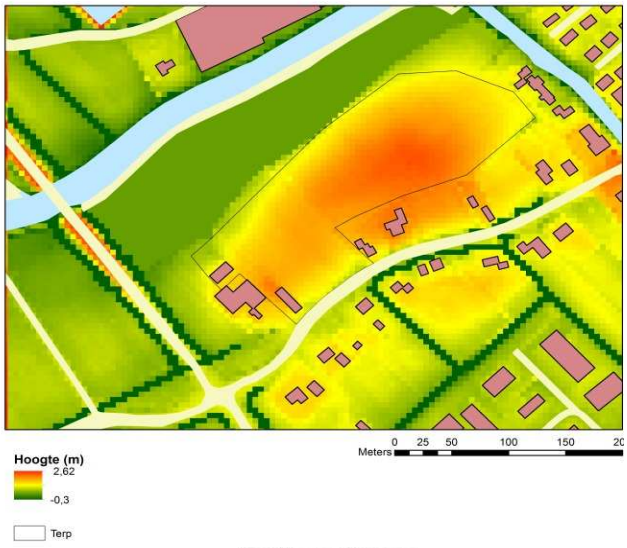
Tabel 4.3 Erosie en depositie in Hogebeintum

		Erosie		Depositie	
	Jaar	Cellen met erosie (%)	Verplaatsing per gridcel (m)	Cellen met depositie (%)	Verplaatsing per gridcel (m)
Grasland	100	94,26	0,00	3,51	0,00
Ploegen dwars over contouren	25	71,95	-0,02	23,41	0,05
	50	73,91	-0,02	23,44	0,07
	100	75,11	-0,03	23,46	0,09
Ploegen parallel aan contouren	25	71,57	-0,01	23,81	0,04
	50	73,46	-0,02	23,87	0,06
	100	74,91	-0,02	23,68	0,08

De overige cellen hebben geen verplaatsing van bodem. Verplaatsing per gridcel is de gemiddelde hoeveelheid bodem die gedurende het interval van 25, 50 of 100 jaar is verplaatst.

Berlikum

Berlikum AHN



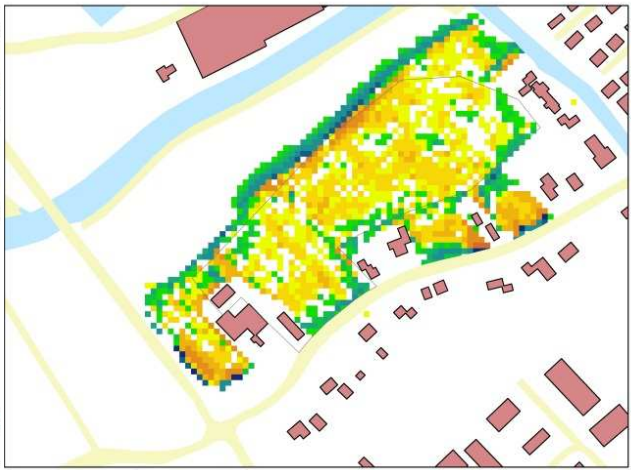
Berlikum 100 jaar
Niet geploegd

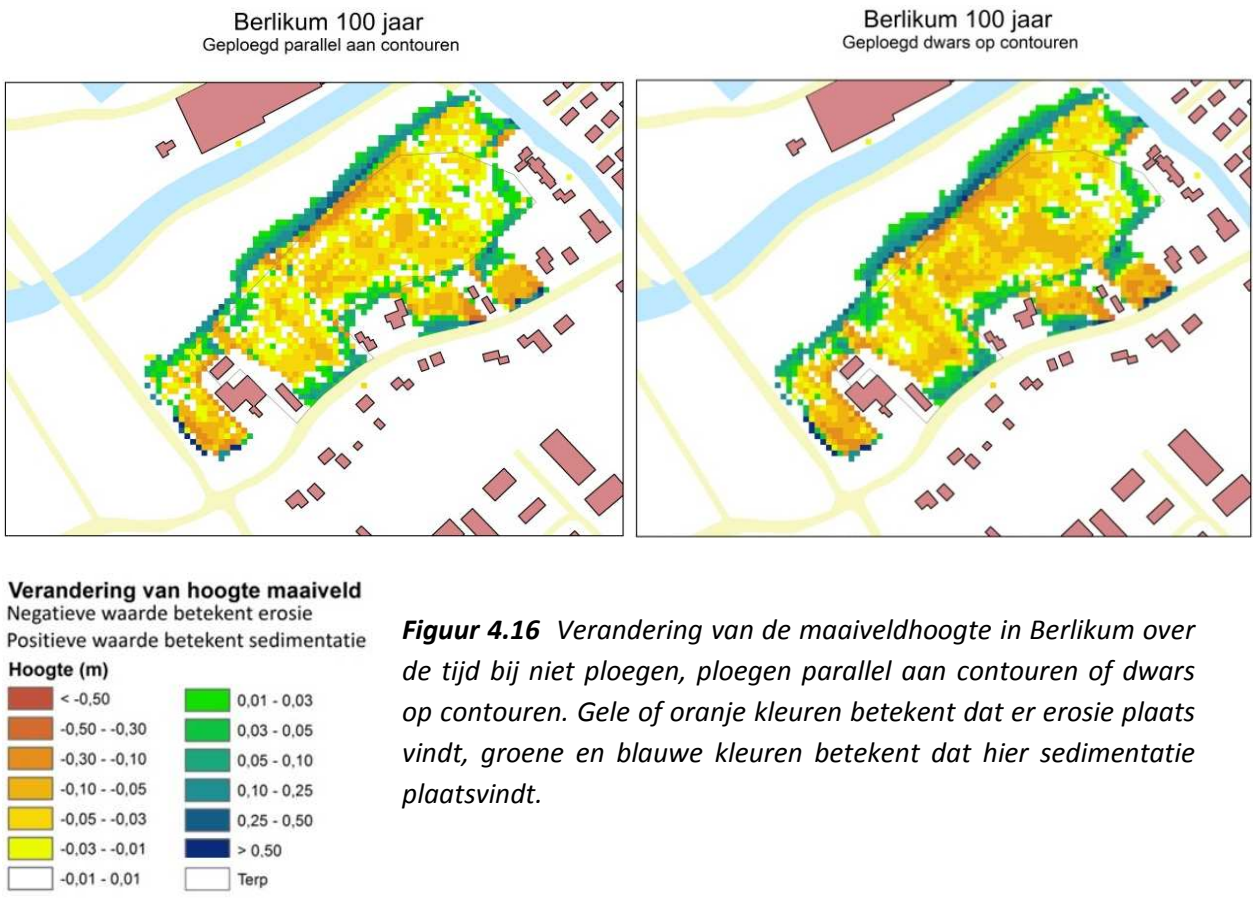
Berlikum 25 jaar
Geploegd parallel aan contouren

Berlikum 25 jaar
Geploegd dwars op contouren

Berlikum 50 jaar
Geploegd parallel aan contouren

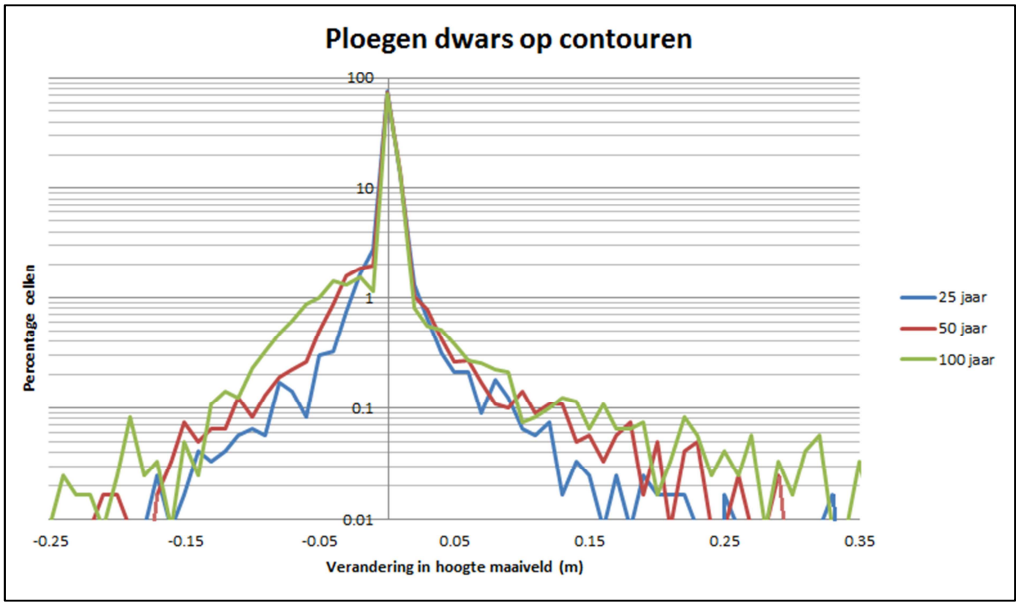
Berlikum 50 jaar
Geploegd dwars op contouren



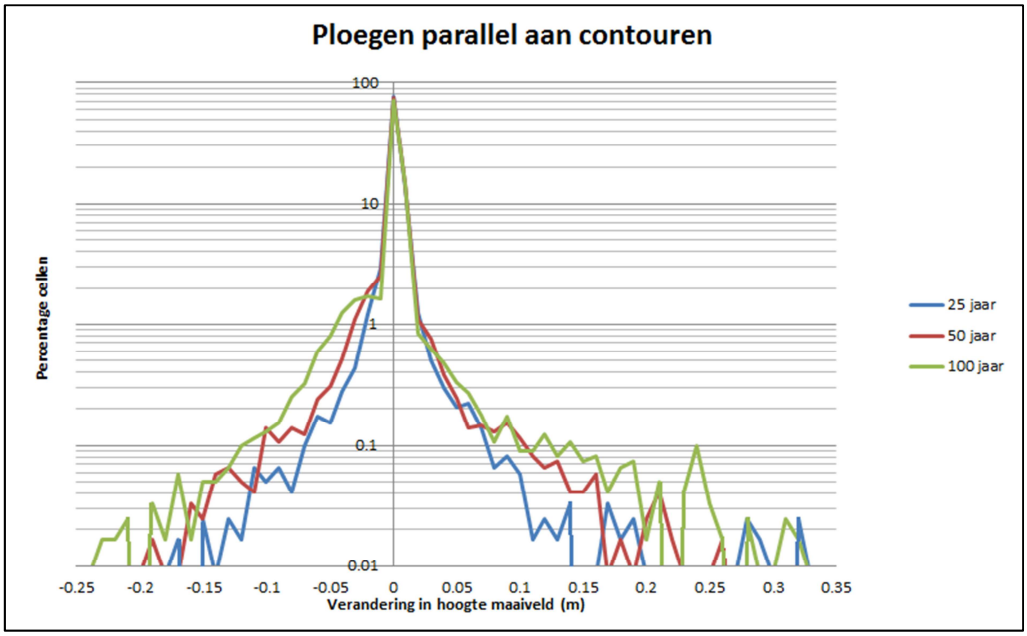


Figuur 4.16 *Verandering van de maaiveldhoogte in Berlikum over de tijd bij niet ploegen, ploegen parallel aan contouren of dwars op contouren. Gele of oranje kleuren betekent dat er erosie plaats vindt, groene en blauwe kleuren betekent dat hier sedimentatie plaatsvindt.*

Aan de zijdes waar de terp opgesloten zit door sloten, wegen en bebouwing neemt de hoeveelheid bodem die verplaatst wordt net als bij Hogebeintum langzaam af met de tijd. Aan de noordwest helling waar geen beperkingen zijn blijft de verplaatsing van materiaal hoog. Gemiddeld erodeert er in Berlikum nog geen millimeter per 100 jaar. Lokaal kan er tot ongeveer 25 cm bodem eroderen (Figuur 4.17 en 4.18).



Figuur 4.17 *Histogram van de bodemredistributie in Berlikum als dwars op de contouren geploegd wordt. Op de X-as staat van de hoeveelheid bodem die verplaatst wordt. Op de logaritmische y-as staat het percentage van de terp met die hoeveelheid erosie/sedimentatie.*

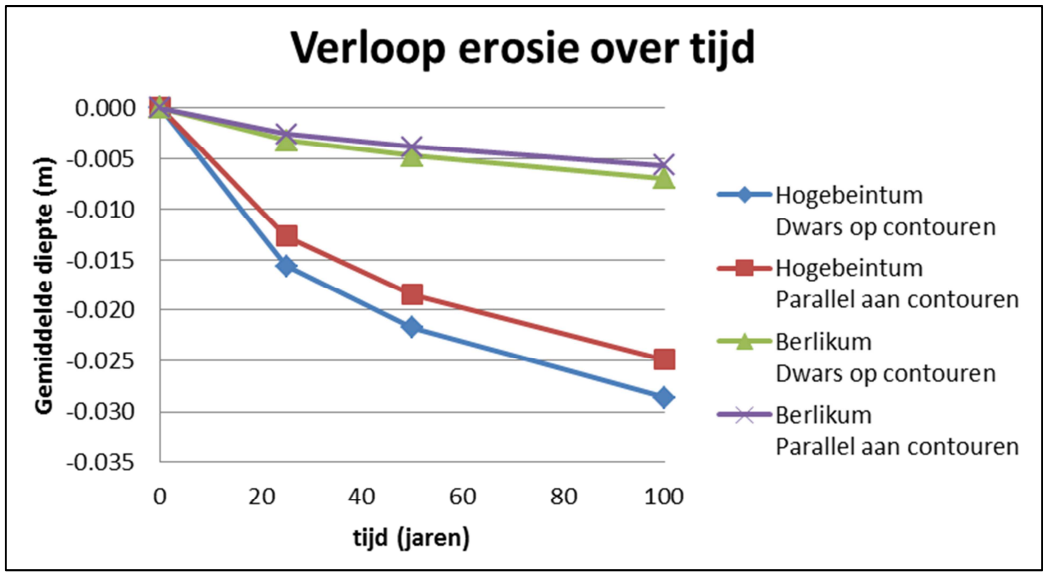


Figuur 4.18 *Histogram van de bodemredistributie in Berlikum als parallel aan de contouren geploegd wordt..*

Tabel 4.4 Erosie en depositie in Berlikum.

		Erosie		Depositie	
	Jaar	Cellen met erosie (%)	Verplaatsing per gridcel (m)	Cellen met depositie (%)	Verplaatsing per gridcel (m)
Grasland	100	78,94	0,000	14,32	0,00
Ploegen dwars over contouren	25	75,26	-0,003	16,83	0,01
	50	76,61	-0,005	18,12	0,02
	100	77,78	-0,007	18,63	0,03
Ploegen parallel aan contouren	25	75,19	-0,003	16,91	0,01
	50	76,37	-0,004	18,33	0,02
	100	77,64	-0,006	18,77	0,02

De overige cellen hebben geen verplaatsing van bodem. Verplaatsing per gridcel is de gemiddelde hoeveelheid bodem die gedurende het interval van 25, 50 of 100 jaar is verplaatst.



Figuur 4.19 *Verloop van gemiddelde erosiediepte over tijd in Hogebeintum en Berlikum bij twee verschillende ploegrichtingen.*

In Figuur 4.19 is te zien dat, in tegenstelling tot Hogebeintum, de hoeveelheid bodem die erodeert redelijk constant blijft. Doordat de terpen verschillend zijn qua gradiënten zijn de hoeveelheden erosie niet direct met elkaar te vergelijken. De vorm van de krommes laat zien dat de hoeveelheid bodem die erodeert in Berlikum redelijk constant blijft over de tijd terwijl die in Hogebeintum geleidelijk afneemt.

Discussie

Porieoppervlak

De beschikbare tijd voor dit onderzoek was een half jaar, binnen deze tijd moest alle werkzaamheden voor dit onderzoek plaatsvinden. Dit maakte dat tijd de grootste beperkende factor is bij de gekozen meetmethoden. De meest toegepaste methode om bioturbatie te bepalen is met behulp van micromorfologisch onderzoek. Hiertoe wordt van een onverstoord bodemmonster een zogenaamde slijpplaat gemaakt waardoor het mogelijk is om de bodemstructuren nauwkeurig onder de microscoop te bekijken. Echter het maken van een slijpplaat neemt ongeveer een half jaar in beslag. Het was ook geen optie om de boorkernen te scannen in een CT-scan omdat dit haast onbetaalbaar is. De enige optie die zowel betaalbaar is en resultaat geeft op korte termijn is het tellen van poriën op onverstoorde bodemprofielen.

Bij het uitvoeren van de foto-analyse zijn de foto's verkleind zodat deze sneller geanalyseerd konden worden. De nieuwe afmetingen van 1 pixel zijn 100 μm * 100 μm in werkelijkheid, dit is nog gedetailleerd genoeg voor poriën gemaakt door mesofauna en macrofauna te kunnen meten. Van de bodemfauna met een kleinere lichaamsbreedte kan gezegd worden dat ze te klein zijn om zelf poriën te maken (Paragraaf 2.2).

Het is opvallend dat de afname van het porieoppervlak en het verloop van de rondheid niet geleidelijk verloopt maar dat dit gepaard gaat met de nodige pieken. De verwachting was ook dat bijvoorbeeld het porieoppervlak op grotere diepte ongeveer gelijk zou zijn, zeker bij de zavels. Dit is echter niet het geval. Deze variatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de gekozen meetmethode niet de meest nauwkeurige is maar ook door variatie in de ondergrond; het moedermateriaal is hetzelfde maar de profielen liggen niet allemaal op dezelfde diepte. Bij het openbreken van een bodemprofiel is het breukvlak redelijk willekeurig. Bij het maken van de foto's van ruwe oppervlakken is het onvermijdelijk dat er enkele schaduwen gefotografeerd worden, ondanks de goede belichting. Aangezien de foto-analyse software ingesteld is om zwarte vlekken (op foto's zien poriën er immers zwart uit) te tellen is het onvermijdelijk dat er enkele schaduwen meegeteld zijn als porie. Op zich hoeft dit geen probleem te zijn want contouren waarvan de analist weet dat het schaduwen zijn kunnen uit de spreadsheet worden gehaald, dit is dan ook enkele malen gebeurd. Het was geen optie om dit voor alle geselecteerde contouren te doen omdat dan ongeveer 96.000 objecten (gemiddeld 1500 contouren per foto X 16 foto's per profiel X 4 profielen) handmatig geanalyseerd hadden moeten worden. Het is dus mogelijk dat er enkele schaduwen zijn meegeteld. Door de goede afwerking van het oppervlak, goede belichting en het handmatig verwijderen van de meest duidelijke schaduwen is er zoveel mogelijk aan gedaan om te voorkomen dat het berekende porieoppervlak beïnvloedt is door schaduwval. Bij het bepalen of de contouren op de juiste plaat staan is de analist een subjectieve factor, het is mogelijk dat hij bepaalde dingen 'wil zien' en zo de metingen beïnvloedt. Een oplossing is om de foto's ook door een 2^{e} persoon te laten analyseren. De analyse van alle foto's neemt ongeveer een week in beslag en er is niemand gevonden met zoveel vrije tijd dat hij/zij alle metingen wilde uitvoeren. Als compromis werden alle foto's door de auteur geanalyseerd en werden 15 random gekozen foto's geanalyseerd door een 2^{e} persoon die geen ervaring heeft met het vakgebied. Het verschil tussen beide analyses was relatief klein waardoor bij de metingen van het porieoppervlak de invloed van de analist wel aanwezig is maar dat het effect beperkt is. Als tweede controlemiddel voor het porieoppervlak werd de verzadigde doorlatendheid van de bodem gemeten. De kleigrond heeft een hoge doorlatendheid; dit is opvallend omdat van klei

bekend is dat het een lage waterdoorlatendheid heeft. De hoge waarde kan verklaard worden doordat tijdens de metingen de grondwaterstand bijna tot maaiveld stond en dat het mogelijk is dat het water via de graszode het boorgat in is gelopen. Bij de 3 betrouwbare metingen was de grondwaterstand dieper dan de onderkant van de mechanische steekboringen. De gemeten doorlatendheid is dan ook niet geschikt als controlemiddel voor de porieoppervlakmetingen omdat de laag waar de doorlatendheid nu van bekend is niet bemonsterd is. Als alternatief had de omgekeerde boorgatmethode toegepast kunnen worden, hierbij wordt geen water uit het boorgat gehaald maar water ín het boorgat gegoten en gemeten hoe snel het water weer zakt. De daarvoor benodigde materialen, zoals een emmer en een rooster om te voorkomen dat het boorgat instort, waren niet meegenomen op veldwerk omdat dergelijke diepe grondwaterstanden niet in de verwachting lagen, het veldwerk is zelfs uitgesteld vanwege te natte veldcondities.
Als gekeken wordt naar de rondheid van de poriën valt op dat bij het akkerland de poriën in de ploegvoor langgerekter zijn dan bij grasland, waarschijnlijk veroorzaakt door ploegen dat zorgt voor een onregelmatige bodemstructuur. Beneden de ploegvoor is het omgekeerd; de poriën zijn daar bij akkerland ronder dan poriën onder grasland. Dit is in overeenstemming met Pagliai (2008) die stelt dat langgerekte poriën een belangrijke rol spelen bij de verzadigde waterdoorlatendheid en dat deze poriën het meest stabiel zijn. Bij het toepassen van de gemeten rondheid moet net als bij het porieoppervlak in acht worden genomen dat de metingen op ruwe oppervlakken gedaan zijn en dat het breukvlak willekeurig is.
Naast wel of niet ploegen kan de hoeveelheid bodemfauna ook beïnvloedt worden doordat op de akkerlanden over het algemeen vaker chemicaliën worden gebruikt als bestrijdingsmiddel waardoor het plaatselijk ecosysteem verstoord raakt. Tijdens het veldwerk waren in de percelen nauwelijks molshopen te vinden, in de wegbermen daarentegen kwamen ze volop voor (zie ook Figuur 3.9). Aangezien mollen leven van bodemdieren en dus meer voorkomen in grasland hebben mollen ook een aandeel in het bioturbatie. Mollen zorgen ook voor homogenisatie van bodem maar doen dat slechts plaatselijk en zullen vooral voorkomen in lagen waar bodemfauna voorkomt en hoeven op zich geen gevaar te zijn voor de onderliggende onaangetaste lagen. Het onderzoek naar de bioturbatie heeft zich niet gericht op specifieke soorten maar op de effecten van bioturbatie in het algemeen.

XRF-metingen

Het verloop van de gemeten loodconcentraties is vergelijkbaar met het onderzoek van Fernandez et al. (2008). Opvallende zijn de pieken in het profiel. Er is gecorrigeerd voor dichtheid en niet-minerale bestanddelen dus dit kan ook niet de oorzaak zijn van de pieken. Bij waarden beneden 11 mg/kg is de meetfout van het apparaat net zo groot als de gemeten waarde, bij waarden groter dan 11 mg/kg is de meetfout ongeveer 7 mg/kg. De pieken zijn groter dan 7 mg/kg en dus niet veroorzaakt door meetfouten. Ter controle werd een tweede meting gedaan op dezelfde diepte maar op een andere plaats. Hier was de loodconcentratie weer gelijk aan de achtergrond en dus zijn deze pieken waarschijnlijk afkomstig van individuele poriën die blijkbaar onlangs gebruikt zijn. Uit de cumulatieve grafiek (Figuur 4.10) blijkt dat de totale hoeveelheid lood in grasland groter is dan in akkerland. Vanwege de korte afstand tussen de kernen kunnen ruimtelijke verschillen in depositie uitgesloten kunnen worden. Als gekeken wordt naar het percentage niet-minerale dan valt op dat deze bij de graslanden in de bovengrond groter is dan bij de akkerlanden. Lood dat uit de atmosfeer op aarde terecht komt wordt snel gebonden aan organische stof aan het oppervlak. De verschillen in totale loodconcentratie kunnen dus verklaard worden door het landgebruik. Wat opvalt is dat bij gras op

klei de hoeveelheid organische stof hoger is dan bij perceel 6 maar dat de loodconcentratie lager is. Mogelijk kan dit verklaard worden door de grondwaterstand tot op maaiveld waardoor het gebonden lood deels afgevoerd wordt via het water. Een andere mogelijkheid voor het verschil in loodconcentratie is dat het lood verdwenen is door phytoremediatie; gewassen nemen lood op uit de bodem, deze gewassen worden geoogst en inclusief het opgenomen lood afgevoerd.

Locatie voor mechanische steekboringen.

Bij het GIS-model komt alleen de terp van Hogebeintum uit, van deze terp is bekend dat er veel vergraven is. Om meer potentiele locaties te krijgen zou ervoor gekozen kunnen worden om de criteria waaraan een terp moet voldoen te versoepelen. De toegepaste regel dat een locatie zowel volgens de AMK als FAMKE terp moet zijn levert alleen Hogebeintum op, als deze regel veranderd wordt in terp op AMK of FAMKE dan komen er nog 6 locaties bij. Als de regel wordt aangepast komen er dus meer potentiele locaties bij, echter de kans dat de locatie in werkelijkheid geen terp is neemt daarmee toe. Een andere mogelijkheid is terpen (wierden) in de provincie Groningen te betrekken in het onderzoek, dit is niet gedaan omdat het Terpenproject een initiatief is van de provincie Friesland.

Tijdens het veldwerk bleek dat de berekende landgebruikskaart niet helemaal in overeenstemming is met de werkelijke situatie. Deze onnauwkeurigheid wordt grotendeels veroorzaakt doordat het landgebruik geautomatiseerd bepaald is. Alhoewel deze kaarten een hoge nauwkeurigheid hebben, is het geen garantie dat de kaarten corresponderen met de werkelijkheid. Zo is bijvoorbeeld het landgebruik op perceel 6 volgens LGN-4 ‘Bieten’ terwijl er destijds paarden graasden. Andere onnauwkeurigheden worden veroorzaakt door het gebruikte grid van 25*25m. Door het grid zijn met name de resultaten aan de randen arbitrair. Bij een terp als Hogebeintum met enkele relatief grote percelen hoeft dit geen probleem te zijn maar bij terpen met vooral kleine percelen kan dit zorgen voor onnauwkeurigheden. Een oplossing voor dit probleem is de originele topografische kaarten te gebruiken. Deze kaarten zijn alleen maar beschikbaar als afbeelding en er kunnen geen berekeningen mee worden gedaan. Als voor deze methode zou zijn gekozen dan had voor alle terpen de landgebruiksgeschiedenis handmatig opgezocht moeten worden, in dit geval een bijna onmogelijke opgave. De gebruikte gridkaarten zijn dan ook eigenlijk niet echt geschikt voor werk op perceelsniveau. Aangezien er geen kaartmateriaal bestond met daarop percelen die al lange tijd hetzelfde landgebruik hebben moest deze zelf gemaakt worden. Het gebruik van de bestaande gedigitaliseerde landgebruikskaarten was daarbij de meest efficiënte oplossing.

Vanwege wettelijke beperkingen zijn er geen profielkuilen gegraven maar mechanische steekboringen gedaan. Het voordeel van een profielkuil is dat het bemonsterde oppervlak groter is dan bij een puntmeting zoals een mechanische steekboring. Het voordeel van een boorkern is dat de analyse in het laboratorium kan worden gedaan en deze is daardoor minder afhankelijk van de omstandigheden in het veld. Op beide akkerlanden werd een mechanische steekboring gezet, net als op het grasland op de zavel. Het tweede monster voor het grasland werd gezet op het grasland op klei dat het minst verstoord was. De omstandigheden waaronder deze bodem zich ontwikkeld heeft zijn anders dan bij de andere zavelige bodems en daardoor zijn deze niet direct te vergelijken. Toch is besloten om hier een boring te maken omdat dit perceel al langer gras is dan perceel 6.
Zoals vermeld in paragraaf 3.2 zouden perceel 5 en 7 kruinige akkers moeten zijn. Als gekeken wordt naar doorsnede D-‘D dan zijn er twee duidelijke bollingen te zien. Naast handboring 5, 52 en 55 zijn nog steeds sloten te vinden en opgemerkt moet worden dat bij de sloten de dikte van de B- horizont

afneemt. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door het kruinig maken. De gegevens uit de literatuur corresponderen met de resultaten uit het veldwerk.

Modelleren van ploegerosie met LAPSUS

Er moet worden opgemerkt dat de resultaten van LAPSUS slechts een indicatie zijn van wat zou kunnen gebeuren. In werkelijkheid vinden naast verschillende manieren van ploegen nog zoveel andere processen plaats die een effect hebben op het hoogteprofiel (fixeren met cement, storten van restgrond/baggerslib, kruinig ploegen, slootjes graven, verzakking, scheuren van grasland) dat gesteld kan worden dat het hoogteprofiel ook wordt beïnvloed door beheersmaatregelen. Dit is ook de reden dat er niet langer dan 100 jaar is gemodelleerd. Het effect van het ploegerosie lijken intussen al zichtbaar te worden: op de bodemkaart zijn percelen alleen maar weergegeven als kruinig als er tenminste 70-80 cm tussen de rand en kruin zit (Stichting voor bodemkartering, 1981). De beide akkers voldoen tegenwoordig nog maar net aan deze voorwaarde.
Hoewel erosie op de hoge gedeelten zorgt voor aantasting van materiaal, worden de lager gelegen gebieden juist beter beschermd doordat er materiaal op terecht komt en deze lagen zo minder snel aangetast zullen worden.

Beste landgebruik om archeologische resten te behouden

Uit het veldwerk bleek dat bij akkerlanden de bovenste 30 cm verstoord is, bij graslanden is dit 50 cm diepte. Uit de simulaties bleek dat er bij graslanden geen erosie optreedt en dat bij het akkerland de hoeveelheid ploegerosie gemiddeld enkele millimeters per 100 jaar bedraagt maar dat er op enkele plekken tot 50 cm bodem door ploegerosie kan eroderen. De vraag welk landgebruik gekozen moet worden om de archeologische sporen het best te beschermen tegen verstoring is vooral een beleidsvraag die afhangt van het belang dat wordt gehecht aan die enkele plekken met 50 cm erosie. Bij het kiezen van het beste landgebruik zijn er twee keuzes: 1) Er wordt voorkomen dat lokaal 50 cm ploegerosie optreedt door het akkerland om te zetten in grasland. Het gevolg is dat over het gehele perceel de dikte van de verstoorde laag met ongeveer 20 cm zal toenemen tot 50 cm diepte. De tweede keuzemogelijkheid is blijven ploegen en accepteren dat er enkele plekken zijn waar tot 50 cm erosie optreedt. Daar staat tegenover dat op het overgrote deel van het perceel de dikte van de verstoorde laag 30 cm blijft en dat gedurende een eeuw ploegen slechts enkele millimeters van de onderliggende lagen beschadigd raken.

Conclusie

Bij gronden waarvan het landgebruik akkerbouw is wordt de bovenste 20-30 cm volledig gehomogeniseerd door het ploegen. Onder de ploegvoor ontstaat een ploegzool waarbij de bodem verdicht is en de aanwezige resten zullen ook hier verstoord worden. In de door ploegen beïnvloede laag komt nauwelijks bodemfauna voor. De overgang van de geploegde laag naar de onverstoorde laag verloopt abrupt. Beneden de door ploegen beïnvloede laag komt wel enige bodemfauna voor maar hun effect op de bodemstructuur is gering. Een ander gevolg van akkerbouw is ploegerosie waarbij bodem van hogere naar lagere gedeelten wordt verplaatst. Het gevolg is dat bij iedere ploeggang iets dieper in onverstoorde lagen geploegd wordt. Gemiddeld eroderen er over de gehele terp na 100 jaar ploegen maar enkele millimeters bodem. Op enkele locaties (minder dan 1 procent van de hele terp) kan tot 50 centimeter eroderen. Dit kan ertoe leiden dat men over 100 jaar lokaal in een laag ploegt die nu nog 75 cm onder maaiveld ligt. De hoeveelheid bodem die erodeert is afhankelijk van de richting waarin geploegd wordt maar ook van het hoogteverschil binnen het perceel. Bodemerosie gaat door totdat er binnen een perceel een evenwicht wordt bereikt waarbij het perceel volledig geëgaliseerd is. Perceelsgrenzen zoals afrasteringen en sloten die op een zodanige positie staan dat het hoogteverschil binnen een perceel zo klein mogelijk is verminderen de effecten van ploegerosie. Bij gronden met grasland treedt nauwelijks nog erosie op. Het effect van homogenisatie door bodemfauna daarentegen is veel groter. Bij graslanden is de bovenste 20-25 cm volledig gehomogeniseerd door bodemfauna. De mate van gehomogeniseerdheid neemt vervolgens af maar verstoring vindt plaats tot ongeveer 50 centimeter diepte.

De vraag welk landgebruik gekozen moet worden om de archeologische sporen het best te beschermen tegen verstoring is vooral een beleidsvraag die afhangt van het belang dat wordt gehecht aan die enkele plekken met 50 cm erosie.

Tijdens het veldwerk bleek dat, naast afgraving van terpaarde, allerlei beheersmaatregelen zoals het graven van ontwateringsgeultjes, kruinig ploegen, egalisatie, conserveringsmaatregelen etc. er ook voor hebben gezorgd dat terplagen verstoord zijn geraakt. Het veranderen van landgebruik van akkerland in grasland om archeologische resten te behouden is dan ook alleen maar doeltreffend als gestopt wordt met alle andere vormen van bodemverplaatsing.

Aanbevelingen

Dit onderzoek heeft zich vooral gericht op de processen die plaatsvinden op de terp van Hogebeintum, een terp met veel zavel. Als gekeken wordt naar de bodemkaart blijkt dat een terp op zavel vrij uniek is, de meeste terpen liggen op kleiigere gronden. Er zou nog verder onderzoek gedaan kunnen worden naar de effecten van bioturbatie in andere bodemsoorten. Een andere mogelijkheid voor verder onderzoek is micromorfologisch onderzoek; bij dit onderzoek zijn de slechts de poriën in de bodem geteld als indicatie voor intensiteit van het bodemleven. Als micromorfologisch onderzoek uit wordt gevoerd ontstaat er ook informatie over de processen die plaats hebben gevonden ín de poriën en de omliggende gebieden.

Stoppen met het dwars op de contouren ploegen zorgt voor een vermindering van de hoeveelheid ploegerosie. Perceelsgrenzen op de juiste positie beperken de gevolgen van ploegerosie ook. Als deze maatregelen genomen zouden worden blijven er mogelijkheden voor akkerbouw op terpen met grote hoogteverschillen binnen een perceel.

Binnen het LAPSUS model bestaat op het moment geen module voor bioturbatie. Zoals te vinden is in paragraaf 3.6 bestaat het model uit verschillende modules die het effect van landschapsveranderende processen simuleren. Bij bioturbatie vindt transport van bodemmateriaal vooral plaats in verticale richting. Het proces op zichzelf draagt daarom nauwelijks bij aan de verandering van een landschap. Bioturbatie heeft wel effect op de bodemstructuur en beïnvloedt daarmee de landschapsveranderende processen indirect. Door de poriën kan water beter infiltreren waardoor de kans op oppervlakte afstroming kleiner wordt. Door een betere gaswisseling zal de bodem ook beter rijpen en daardoor steviger worden. Deze processen zorgen ervoor dat de bodem minder gevoelig wordt voor erosie. In de huidige versie van het LAPSUS model kan landgebruik onder andere gebruikt worden om onderscheidt te maken tussen wel of niet ploegerosie en de gevoeligheid voor erosie (K_fac). Zoals hierboven beargumenteerd zal sterke bioturbatie ervoor zorgen dat een bodem minder snel zal eroderen. Het implementeren van bioturbatie in LAPSUS kan dus gebeuren door K_fac aan te passen aan het porieoppervlak. Zoals te lezen is in dit rapport hangt het porieoppervlak af van het landgebruik.

Enkele voor dit onderzoek toegepaste veldwerkmethoden zijn gekozen vanwege hun resultaat op korte termijn: er zijn boorkernen gebruikt in plaats van profielkuilen en er is gekozen om beschermde gebieden niet mee te nemen vanwege de vergunningaanvraag. Bij een onderzoek waarbij meer tijd is om vergunningsprocedures af te wachten, bijvoorbeeld een MSc-thesis die niet voltijd wordt uitgevoerd, kan het aantal potentiele locaties vergroot worden, kunnen profielkuilen worden gemaakt en kunnen er slijpplaten worden gemaakt. Daarnaast heeft dit onderzoek zich beperkt tot terpen in Friesland. Bij een vervolgonderzoek zouden terpen/wierden in Groningen ook mee kunnen worden genomen. Vanwege de zandigere gronden in Groningen is de verwachting dat daar meer terpen zijn met akkerbouw en dus meer potentiele locaties.

De foto-analyse methode is een methode die eenvoudig, snel en goedkoop kan worden uitgevoerd. Door de analyse op de juiste manier uit te voeren hoeft het feit dat de meting subjectief is geen beperking te zijn. Door enkele beperkingen is het lastig om met deze techniek een nauwkeurige porositeitsmeting te doen. Het gemeten porieoppervlak kan daarom slechts dienen als een indicatie van de porositeit. Dit hoeft geen probleem te zijn zolang er nauwkeurig referentiemateriaal is. Als van het geanalyseerde materiaal slijpplaten of CT-scans gemaakt worden en er nauwkeurige

informatie bekend is, kan de foto-analyse techniek dienen als en interpolatietechniek. Bijvoorbeeld: men wil de porositeit van een boorkern bepalen. Allereerst wordt de hele boorkern nauwkeurig gefotografeerd en gefoto-analyseerd. Vervolgens worden slijpplaten gemaakt waarna een betrouwbare porositeitsmeting wordt gedaan. Door de gemeten porositeit te vergelijken met de corresponderende porieoppervlakmeting wordt het verschil tussen beide metingen duidelijk. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de porositeit van de gedeelten waar geen slijpplaat van is.

Literatuur

Abramoff, M.D., Magalhaes, P.J., Ram, S.J., 2004. Image Processing with ImageJ. Biophotonics International, 11(7), pp. 36-42.

Alterra, 2012. Achtergronden bij LGN-bestanden, website, http://www.alterra.wur.nl/NL/Producten/GIS-bestanden/LGN/intro_achtergronden/, (april 2012).

Archis (2011). Uitgebreide Rapportage Monumenten. Monumentnr.: 532; Hogebeintum-Dorp, (30-11-2011).

Bakker, H. de, Marsman, B.A., 1981. Kruinige percelen. Boor en spade 20, pp. 9-38.

Bazelmans, J., Groenendijk, H., Langen, G.J. de, Nicolay, J.A.W., Nieuwenhof, A., 2009. De late prehistorie en protohistorie van holoceen Noord-Nederland. Nationale Onderzoeksagenda Archeologie, versie 2.0. Amersfoort, Hoofdstuk 12.

Boels, D., Zweers, A.J., 2001. Evaluatie actief bodembeheer Krimpenerwaard; Fase 1, verkennend onderzoek landbouwkundige risico's. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 145.

Bouché, M.B., 1981. Contribution des lombriciens aux migrations d'éléments dans les sols tempérés. Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, 303, pp. 145–153.

Cultureel Erfgoed, 2011. Friesland voorop met bescherming waardevolle terpen. Persbericht Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, 27 januari 2011.

Curry, J.P., 1989. The influence of invertebrates on soil fertility and plant growth in temperate grasslands. In: Clarholm, M., Bergström, L., Ecology of arable land, Kluwer Academic Publishers, pp. 173-184.

Elzinga, G., 1988. Enkele opmerkingen over bescherming, behoud en herstel van terpen. In: Bierma, M., Clason, A.T., Kramer, E., Langen, G.J. de, Terpen en wierden in het Fries-Groningse kustgebied. Groningen, pp. 20-30.

FAMKE, 2012. website, http://www.fryslan.nl/sjablonen/1/infotype/webpage/view.asp?objectID=34222, (april 2012).

Fernandez, C., Monna, F., Labanowski, J., Loubet, M., Oort, F. van, 2008. Anthropogenic lead distribution in soils under arable land and permanent grassland estimated by Pb isotopic compositions. Environmental Pollution, 156, pp. 1083-1091.

Gabet, E.J., Reichman, O.J., Seabloom, E.W., 2003. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. Annual review of earth and planetary sciences, 31, pp. 249-273.

Hazeu, G.W., 2005. Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5). Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Wageningen, Alterra. Alterra-report 1213.

Hazeu, G.W., Schuiling, C., Dorland, G.J., Oldengarm, J., Gijsbertse, H.A., 2010. Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland versie 6 (LGN6). Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2012.

Heerd, R.M. van, Kuijlaars, E.A.C., Teeuw, M.P., Zand, R.J. van 't, 2000. Productspecificatie AHN. Rapport MDTGM 2000.13, Delft, Rijkswaterstaat, Adviesdienst Geo-informatie en ICT.

Holst, A.F. van, 1968. De bodemgesteldheid van het ruilverkavelingsgebied Ferwerderadeel. Wageningen, Stichting voor bodemkartering, Rapport 687.

Huisman, D.J., Vermeulen, F.J.H., Baker, J., Veldkamp, A., Kroonenberg, S.B., Klaver, G.Th., 1997. A geological interpretation of heavy metal concentrations in soils and sediments in the southern Netherlands. Journal of Geochemical Explorations, 59, pp. 163-174.

Inperc, 2012. Website, Roundness, http://inperc.com/wiki/index.php?title=Roundness, (april, 2012).

Kladivko, E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. Soil and Tillage Research, 61(1-2), pp. 61-76.

KNMI, 2000. Gemiddelde jaarlijkse neerslagsom. Langjarige gemiddelden en extremen, tijdvak 1971-2000. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.

Kramer, H., Dorland, G. van, 2009. Historisch Grondgebruik Nederland 1990, Een landelijke reconstructie van het grondgebruik rond 1990. Wageningen, Alterra, Alterra -rapport 1327.

Kooistra, M.J., Pulleman, M.M., 2010. Features related to faunal activity. In: Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F., Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, Silsoe, UK, pp. 397-418.

LAPSUS, 2012. Technical information, website, http://www.lad.wur.nl/UK/Research/LAPSUS/Tech_Info/, (april 2012).

Langen, G.J. de, Nierstrasz, E., 1999. Provincie Fryslân: veldkarteringen Westergo 1992-1996, Amsterdam (RAAP Rapport 299 / BOM Rapport 23).

Müller-Lemans, H., Dorp, F. van, 1996. Bioturbation as a mechanism for radionuclide transport in soil: Relevance of earthworms. Journal of Environmental Radioactivity, 31(1), pp 7-20.

Noordman, E., Thunnissen, H.A.M. en H. Kramer, 1997. Vervaardiging en nauwkeurigheid van het LGN2-grondgebruiksbestand. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 515.

Oades, J.M., 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. Geoderma, 56, pp. 377-400.

Oosterbaan, R.J., Nijland, H.J., 1994. Determining the saturated hydraulic conductivity. In: Ritzema, H.P., Drainage Principles and Applications. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 16, second revised edition, Wageningen, Hoofdstuk 12.

Muysen, W. van, Govers, G., Oost, K. van, 2002. Identification of important factors in the process of tillage erosion: the case of mouldboard tillage. Soil and Tillage Research 65, pp. 77–93.

Muysen, W. van, Oost, K., van, Govers, G., 2006. Soil translocation resulting from multiple passes of tillage under normal field operating conditions. Soil and Tillage Research 87, pp. 218-230.

Oost, K. van, Govers, G., Alba, s. de, Quine, T.A., 2006. Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. Progress in Physical Geography 30(4), 443-466.

Pagliai, M., Kutilek, M., 2008. Soil micromorphology and hydraulics. In: Kapur, S., Mermut, A., Stoops, G., New trends in soil micromorphology. Springer, Berlijn, pp. 5-18.

Pagliai, M., Pellegrini, S., Vignozzi, N., Rousseva, S., Grasselli, O., 2000. The Quantification of the Effect of Subsoil Compaction on Soil Porosity and Related Physical Properties under Conventional to Reduced Management Practices. Advances in GeoEcology, 32, pp. 305-313.

Rapport voor de ruilverkaveling Ferwerderadeel, 1971. Rapport betreffende ruilverkaveling van gronden in de gemeenten Ferwerderadeel, Leeuwarderadeel en Dantumadeel, genaamd “Ferwerderadeel”, Utrecht.

Roduit, N., 2012. JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.2.7. http://www.jmicrovision.com (februari 2012).

Saveliev, P., 2011. A graph, non-tree representation of the topology of a gray scale image. In: Astola, J.T., Egiazarian, K.O., Image Processing: Algorithms and Systems IX. Proceedings of SPIE, 7870, Bellingham, WA 2011.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.P., Bruemmer, G., Fischer, W.R., Renger, M., Strebel, O., 1989. Lehrbuch der Bodenkunde. Enke Verlag, Stuttgart.

Schoorl, J.M., Veldkamp, A., and Bouma, J., 2002, Modelling water and soil redistribution in a dynamic landscape context. Soil Science Society of America Journal 66, pp. 1610-1619.

Sloos, A., Dalen, J.H. van, Boekenoogen, P.M., 2009. Handleiding voor de Archeologische Monumenten Kaart. Amersfoort, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

Sonneveld, M.P.W. Schoorl, J.M.,and A. Veldkamp, 2006. Evaluating The Fate Of Phosphorus In Apparent Homogeneous Landscapes Using a High-Resolution DEM. Geoderma 133, pp. 32 - 42.

Stichting voor Bodemkartering, 1981. Bodemkaart van Nederland 1:50.000: toelichting bij de kaartbladen 6 West Leeuwarden en 6 Oost Leeuwarden en het vaste land van de kaartbladen 2 West Schiermonnikoog en 2 Oost Schiermonnikoog. Wageningen, Stiboka.

Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson. J.M., 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Blackwell Scientific, Oxford.

Thunnissen, H.A.M. en Noordman, E., 1996. Classification methodology and operational implementation of the land cover database of the Netherlands. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 124.

Vleeschouwer, F. de, Gérard, L., Goormaghtigh, C., Mattielli, N., Roux, G. le, Fagel, N., 2007. Atmospheric lead and heavy metal pollution records from a Belgian peat bog spanning the last two millenia: Human impact on a regional to global scale. Science of the Total Environment, 377, pp 282-295.

Vos, P.C., Lange, G.J. de., 2010. Geolandschappelijk onderzoek: de vorming van het landschap voor en tijdens de terpbewoning en het ontstaan van de Lauwerszee. Naar Taayke, E., 1996. Die Einheimische Keramik der nördlichen Niederland. 600v.Chr bis 300n.Chr (dissertatie Rijksuniversiteit Groningen). In: Nicolay, J.A.W., Terpenbewoning in oostelijk Friesland. Groningen, pp. 63-83.

Vries, F. de, Groot, W.J.M. de, Hoogland, T., Denneboom, J., 2003. De bodemkaart van Nederland digitaal; Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 811.

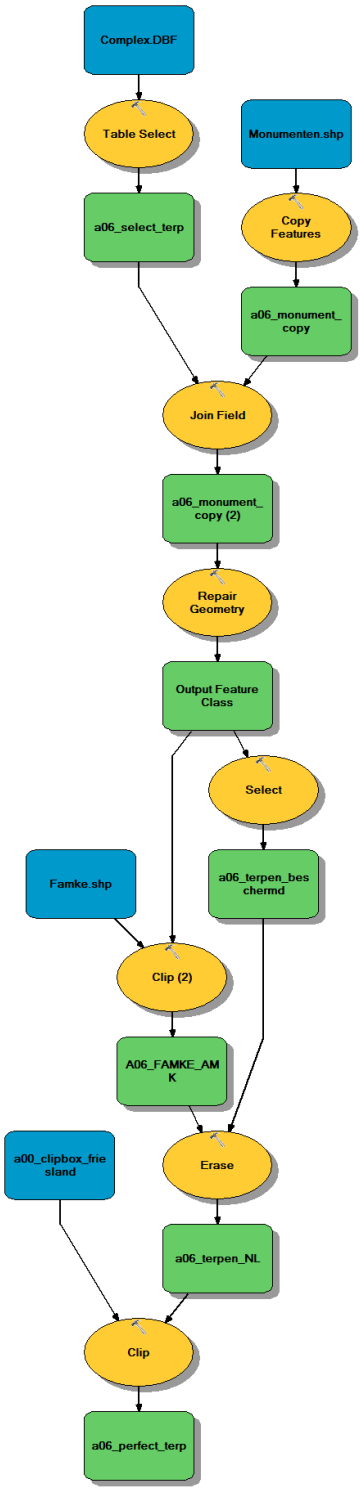
Walling, D.E., He, Q., 1999. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. Soil Science Society of America Journal 63, pp. 1404-1412.

Wit, A.J.W. de, Heijden, Th.G.C. van der, Thunnissen, H.A.M., 1999. Vervaardiging en nauwkeurigheid van het LGN3-grondgebruiksbestand. Wageningen, DLO-Staring Centrum, Rapport 663.

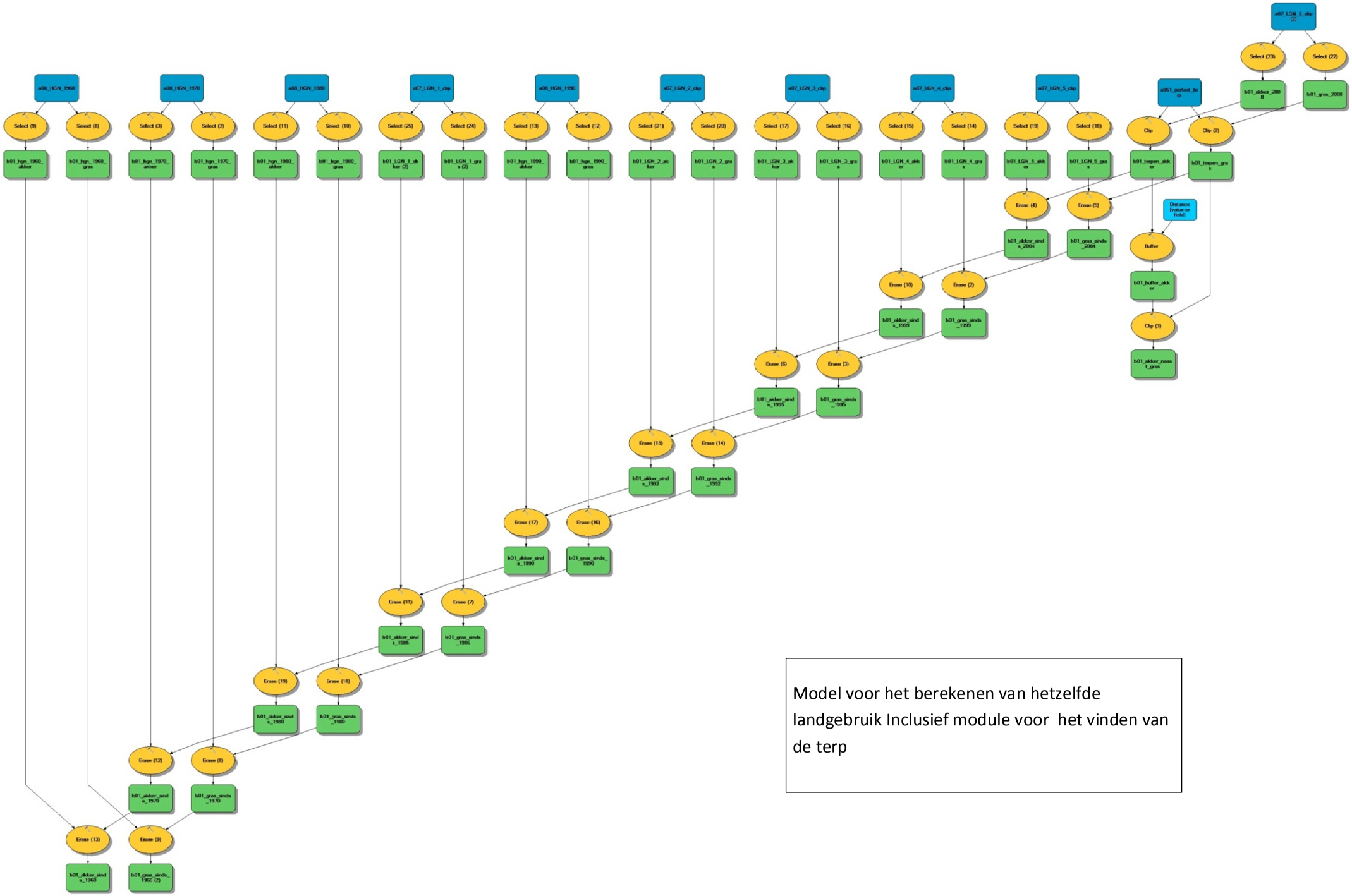
Wuest, S.B., 2001. Soil biopore estimation: effects of tillage, nitrogen, and photographic resolution. Soil & Tillage Research, 62, pp. 111-116.

Bijlagen

Bijlage 1: GIS-modellen



Kaart met geschikte terpen

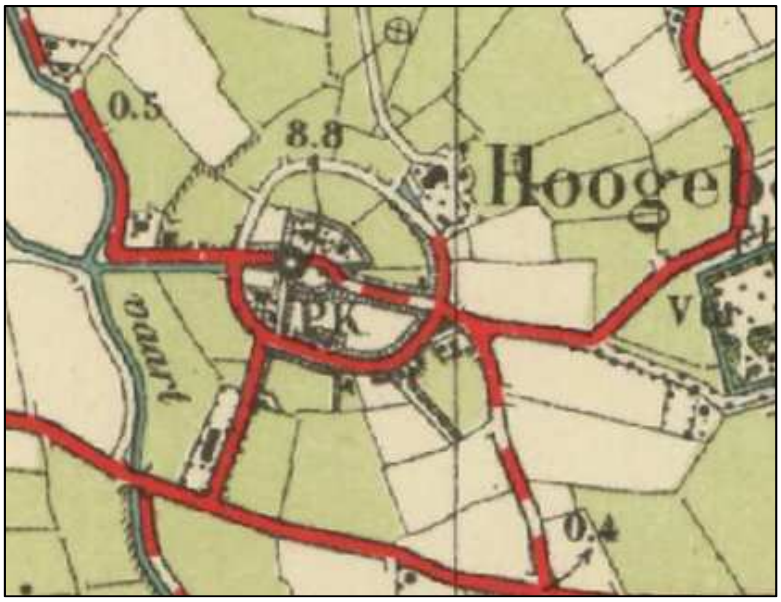


Model voor het berekenen van hetzelfde landgebruik Inclusief module voor het vinden van de terp

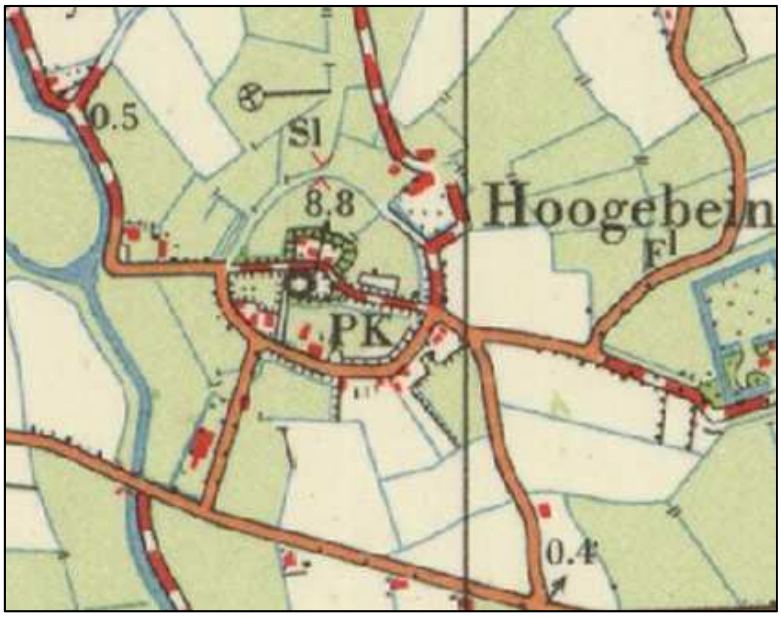
Bijlage 2: Topografische kaarten van Hogebeintum

Kaartfragment van de Topografische Militaire Kaart ‘Marum/Holwerd’ uit 1854

Kaartfragment van de Topografische kaart 1:25.000 Kaartnummer: 058 uit 1931



Kaartfragment van de Topografische kaart 1:25.000 Kaartnummer: 06A uit 1952



Kaartfragment van de Topografische kaart 1:25.000 Kaartnummer: 06A uit 1961

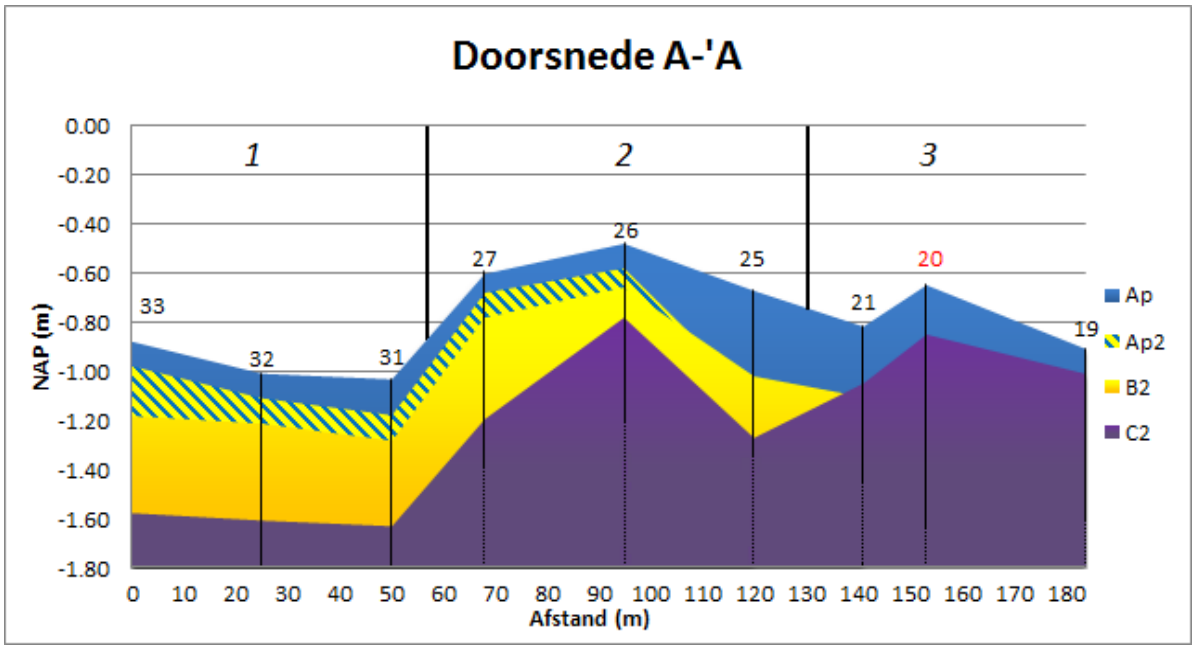
Kaartfragment van de Topografische kaart 1:25.000 Kaartnummer: 06A uit 1970

Kaartfragment van de Topografische kaart 1:25.000 Kaartnummer: 06A uit 1982

Kaartfragment van de Topografische kaart 1:25.000 Kaartnummer: 06A uit 1992

Bijlage 3: Boorbeschrijving en dwarsdoorsneden

Doorsnede A-‘A



Boring 33

185698	594634		-0.880	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	bouwvoor	4/2 10YR	ja	
10	30	Ap2	menging Ap en B2	5/2 10YR	ja	
30	70	B2	klei, deels gerijpt	6/2 10YR	ja	
70	150	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	nee	

Boring 32

185711	594656		-1.011	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	Bouwvoor	4/2 10YR	ja	
10	20	Ap2	menging Ap en B2	5/2 10YR	ja	
20	60	B2	klei, gerijpt	6/2 10YR	ja	
60	100	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	ja	stratifcatie van klei en slib

Boring 31

185725 594677 -1.031 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	4/2 10YR	ja	
15	25	Ap2	menging Ap en B2	5/2 10YR	ja	
25	40	B2	klei, gerijpt	6/2 10YR	ja	
40	60	B2	klei, gerijpt	6/1 10YR	ja	
60	80	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	ja	
80	150	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	nee	

Boring 27

185735 594692 -0.596 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	8	Ap	bouwvoor	3/2 10YR	ja	worm
8	18	Ap2	menging van Ap en B2	5/2 10YR	ja	
18	60	B2	klei, gerijpt	6/2 10YR	nee	
60	80	C2	klei, ongerijpt	5B 5/1	nee	

Boring 26

185750 594714 -0.476 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	bouwvoor	3/2 10YR	ja	
10	30	Ap2	menging van Ap en B2	5/2 10YR	ja	
30	70	C2	klei, ongerijpt	5B 5/1	nee	

Boring 25

185772 594726 -0.668 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
35	60	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	ja	
60	70	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	

Boring 21

185791 594736 -0.817 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	23	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	
23	70	C2	klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	Niet dieper door grondwater

Boring 20

185802 594740 -0.649 NAP (m)

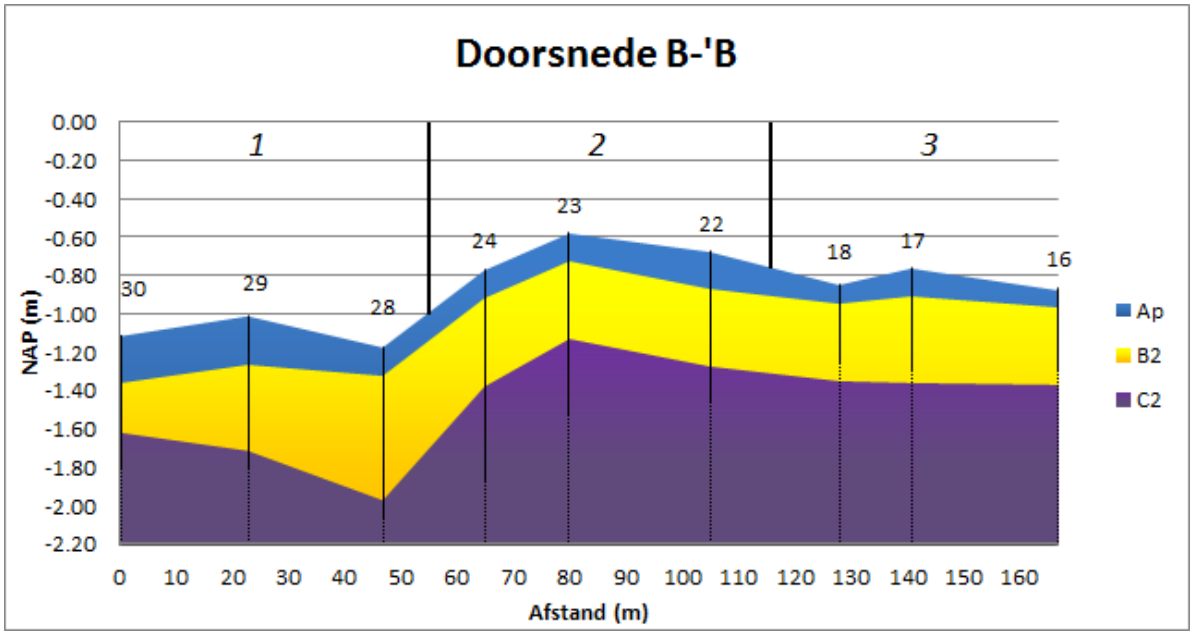
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	
20	100	C2	klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	Niet dieper door grondwater

Boring 19

185831 594750 -0.907 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	
10	70	C2	klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	Niet dieper door grondwater

Doorsnede B-‘B



Boring 30

185714 594626 -1.113 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	25	Ap	bouwvoor	4/2 10YR	ja	
25	50	B2	klei, gerijpt	6/1 10YR	ja	
50	70	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	nee	

Boring 29

185724 594647 -1.013 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	25	Ap	bouwvoor	3/2 10YR	ja	
25	70	B2	klei, gerijpt	5/2 10YR	ja	
70	80	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	ja	

Boring 28

185734 594669 -1.173 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	bouwvoor	3/2 10YR	ja	
15	80	B2	klei, gerijpt	7/2 10YR	ja	
80	100	C2	klei, ongerijpt	7/2 10YR	ja	

Boring 24

185745 594683 -0.771 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	flinke stukken baksteen
15	60	B2	klei, gerijpt	5/2 5Y	ja	
70	120	C2	klei, ongerijpt	2/0 2,5Y	nee	stratificatie van ongerijpte klei en slib

Boring 23

185754 594695 -0.575 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	zeer bruin
15	55	B2	klei, gerijpt	5/2 5Y	ja	zeer sterke roestvorming
55	100	C2	klei, ongerijpt	5/2 5Y	nee	roestvorming

Boring 22

185771 594713.213 -0.672 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	zeer bruin
20	60	B2	klei, gerijpt	5/2 5Y	ja	grijzer dan Ap
60	80	C2	klei, ongerijpt	5/2 5Y	ja	gley

Boring 18

185793 594721 -0.846 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	zeer bruin
10	50	B2	klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	Enkele wormgang op grote diepte.
						Niet dieper door grondwater

Boring 17

185805 594728 -0.757 NAP (m)

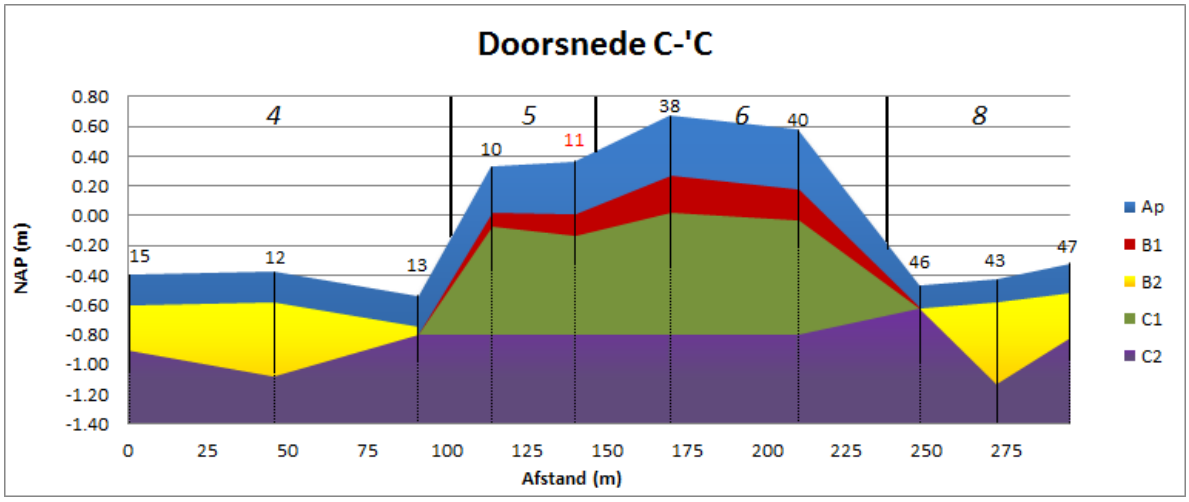
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	zeer bruin
15	60	B2	klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	Enkele wormgang op grote diepte.
						Niet dieper door grondwater

Boring 16

185829	594737	-0.870	NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	Bouwvoor	2/1 10YR	ja	zeer bruin
10	50	B2	klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	Enkele wormgang op grote diepte. Niet dieper door grondwater

Doorsnede C-‘C



Boring 15

185777	594507	-0.401	NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
20	50	B2	Klei, gerijpt	5/1 10YR	ja	
50	70	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	nee	

Boring 12

185803	594469	-0.377	NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
20	70	B2	Klei, gerijpt	5/1 10YR	nee	

Boring 13

185834 594436 -0.541 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
20	35	B2	Klei, gerijpt	5/1 10YR	ja	
35	60	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	nee	

Boring 10

185854 594424 0.327 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
30	40	B1	Zavel, gerijpt	6/1 10YR	nee	
40	70	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 11

185879 594416 0.365 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
35	50	B1	Zavel, gerijpt	6/1 10YR	nee	
50	70	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 38

185905 594401 0.673 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	40	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
40	65	B1	Zavel, gerijpt	4/2 10YR	ja	worm op 50 cm
65	110	C1	Zavel, ongerijpt	7/1 10YR	ja	

Boring 40

185944 594410 0.575 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	40	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
40	60	B1	Zavel, gerijpt	4/2 10YR	ja	
60	80	C1	Zavel, ongerijpt	7/1 10YR	ja	

Boring 46

185978 594427 -0.474 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
15	60	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	

Boring 43

185995 594443 -0.433 NAP (m)

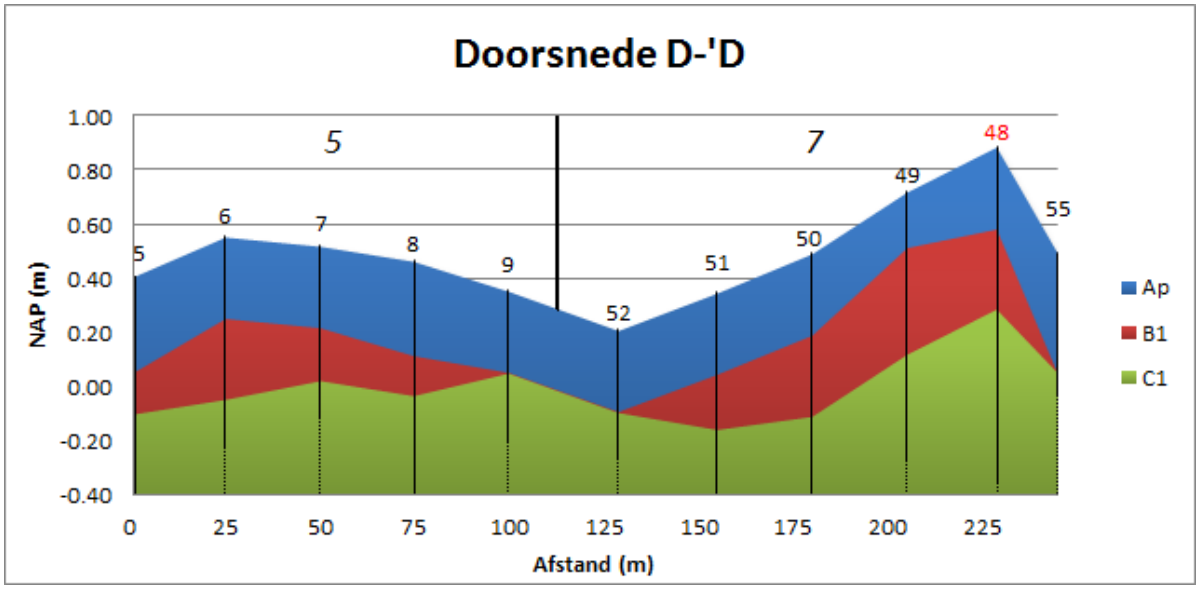
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
15	70	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	ja	
70	100	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	

Boring 47

186013 594459 -0.322 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
20	50	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	nee	
50	70	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	

Doorsnede D-‘D



Boring 5

185802	594398		0.401	NAP (m)	
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
35	50	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
50	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 6

185824	594386		0.552	NAP (m)	
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	Plantenr., worm
30	60	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
60	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 7

185846	594374		0.524	NAP (m)	
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
30	50	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
50	70	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 8

185868 594361 0.469 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
35	50	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
60	120	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 9

185891 594351 0.352 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
30	60	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 52

185920 594347 0.209 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
30	50	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 51

185945 594347 0.347 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
30	50	B1	Zavel, gerijpt	6/2 10YR	nee	
50	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	

Boring 50

185971 594352 0.490 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
30	60	B1	Zavel, gerijpt	6/2 10YR	nee	
60	120	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	ja	

Boring 49

185994	594361		0.718	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
20	60	B1	Zavel, gerijpt	6/2 10YR	nee	veel schelpen
60	100	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	veel schelpen

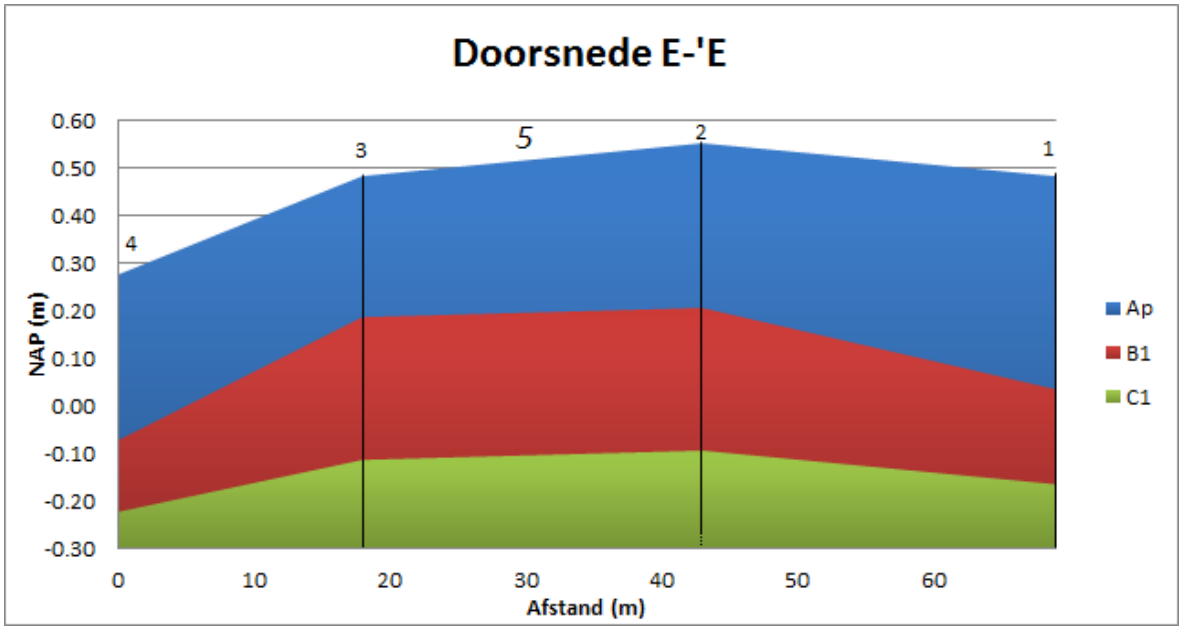
Boring 48

186016	594370		0.886	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
30	60	B1	Zavel, gerijpt	6/2 10YR	nee	
60	120	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	gley

Boring 55

186030	594377		0.495	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	45	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
45	60	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	

Doorsnede E-‘E



Boring 4

185878	594422		0.279	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
35	50	B1	Zavel, gerijpt	6/1 10YR	nee	
50	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 3

185870	594405		0.486	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
30	55	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
55	60	B1	Zavel, gerijpt	7/4 10YR	nee	gelige laag in de B
65	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

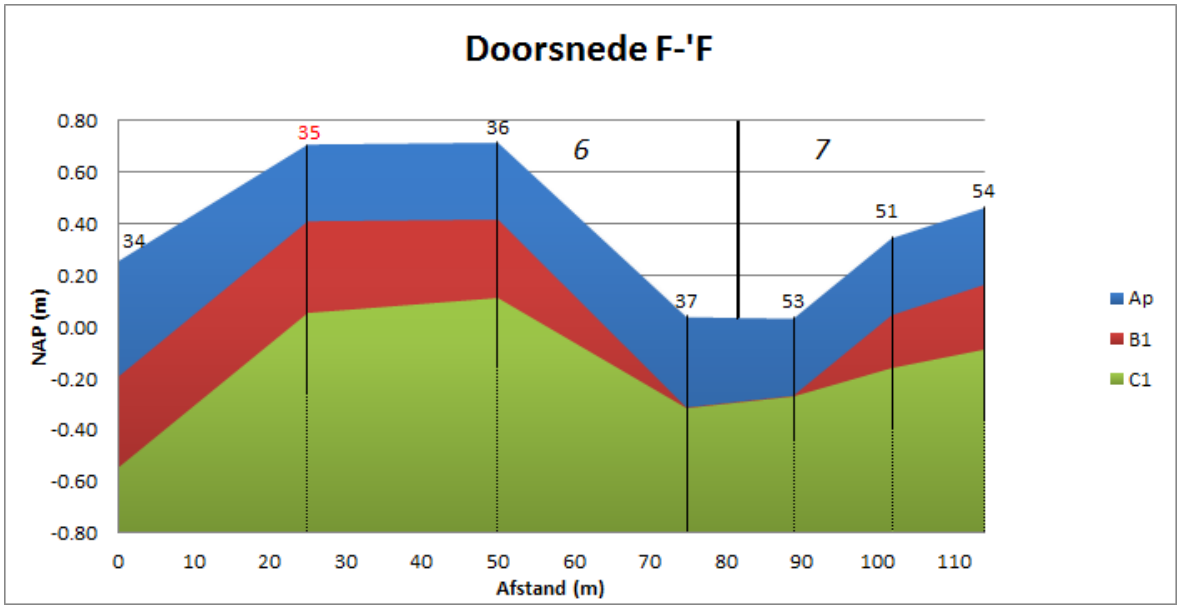
Boring 2

185861	594382		0.556	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
35	65	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
65	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Boring 1

185850	594358		0.487	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	45	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	plantenresten
45	65	B1	Zavel, gerijpt	5/1 10YR	nee	
65	120	C1	Zavel, ongerijpt	6/1 10YR	nee	lichtgrijs, schelpen

Doorsnede F-‘F



Boring 34

185908	594442		0.257	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	45	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	nee	Kale plek
45	80	B1	Zavel, gerijpt	4/2 10YR	nee	gley vlekken
80	120	C1	Zavel, ongerijpt	7/1 10YR	nee	

Boring 35

185918	594419		0.708	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
30	65	B1	Zavel, gerijpt	4/2 10YR	ja	
65	100	C1	Zavel, ongerijpt	7/1 10YR	ja	

Boring 36

185927	594396		0.717	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
30	60	B1	Zavel, gerijpt	4/2 10YR	ja	Worm 40cm
60	90	C1	Zavel, ongerijpt	7/1 10YR	ja	

Boring 37

185936 594372 0.041 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	35	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	
35	75	C1	Zavel, ongerijpt	7/1 10YR	ja	

Boring 53

185940 594359 0.034 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
30	50	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	

Boring 51

185945 594347 0.347 NAP (m)

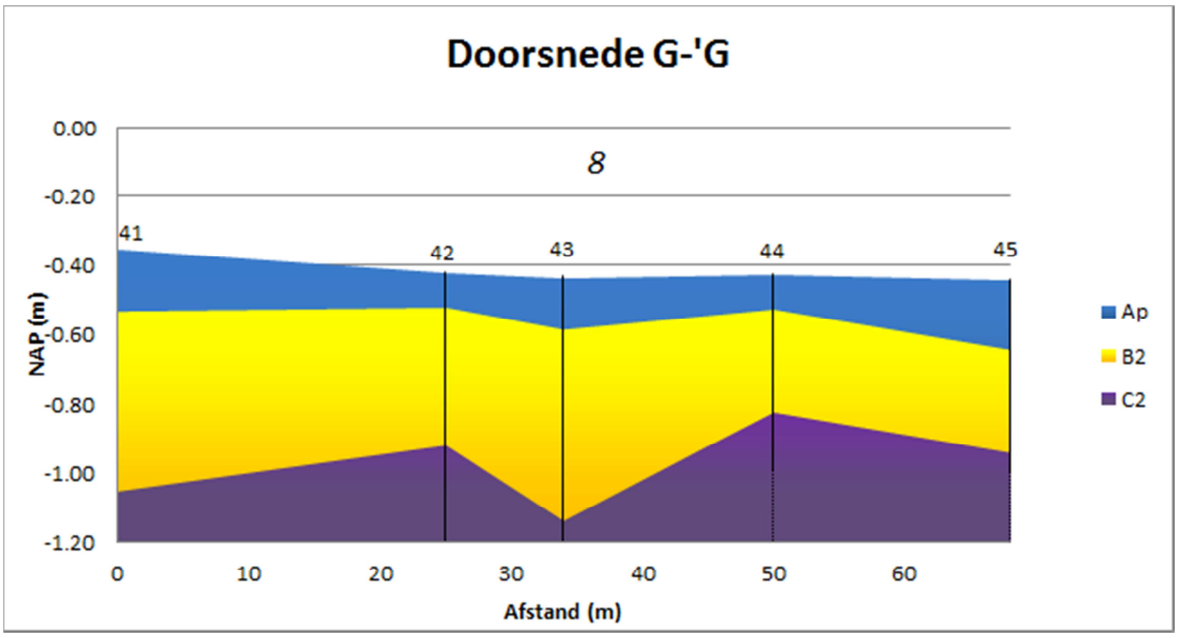
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
30	50	B1	Zavel, gerijpt	6/2 10YR	nee	
50	80	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	

Boring 54

185950 594336 0.465 NAP (m)

Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	30	Ap	Bouwvoor	4/1 10YR	ja	gewasresten
30	55	B1	Zavel, gerijpt	6/2 10YR	nee	
55	90	C1	Zavel, ongerijpt	6/2 10YR	nee	

Doorsnede G-‘G



Boring 41

185978	594472		-0.351	NAP (m)	
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	18	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
18	70	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	nee	
70	120	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	nee	

Boring 42

185991	594451		-0.421	NAP (m)	
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
10	50	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	ja	
50	80	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	nee	

Boring 43

185995	594443		-0.433	NAP (m)	
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	15	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
15	70	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	ja	gley
70	100	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	geen gley

Boring 44

186003	594429		-0.425	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	10	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
10	40	B2	Klei, gerijpt	4/2 10YR	ja	gley
40	60	C2	Klei, ongerijpt	5/2 10YR	ja	geen gley

Boring 45

186012	594413		-0.442	NAP (m)		
Diepte onder maaiveld (cm)		Code	Beschrijving	Kleur	Beworteld	Opmerkingen
0	20	Ap	Bouwvoor	3/2 10YR	ja	
20	50	B2	Klei, gerijpt	5/2 10YR	ja	gley
50	60	C2	Klei, ongerijpt	5B 5/1	ja	geen gley

Bijlage 4: Doorlatendheidmetingen

Boorgatnummer: **2**			Datum	1-3-2012	Condities	Mistig, geen neerslag	
Lb	117	cm					
Lb-Lw	90	cm					
Lw	27	cm					
h0	128.8	cm					
H0 (cm)	128.8		rw (cm)	3.5		lw(cm)	27
t(s)	ht (cm)	yt (cm)	dt(s)	y (cm)	dy (cm)	C	k (m/d)
0	136	7.2					
			60	7.15	0.1	63.70	0.11
60	135.9	7.1					
			60	7.05	0.1	64.47	0.11
120	135.8	7					
			60	6.95	0.1	65.26	0.11
180	135.7	6.9					
			60	6.9	0	65.66	0.00
240	135.7	6.9					
			60	6.9	0	65.66	0.00
300	135.7	6.9					
			60	6.9	0	65.66	0.00
360	135.7	6.9					
			60	6.875	0.05	65.86	0.05
420	135.65	6.85					
			60	6.825	0.05	66.28	0.06
480	135.6	6.8					
			60	6.8	0	66.48	0.00
540	135.6	6.8					
			60	6.8	0	66.48	0.00
600	135.6	6.8					
			60	6.75	0.1	66.91	0.11
660	135.5	6.7					
			60	6.7	0	67.33	0.00
720	135.5	6.7					
			60	6.7	0	67.33	0.00
780	135.5	6.7					
			60	6.7	0	67.33	0.00
840	135.5	6.7					
			60	6.65	0.1	67.77	0.11
900	135.4	6.6					
			60	6.6	0	68.21	0.00
960	135.4	6.6					
						kgem	0.04

Boorgatnummer: **20**			Datum	1-3-2012	Condities	Mistig, geen neerslag	
Lb	97	cm			Grondwater stond bijna tot maaiveld		
Lb-Lw	12	cm					
Lw	85	cm					
h0	45.2	cm					

H0 (cm)	45.2		rw (cm)	3.5		lw(cm)	85
t(s)	ht (cm)	yt (cm)	dt(s)	y (cm)	dy (cm)	C	k (m/d)
0	75	29.8					
			0.1	28.8	2	8.54	170.70
0.1	73	27.8					
			0.1	26.8	2	9.04	180.88
0.2	71	25.8					
			0.1	24.8	2	9.64	192.77
0.3	69	23.8					
			0.1	22.8	2	10.34	206.83
0.4	67	21.8					
			0.1	21.3	1	10.96	109.58
0.5	66	20.8					
			0.1	20.3	1	11.42	114.21
0.6	65	19.8					
			0.1	19.3	1	11.93	119.33
0.7	64	18.8					
			0.1	18.3	1	12.50	125.03
0.8	63	17.8					
			0.1	17.3	1	13.14	131.39
0.9	62	16.8					
			0.1	16.3	1	13.85	138.54
1	61	15.8					
			0.1	15.3	1	14.66	146.64
1.1	60	14.8					
			0.1	14.3	1	15.59	155.89
1.2	59	13.8					
			0.1	13.3	1	16.65	166.54
1.3	58	12.8					
			0.1	12.3	1	17.89	178.94
1.4	57	11.8					
			0.1	11.3	1	19.35	193.54
1.5	56	10.8					
			0.1	10.3	1	21.10	211.00
1.6	55	9.8					
						kgem	158.86

Boorgatnummer: **35**			Datum	1-3-2012	Condities	Mistig, geen neerslag	
Lb	120	cm					
Lb-Lw	62	cm					
Lw	58	cm					
h0	100	cm					
H0 (cm)	100		rw (cm)	3.5		lw(cm)	58
t(s)	ht (cm)	yt (cm)	dt(s)	y (cm)	dy (cm)	C	k (m/d)
0	106	6					
			60	5.75	0.5	48.21	0.40
60	105.5	5.5					
			60	5.25	0.5	52.56	0.44
120	105	5					
			60	4.75	0.5	57.83	0.48
180	104.5	4.5					
			60	4.25	0.5	64.34	0.54
240	104	4					
			60	3.85	0.3	70.78	0.35
300	103.7	3.7					
			60	3.6	0.2	75.52	0.25
360	103.5	3.5					
			60	3.45	0.1	78.70	0.13
420	103.4	3.4					
			60	3.35	0.1	80.98	0.13
480	103.3	3.3					
			60	3.25	0.1	83.40	0.14
540	103.2	3.2					
			60	3.15	0.1	85.97	0.14
600	103.1	3.1					
			60	3.05	0.1	88.71	0.15
660	103	3					
			60	2.95	0.1	91.63	0.15
720	102.9	2.9					
			60	2.85	0.1	94.76	0.16
780	102.8	2.8					
			60	2.75	0.1	98.12	0.16
840	102.7	2.7					
			60	2.65	0.1	101.74	0.17
900	102.6	2.6					
			60	2.55	0.1	105.63	0.18
960	102.5	2.5					
						kgem	0.25

Boorgatnummer: **50**			Datum	1-3-2012	Condities	Mistig, geen neerslag	
Lb	120	cm					
Lb-Lw	75	cm					
Lw	45	cm					
h0	108.5	cm					
H0 (cm)	108.5		rw (cm)	3.5		lw(cm)	45
t(s)	ht (cm)	yt (cm)	dt(s)	y (cm)	dy (cm)	C	k (m/d)
0	118	9.5					
			60	9	1	37.81	0.63
60	117	8.5					
			60	8	1	42.02	0.70
120	116	7.5					
			60	7.25	0.5	45.94	0.38
180	115.5	7					
			60	7	0	47.44	0.00
240	115.5	7					
			60	7	0	47.44	0.00
300	115.5	7					
			60	6.85	0.3	48.39	0.24
360	115.2	6.7					
			60	6.7	0	49.39	0.00
420	115.2	6.7					
			60	6.6	0.2	50.07	0.17
480	115	6.5					
			60	6.45	0.1	51.15	0.09
540	114.9	6.4					
			60	6.35	0.1	51.89	0.09
600	114.8	6.3					
			60	6.25	0.1	52.66	0.09
660	114.7	6.2					
			60	6.15	0.1	53.45	0.09
720	114.6	6.1					
			60	6.05	0.1	54.27	0.09
780	114.5	6					
			60	5.95	0.1	55.11	0.09
840	114.4	5.9					
			60	5.85	0.1	55.99	0.09
900	114.3	5.8					
			60	5.75	0.1	56.90	0.09
960	114.2	5.7					
						kgem	0.18