



ALTEERRA

WAGENINGEN UR



# Aanvullende bodemfysische gegevens voor BIS-Nederland

Alterra-rapport 2245  
ISSN 1566-7197

M. Knotters, D.J. Brus, S.J.E. Verzandvoort en M. Heinen



---

Aanvullende bodemfysische gegevens  
voor BIS-Nederland

---

---

---

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het programma BIS 2014 in opdracht van het ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I)  
Projectcode [BO-11-017-012]

BIS Nederland: De bron voor bodeminformatie [www.BISNederland.wur.nl](http://www.BISNederland.wur.nl)

---

---

# Aanvullende bodem-fysische gegevens voor BIS-Nederland

M. Knotters, D.J. Brus, S.J.E. Verzandvoort, M. Heinen

Alterra, Wageningen UR

**Alterra-rapport 2245**

Alterra, onderdeel van Wageningen UR  
Wageningen, 2011

---

## Referaat

Knotters, M., D.J. Brus, S.J.E. Verzandvoort, M. Heinen 2011. *Aanvullende bodemfysische gegevens voor BIS-Nederland*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2245. 34 blz.; 1 fig.; 6 tab.; 37 ref.

Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek worden gebruikt in simulatiemodellen voor water- en stoftransport in de onverzadigde zone. De gegevens worden gebruikt in studies naar voedsel- en biomassaproductie, het gebruik van bodem en water als grondstoffen, de emissie van broeikasgassen, het risico van uitspoeling van vervuulende stoffen naar het grond- en oppervlaktewater, en de gevolgen van klimaatverandering voor het stedelijk gebied, infrastructurele werken en andere vormen van ruimtegebruik. Momenteel zijn er onvoldoende gecertificeerde gegevens van bodemfysische karakteristieken beschikbaar om een vlakdekkend ruimtelijk gegevensbestand van bodemfysische karakteristieken voor Nederland te maken. Dit onderzoek heeft als doel om een plan te maken voor de verzameling van aanvullende bodemmonsters voor laboratoriumbepalingen van bodemfysische karakteristieken (waterretentiekarakteristiek en doorlatendheidskarakteristiek). Het aantal eenheden waarvoor ruimtelijke opschaling mogelijk moet zijn bedraagt maximaal 2364. Er zijn echter gecertificeerde gegevens van 96 monsters beschikbaar in het bestand Priapus. Het is niet haalbaar om voor alle 2364 eenheden monsters te verzamelen, maar met *latin hypercube sampling* kan wel worden bereikt dat er gegevens zijn voor alle textuurklassen, klassen van gehalten aan organische stof, en afzettingmilieus. Als de aanvullende steekproef boven- en ondergronden en verschillende afzettingmilieus moet vertegenwoordigen, en het aantal monsters per klasse ten minste twee moet bedragen, dan is de minimale steekproefomvang 50 steekproeflocaties.

Trefwoorden: bodemfysische karakteristieken, doorlatendheidskarakteristiek, *empty domains*, *latin hypercube sampling*, pF-curve, ruimtelijke aggregatie, ruimtelijke opschaling, *small area estimation*, waterretentiekarakteristiek

Foto's omslag: Erik van den Elsen

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van [www.alterra.wur.nl](http://www.alterra.wur.nl) (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op [www.rapportbestellen.nl](http://www.rapportbestellen.nl).

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)  
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; [info.alterra@wur.nl](mailto:info.alterra@wur.nl)

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

**Alterra-rapport 2245**

Wageningen, november 2011

# Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Belang van bodemfysische karakteristieken	11
1.2 Probleem	12
1.3 Doel	12
1.4 Opbouw van het rapport	12
2 Staringreeks, PAWN en Priapus	13
2.1 Staringreeks	13
2.2 PAWN	13
2.3 Priapus	13
3 Opschalen van bodemfysische informatie	15
3.1 Nieuwe indeling in bodemfysische eenheden	15
3.2 Opschalingsmethoden	15
4 Hiaten in Priapus	17
5 Plan voor verzameling van aanvullende gegevens	21
5.1 Mogelijke steekproefopzetten	21
5.2 Keuze voor een <i>latin-hypercube</i> steekproef	22
5.3 <i>Random</i> of gerichte selectie van monsterlocaties?	22
5.3.1 Random selectie	22
5.3.2 Gerichte selectie	23
5.3.3 Keuze	23
5.4 Prioriteitsvolgorde verzameling aanvullende data	24
5.5 Omvang aanvullende steekproef	24
6 Conclusies en aanbevelingen	25
Literatuur	27
Bijlage 1 Prioriteitsvolgorde verzameling aanvullende gegevens	31





# Woord vooraf

Dit plan voor de verzameling van aanvullende gegevens over de bodemfysische eigenschappen van de bodem is onderdeel van het programma BIS 2014 dat wordt gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie. Wij zijn ir. E.J. van Beusekom en ing. J.T.M. Huinink MSc van dit ministerie erkentelijk voor hun nuttige inbreng. Onze collega's ing. A.H. Heidema MSc, ing. F. de Vries en dr.ir. J.G. Wesseling bedanken wij voor hun hulp bij de analyses die wij uitvoerden op de gegevens die nu in BIS en in Priapus zijn opgenomen.

Wageningen/Ede, najaar 2011

Martin Knotters, Dick Brus, Simone Verzandvoort, Marius Heinen



# Samenvatting

## Inleiding

Onder bodemfysische karakteristieken verstaan we relaties van het vochtgehalte en de doorlatendheid met de capillaire drukhoogte in de onverzadigde zone van de bodem. De waterretentie- en de doorlatendheidskarakteristiek worden gebruikt in simulatiemodellen voor water- en stoftransport in de onverzadigde zone, in studies naar bijvoorbeeld uitspoeling van stikstof of bestrijdingsmiddelen, vochtlevering voor gewassen en beregeningsadviezen, of studies naar nat- en droogteschade of gewenste grondwaterstanden voor peilbeheer. Deze toepassingen spelen een belangrijke, maar niet direct zichtbare, rol bij onder meer onderzoek naar voedsel- en biomassaproductie, het gebruik van bodem en water als grondstoffen, de emissie van broeikasgassen, het risico van uitspoeling van vervuilende stoffen naar het grond- en oppervlaktewater en de gevolgen van klimaatverandering voor het stedelijk gebied, infrastructurele werken en andere vormen van ruimtegebruik. Momenteel zijn er onvoldoende gecertificeerde gegevens van bodemfysische karakteristieken beschikbaar om een vlakdekkend ruimtelijk gegevensbestand van bodemfysische karakteristieken voor Nederland te maken. Dit onderzoek heeft als doel om een plan te maken voor de verzameling van aanvullende bodemmonsters voor laboratoriumbepalingen van bodemfysische karakteristieken (waterretentiekarakteristiek en doorlatendheidskarakteristiek).

## Staringreeks, PAWN en Priapus

De huidige versie van de Staringreeks (2001) bevat gemiddelde karakteristieken voor alle 36 belangrijke textuurklassen (18 boven- en 18 ondergronden) en is gebaseerd op metingen aan 832 afzonderlijke monsters. In de schematisatie voor PAWN (Policy Analysis for the Water management of the Netherlands) zijn de eenheden van de bodemkaart, schaal 1 : 250.000, samengevat in 23 bodemfysische eenheden. Deze werden toegekend aan cellen van 250 bij 250 meter, die later geografisch werden gegeneraliseerd tot cellen van 5000 bij 5000 meter op basis van de meest voorkomende bodemfysische eenheid. Het gegevensbestand Priapus bevat bodemfysische karakteristieken van 96 bodemmonsters die voldoen aan een aantal kwaliteitseisen. Van deze monsters zijn de locatie en de datum bekend, of het een monster is uit de boven- of de ondergrond, het gehalte aan organische stof, de textuur, het afzettingmilieu en het landgebruik.

## Opschaling van bodemfysische informatie

Er is behoefte aan een nieuwe indeling in bodemfysische eenheden, waarbij bodemfysische karakteristieken op meerdere niveaus, zowel bodemkundig als geologisch, kunnen worden ingedeeld en geselecteerd. De criteria op basis waarvan aggregatie of opschaling kan plaatsvinden zijn 1) boven- en ondergrond, 2) gehalte aan organische stof, 3) textuur en 4) afzettingmilieu. In theorie is het aantal mogelijke ruimtelijke eenheden waarbinnen kan worden opgeschaald 2364, terwijl Priapus momenteel gecertificeerde gegevens van 96 monsters bevat. Als er behoefte is aan informatie over de nauwkeurigheid van een geschat gemiddelde, of als er wordt opgeschaald met een methode waarbij geloot wordt uit karakteristieken voor individuele monsterlocaties (*bootstrapping*), dan moeten er per opschalingseenheid meerdere karakteristieken beschikbaar zijn.

## Hiaten in Priapus

Voor de monsters in de Priapus-database is bepaald tot welke van de 2364 mogelijke ruimtelijke opschalingseenheden ze behoren. Hieruit bleek dat er geen gecertificeerde gegevens zijn voor de textuurklassen zeer sterk lemig zand, matig en zeer grof zand, kleiarm en kleilig zand (niet-eolisch), klei-arme en kleilige silt, venig zand en venige klei. Er zijn gecertificeerde gegevens van één monster aanwezig voor keileem, zandige leem, uiterst fijn zand, zware zavel, en lichte klei. Voor deze klassen ontbreekt dus informatie over de ruimtelijke variatie in bodemfysische eigenschappen. Voor tien van de maximaal 2364 eenheden bevat Priapus

bodemfysische gegevens voor ten minste twee monsters die op verschillende locaties zijn verzameld. Bij zeven van deze eenheden zijn een aantal of alle monsters meer dan 30 jaar geleden genomen.

### Plan voor verzameling van aanvullende gegevens

Het aantal mogelijke opschalingseenheden (*domains of interest*) bedraagt maximaal 2364. Als in elke eenheid ten minste twee monsterlocaties moeten liggen betekent dit een steekproefomvang die aanmerkelijk groter is dan wat naar alle waarschijnlijkheid maximaal haalbaar is. Het is niet aantrekkelijk om het aantal eenheden terug te brengen, omdat dit voor de gebruiker terug naar af is, nl. teveel aggregatie vooraf. Bij de opzet van de aanvullende steekproef en bij de ruimtelijke opschaling kan wel rekening worden gehouden met het feit dat niet alle opschalingseenheden steekproefpunten bevatten (*empty domains*). Belangrijk is dat in alle klassen waarop de indeling in opschalingseenheden is gebaseerd monsters liggen. Voorgesteld als een tabel met rijen en kolommen betekent dit dat niet alle vakjes zijn gevuld, maar wel alle rijen en kolommen informatie bevatten. Dit kan worden bewerkstelligd door *latin hypercube sampling*. We bevelen aan om de monsterlocaties gericht te selecteren, met als doel het opvullen van de hiaten in Priapus. De prioriteitsvolgorde van aanvullende bemonstering wordt bepaald door de oppervlakten die deze hiaten innemen.

### Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de analyse in dit rapport zijn komen wij tot de volgende conclusies en aanbevelingen.

1. Priapus bevat momenteel onvoldoende gecertificeerde gegevens om ruimtelijk op te schalen naar niveaus die nu gewenst zijn.
2. Het aantal mogelijke ruimtelijke opschalingseenheden is te groot (2364) is om binnen elke eenheid een monster te nemen.
3. Wij bevelen aan om met een aanvullende *latin hypercube-steekproef* ervoor te zorgen dat in ieder geval alle klassen naar boven- en ondergrond, afzettingsmilieu, textuur en gehalte aan organische stof in Priapus zijn vertegenwoordigd met ten minste twee monsters per klasse. Meerdere monsters per klasse zijn nodig om de nauwkeurigheid van geschatte gemiddelden te kunnen kwantificeren, of om benaderingen waarbij wordt geloot uit bodemfysische karakteristieken voor individuele locaties mogelijk te maken (*bootstrapping*).
4. Wij bevelen aan om de monsterlocaties gericht te selecteren, met als doel het opvullen van de hiaten in Priapus.
5. Wij bevelen aan om de hiaten die de grootste oppervlakten vertegenwoordigen het eerste op te vullen. De aanbevolen prioriteitsvolgorde is 1. zware zavel; 2. lichte klei; 3. matig grof zand; 4. kleiarm zand (in mariene en fluviatiele afzettingmilieus); 5. keileem; 6. zandige leem; 7. kleilig zand (mariene afzettingmilieus); 8. zeer sterk lemig zand; 9. venige klei, en 10. uiterst fijn zand.
6. Als de aanvullende steekproef boven- en ondergronden en verschillende afzettingmilieus moet vertegenwoordigen, en het aantal monsters per klasse ten minste twee moet bedragen, dan is de minimale steekproefomvang 50 steekproeflocaties.
7. Veel gegevens van monsters in Priapus blijken meer dan dertig jaar oud te zijn. Wij bevelen aan om te analyseren hoe bodemfysische karakteristieken veranderen in de tijd, om inzicht te krijgen in de noodzaak van actualisatie van informatie in Priapus.

# 1 Inleiding

## 1.1 Belang van bodemfysische karakteristieken

Onder bodemfysische karakteristieken verstaan we relaties van het vochtgehalte ( $\theta$ ) en de doorlatendheid ( $K$ ) met de capillaire drukhoogte ( $h$ ) in de onverzadigde zone van de bodem (Koorevaar et al., 1983; Vrugt et al., 2002). Deze relaties kunnen de vorm hebben van parametrische, statistische of wiskundige functies (bijvoorbeeld Tietje en Tapkenhinrichs, 1993; Twarakavi et al., 2008; Wesseling, 2009), of functies die  $\theta$  en  $K$  beschrijven voor discrete waarden van  $h$  (bijvoorbeeld Wösten et al., 2001). Ook agro-hydrologische variabelen die zijn afgeleid van  $\theta(h)$ - en  $K(h)$ -relaties, zoals de kritieke Zafstand en het verzadigingstekort, worden tot bodemfysische karakteristieken gerekend (Van Soesbergen et al., 1986; Van den Burg, 1987).

Bodemfysische karakteristieken zoals de  $\theta(h)$  en  $K(\theta)$  geven weer hoe de onverzadigde zone van de bodem reageert op de toevoer en onttrekking van water, uit neerslag of uit andere bronnen. Bodemfysische karakteristieken worden gebruikt in simulatiemodellen voor waterbeweging en stoftransport in de onverzadigde zone, in studies naar bijvoorbeeld uitspoeling van stikstof of bestrijdingsmiddelen, vochtlevering voor gewassen en beregeningsadviezen, of studies naar nat- en droogteschade of gewenste grondwaterstanden voor peilbeheer (bijvoorbeeld Oostindie en Bronswijk, 1995; RIZA et al., 2006; Jansen et al., 2007; Van Diepen et al., 2007; NHI, 2008; Ritsema et al., 2009; Römkens et al., 2009).

Het belang van bodemfysische karakteristieken voor het oplossen van ruimtelijke vraagstukken moet niet worden onderschat. De bovengenoemde toepassingen spelen een belangrijke, maar niet direct zichtbare, rol bij onderwerpen die voor het ministerie van EL&I belangrijk zijn, zoals voedsel- en biomassaproductie, het gebruik van bodem en water als grondstoffen, en de emissie van broeikasgassen. Bodemfysische karakteristieken zijn nodig om de gevolgen van klimaatverandering in te schatten voor stedelijk gebied, infra-structurele werken zoals dijken en wegen, recreatiegebieden en natuur- en landbouwgronden. Bodemfysische karakteristieken worden gebruikt om het risico van uitspoeling van vervuilende stoffen naar het grond- en oppervlaktewater in te schatten. Dit risico krijgt naast de bekende nitraat- en fosfaatproblematiek een nieuwe dimensie met een toenemend risico van ongevallen bij industriebedrijven in een alsmaar drukker wordende Randstad, en met stoffen waarvan nog niet zolang bekend is dat ze zich kunnen verspreiden via bodem en grondwater, zoals medicijnresten en brandvertragers.

Het belang van bodemfysische karakteristieken voor bovengenoemde onderwerpen is niet altijd even zichtbaar omdat in toegepaste, kwantitatieve studies deze gegevens in modellen gebruikt worden, en weinig bekend is over wat de gevolgen zijn van onnauwkeurigheid in deze gegevens voor de modeluitkomsten.

Samenvattend kan worden gesteld dat bodemfysische informatie van goede kwaliteit en volledigheid noodzakelijk is bij het genereren van oplossingen voor een aantal grote ruimtelijke vraagstukken van deze tijd. Deze oplossingen vragen om een ruimtelijk gegevensbestand van bodemfysische karakteristieken, met de volgende onderdelen:

1. meetgegevens van vochtgehalte ( $\theta$ ) en doorlatendheid ( $K$ ) als functie van de capillaire drukhoogte ( $h$ ),
2. de afgeleide relaties tussen  $\theta$ ,  $K$  en  $h$ , en
3. beschrijvende gegevens van de bodemhorizonten waarop de meetgegevens en afgeleide gegevens betrekking hebben.

## 1.2 Probleem

Het huidige Bodemkundig Informatie Systeem van Alterra, onderdeel van Wageningen UR, bevat beschrijvende gegevens van bodemhorizonten in Nederland, maar geen meetgegevens en afgeleide gegevens van bodemfysische karakteristieken. De Staringreeks, het referentiebestand voor bodemfysische karakteristieken van Nederlandse gronden, bevat afgeleide gegevens, en in beperkte mate beschrijvende gegevens. In opdracht van het ministerie van EL&I is in het project 'Actualisatie Staringreeks' in 2009 een screening en bewerking gemaakt van de beschikbare meetgegevens, afgeleide gegevens en beschrijvende gegevens van bodemfysische karakteristieken voor Nederlandse bodems. Dit resulteerde in de Priapus-database, met bodemfysische karakteristieken die voldoen aan de eisen voor een Status-A-kwalificatie volgens het WOT-MNP en de Helpdesk Vitaal Landelijk Gebied (Verzandvoort et al., 2011). Voor de certificering tot Kwaliteitsstatus A moest een groot deel van de beschikbare monstergegevens worden afgeschermd voor gebruik, omdat op grond van de gehanteerde criteria metingen of afgeleiden onvoldoende volledig of betrouwbaar werden geacht, of omdat onvoldoende beschrijvende informatie van de grondmonsters aanwezig was. Hierdoor zijn op dit moment onvoldoende gecertificeerde gegevens van bodemfysische karakteristieken beschikbaar om een vlakdekkend ruimtelijk gegevensbestand van bodemfysische karakteristieken voor Nederland te maken. Het huidige project maakt inzichtelijk welke aanvulling met bodemfysische karakteristieken minimaal nodig is om dit te bewerkstelligen.

## 1.3 Doel

Dit onderzoek heeft als doel om een plan te maken voor de verzameling van aanvullende bodemmonsters voor laboratoriumbepalingen van bodemfysische karakteristieken (waterretentiekarakteristiek en doorlatendheidskarakteristiek). Omdat laboratoriumbepalingen van deze karakteristieken relatief duur zijn, moet goed worden nagedacht over waar het beste deze aanvullende monsters genomen kunnen worden. Voor de selectie van de steekproeflocaties is het ook van groot belang van te voren goed na te denken over hoe op basis van deze laboratoriumbepalingen op puntlocaties vlakdekkende kaarten kunnen worden gemaakt van deze karakteristieken, of hoe bodemfysische karakteristieken voor puntlocaties ruimtelijk kunnen worden opgeschaald. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de onderzoeksresultaten van Verzandvoort et al. (2011).

## 1.4 Opbouw van het rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de aggregaties van bodemfysische gegevens in de Staringreeks (Wösten et al., 2001) en in de PAWN-indeling (Wösten et al., 1988), en het gegevensbestand Priapus (Stolte et al., 2007; Verzandvoort et al., 2011). In hoofdstuk 3 beschrijven we de nieuwe, meer gedetailleerde, indeling in ruimtelijke eenheden waarvoor bodemfysische gegevens gewenst zijn zoals voorgesteld door Verzandvoort et al., 2011). Wij noemen in dit rapport deze ruimtelijke eenheden opschalingseenheden. In hoofdstuk 4 analyseren we in hoeverre de huidige gegevens in Priapus de eenheden van deze nieuwe indeling vullen en wat de hiaten zijn. In hoofdstuk 5 presenteren we het plan voor de verzameling van aanvullende gegevens om de hiaten die in hoofdstuk 4 zijn vastgesteld op te vullen. Wij ronden het rapport af in hoofdstuk 6 met enkele concluderende opmerkingen en aanbevelingen.

## 2 Staringreeks, PAWN en Priapus

### 2.1 Staringreeks

De Staringreeks werd voor het eerst uitgebracht in 1987, door de Stichting voor Bodemkartering (Stiboka) en het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW). Deze eerste versie van de Staringreeks bevatte de gemiddelde bodemfysische karakteristieken voor 26 van de 36 belangrijkste textuurklassen van de Nederlandse bodem (Wösten et al., 1987). In 1994 bracht het Staring Centrum-DLO een nieuwe uitgave van de Staringreeks uit, waarin gemiddelde bodemfysische karakteristieken werden gegeven voor 30 van de 36 belangrijkste textuurklassen (Wösten et al., 1994). In 2001 bracht Alterra, onderdeel van Wageningen University en Research centre, de huidige versie van de Staringreeks uit, die gemiddelde bodemfysische karakteristieken bevat voor alle 36 belangrijke textuurklassen (Wösten et al., 2001). De gemiddelden zijn gebaseerd op bepalingen aan ten minste zes afzonderlijke monsters van verschillende locaties met vergelijkbare bodemhorizonten. De huidige versie van de Staringreeks is gebaseerd op metingen aan 832 afzonderlijke monsters. De 36 bouwstenen van de Staringreeks zijn verdeeld over achttien boven- en achttien ondergronden. De huidige versie van de Staringreeks bevat ook continue vertaalfuncties waarmee aan de hand van textuur, gehalte aan organische stof, dichtheid en het kenmerk boven- of ondergrond voorspellingen kunnen worden gedaan van de vormparameters in de analytische Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen die de bodemfysische karakteristieken beschrijven.

### 2.2 PAWN

PAWN staat voor 'Policy Analysis for the Water management of the Netherlands'. In het kader van PAWN werd in de jaren 80 een aantal modellen ontwikkeld, waaronder DEMGEN (Demand Generator, Van Vuuren, 1988), waarmee de waterbehoefte voor de landbouw kan worden bepaald. Voor dit model zijn de volgende bodemkarakteristieken van belang:

- het verband tussen vochtgehalte en vochtspanning;
- het vochtgehalte bij verzadiging en bij het verwelkingspunt;
- de capillaire doorlatendheid als functie van de vochtspanning.

Uit praktische overwegingen werden in de PAWN-studie de eenheden van de bodemkaart, schaal 1 : 250.000, samengevat in 23 bodemfysische eenheden, op basis van verwantschap in bodemkundige en bodemfysische kenmerken (Wösten et al., 1988). Aan de horizonten van deze eenheden zijn bodemfysische karakteristieken van de Staringreeks (Wösten et al., 1987) toegekend, waarbij horizonten die zich bodemfysisch identiek gedragen zijn samengevoegd. Op deze manier werden bodemfysische eenheden toegekend aan cellen van 250 bij 250 meter, die later geografisch werden gegeneraliseerd tot cellen van 5000 bij 5000 meter op basis van de meest voorkomende bodemfysische eenheid.

### 2.3 Priapus

Priapus is de database met bodemfysische karakteristieken van bodemmonsters die voldoen aan een aantal kwaliteitseisen (Kwaliteitstatus A, zie Stolte et al., 2007). Momenteel bevat Priapus gegevens van 96 monsters die voldoen aan de status-A-kwalificatie (Verzandvoort et al., 2011). Van deze monsters zijn de locatie en de

datum bekend, of het een monster is uit de boven- of de ondergrond, het gehalte aan organische stof, de textuur, het afzettingmilieu en het landgebruik.



## 3 Opschalen van bodemfysische informatie

### 3.1 Nieuwe indeling in bodemfysische eenheden

Verzandvoort et al. (2011, hoofdstuk 5) stellen een nieuwe indeling in bodemfysische eenheden voor die voldoet aan onder meer de eis dat bodemfysische karakteristieken op meerdere niveaus, zowel bodemkundig als geologisch, kunnen worden ingedeeld en geselecteerd. Dit betekent dat de bodemfysische karakteristieken van de individuele grondmonsters op verschillende manieren opgeschaald kunnen worden. De criteria op basis waarvan opschaling kan plaatsvinden zijn boven- en ondergrond, gehalte aan organische stof, textuur en afzettingsmilieu. Tabel 1 geeft de indeling die Verzandvoort et al. (2011, hoofdstuk 5) voorstellen. De genoemde klassen worden in het volgende hoofdstuk nader besproken.

**Tabel 1**

*Indeling in bodemfysische eenheden volgens Verzandvoort et al. (2011, hoofdstuk 5)*

<b>Boven- of ondergrond</b>	Twee klassen
<b>Afzettingsmilieu</b>	Zes hoofdklassen
<b>Textuur</b>	<i>Eolische en sommige niet-eolische afzettingen.</i> Zes leemklassen, vijf klassen naar mediaan van de zandfractie <i>Niet-eolische afzettingen.</i> tien klassen op basis van lutumgehalte
<b>Gehalte aan organische stof</b>	Zes klassen bij minerale gronden, drie klassen bij moerige gronden. De klassegrenzen verschillen voor zand (<8% lutum) en klei (>8% lutum)

In theorie is het aantal ruimtelijke opschalingseenheden  $2 \times 6 \times 4 \times 5 \times 6 + 2 \times 6 \times 2 \times 6 + 2 \times 6 \times 10 \times 6 + 2 \times 6 \times 5 = 2364$ . In de praktijk ligt het aantal lager om twee redenen:

1. een aantal combinaties van klassen komen in werkelijkheid niet voor, bijvoorbeeld omdat bepaalde textuurklassen niet in bepaalde afzettingsmilieus voorkomen, of bepaalde klassen van gehalten aan organische stof niet in de ondergrond voorkomen;
2. de gebruiker van de Priapus-database bepaalt zelf volgens welke criteria er wordt opgeschaald, afhankelijk van het doel en de methode van opschaling. Hierbij worden niet altijd alle criteria gebruikt.

Momenteel biedt de Priapus-database met 96 monsters bij lange na nog geen informatie voor alle mogelijke ruimtelijke opschalingseenheden. Het aantal opschalingseenheden neemt nog verder toe als de gebruiker van Priapus ook landgebruik als indelingscriterium wil hanteren.

### 3.2 Opschalingsmethoden

Bij de Staringreeks (Wösten et al., 1987, 1994, 2001) en de PAWN-schematisatie (Wösten et al., 1988) werden bodemfysische karakteristieken geaggregeerd tot gemiddelden voor bodemfysische bouwstenen, en werd de spreiding rond dit gemiddelde gekwantificeerd met een standaardafwijking. Een andere mogelijkheid is om niet te middelen, maar te loten uit de individuele bodemfysische karakteristieken binnen een opschalingseenheid en zo te komen tot een voorspelling van de bodemfysische karakteristiek op een niet-bezochte locatie. Deze mogelijkheid stelt Wösten (2001, blz. 43) voor en is een vorm van *bootstrapping* (Efron en Tibshirani, 1993). Zowel voor het schatten van een gemiddelde inclusief standaardafwijking als voor *bootstrapping* zijn gegevens van meerdere monsters (ten minste twee) per opschalingseenheid nodig.



## 4 Hiaten in Priapus

Voor elk van de 96 monsters in de Priapus-database is bepaald tot welke van de 2364 mogelijke ruimtelijke opschalingseenheden deze behoort. Hierbij bleek het volgende:

1. Voor 20 monsters kon niet nauwkeurig worden bepaald tot welke ruimtelijke opschalingseenheid ze behoren omdat laboratoriumgegevens over textuur (leemgehalte, M50 en/of lutumgehalte) en/of gehalte aan organische stof ontbraken;
2. Er bleken negen paren van monsters te zijn met exact gelijke gegevens voor textuur en gehalte aan organische stof, en twee paren van monsters met exact gelijke gegevens voor textuur maar met verschillende gehalten aan organische stof. Het blijkt dat deze monsters op dezelfde locaties zijn genomen, maar dat er tweemaal bodemfysische metingen aan zijn verricht. De bodemfysische karakteristieken van deze gepaarde monsters kunnen daarom onderling verschillen. Deze verschillen zeggen echter niets over ruimtelijke variatie in bodemfysische eigenschappen, maar alleen iets over de variatie als gevolg van meetmethode.

Op dit moment kunnen dus de gegevens van  $96 - (20 + 9 + 2) = 65$  monsters uit de Priapus-database worden gebruikt voor ruimtelijke opschaling op basis van de voorgestelde indeling naar boven- en ondergrond, textuur, gehalte aan organische stof, en afzettingsmilieu, en op basis van laboratoriumbepalingen. Tabel 2 geeft de verdeling van de monsters over de ingangen van de meerdimensionale indeling in eenheden voor ruimtelijke opschaling. Dit geeft de volgende eerste indruk van de hiaten in de database.

1. Voor keileem (geocode 500) is er slechts één monster met laboratoriumbepalingen van gehalte aan organische stof en van textuur.
2. Er zijn geen bodemfysische gegevens in Priapus beschikbaar voor:
  - 2.1. Zeer sterk lemig zand
  - 2.2. Matig en zeer grof zand
  - 2.3. Kleiarm en kleilig zand (niet-eolisch)
  - 2.4. Klei-arme en kleiige silt
  - 2.5. Venig zand
  - 2.6. Venige klei
3. De volgende textuurklassen zijn in Priapus vertegenwoordigd met slechts één monster, waardoor er geen informatie is over de ruimtelijke variatie:
  - 3.1. Zandige leem
  - 3.2. Uiterst fijn zand
  - 3.3. Zware zavel
  - 3.4. Lichte klei

**Tabel 2**

Verdeling van de Priapus-monsters over de ingangen van de meerdimensionale indeling in eenheden voor ruimtelijke opschaling.

Monsters zijn ingedeeld op basis van resultaten van laboratoriumanalyses

Ingang	Klasse	Aantal monsters in Priapus
Boven-/ondergrond	Bovengrond	27
	Ondergrond	38
Afzettingsmilieu	100 (moerig)	13
	200 (marien)	23
	300 (fluviaal)	14
	400 (eolisch)	10
	500 (keileem)	1
	600 (antropogeen)	4
Textuur eolische en sommige niet-eolische afzettingen: leemgehalte	Leemarm zand	4
	Zwak lemig zand	4
	Sterk lemig zand	4
	Zeer sterk lemig zand	0
	Zandige leem	1
	Siltige leem	2
Textuur eolische en sommige niet-eolische afzettingen: M50 zandfractie	Uiterst fijn zand	1
	Zeer fijn zand	7
	Matig fijn zand	3
	Matig grof zand	0
	Zeer grof zand	0
Textuur niet-eolische afzettingen: lutumgehalte	Kleiarm zand	0
	Klei-arme silt	0
	Kleiig zand	0
	Kleiige silt	0
	Zeer lichte zavel	6
	Matig lichte zavel	5
	Matig lichte zavel (keileem)	1
	Zware zavel	1
	Lichte klei	1
	Matig zware klei	7
	Zeer zware klei	11
	Gehalte aan organische stof bij zandgronden met een laag lutumgehalte	Uiterst humusarm
Zeer humusarm		2
Matig humusarm		2
Matig humeus		3
Zeer humeus		4
Humusrijk		2
Gehalte aan organische stof bij kleigronden	Uiterst humusarm	6
	Zeer humusarm	6
	Matig humusarm	11
	Matig humeus	4
	Zeer humeus	2
	Humusrijk	2
Gehalte aan organische stof bij moerige gronden en veengronden	Venig zand	0
	Venige klei	0
	Zandig veen	2
	Kleiig veen	2
	Veen	8

Tabel 3 geeft de eenheden weer waarvoor in Priapus op het meest gedetailleerde opschalingsniveau de gegevens van ten minste twee monsters beschikbaar zijn. Voor slechts tien van de maximaal 2364 eenheden bevat Priapus bodemfysische gegevens voor ten minste twee monsters die op verschillende locaties zijn verzameld. De laatste kolom in tabel 3 geeft het jaar van monsternamen, voor zover bekend. Bij twee eenheden is het jaar van monsternamen niet bekend. Verder blijkt dat bij zeven eenheden een aantal of alle monsters meer dan 30 jaar geleden zijn genomen.

**Tabel 3**

*Overzicht van de eenheden op het meest gedetailleerde niveau van ruimtelijke opschaling, waarvoor in Priapus bodemfysische gegevens van ten minste twee monsters beschikbaar zijn. -: geen gegevens*

Eenheid voor ruimtelijke opschaling (meest gedetailleerde niveau)	Aantal monsters in Priapus	Jaar van monsternamen (aantal)
Bovengrond, moerig materiaal (geocode 100), kleilig veen	2	1979(2)
Bovengrond, moerig materiaal (geocode 100), zandig veen	2	1979, -
Bovengrond, mariene afzettingen (geocode 200), matig humeuze, matig zware klei	2	1979(2)
Ondergrond, moerig materiaal (geocode 100), veen	8	1979(3), 1984(5)
Ondergrond, mariene afzettingen (geocode 200), uiterst humusarme, zeer lichte zavel	4	1979(2), -(2)
Ondergrond, mariene afzettingen (geocode 200), zeer humusarme, matig lichte zavel	2	-(2)
Ondergrond, mariene afzettingen (geocode 200), matig humusarme, zeer zware klei	4	1979(4)
Ondergrond, mariene afzettingen (geocode 200), zeer humusarme, matig zware klei	2	-(2)
Ondergrond, fluviaatiele afzettingen (geocode 300), matig humeuze, zeer zware klei	2	2004(2)
Ondergrond, eolische en fluvioperiglaciale afzettingen (geocode 400), uiterst humusarm, leemarm, zeer fijn zand	2	1979(2)

Tabel 4 geeft voor een hoger opschalingsniveau weer voor welke eenheden ten minste twee monsters in Priapus beschikbaar zijn. Er is onderscheid gemaakt tussen humusarm en humeus, tussen leemarm en lemig zand, tussen fijn zand en grof zand, en tussen zavel en klei. Er is geen onderscheid gemaakt naar aard en samenstelling van moerig materiaal. Er is wel onderscheid gemaakt naar boven- en ondergrond, en naar afzettingsmilieu. Bij dit opschalingsniveau bedraagt het maximale aantal eenheden 180. Voor elf opschalings-eenheden bedraagt het aantal Priapusmonsters twee of meer. Bij al deze eenheden zijn een aantal of alle Priapusmonsters ten minste 30 jaar geleden geanalyseerd.

Figuur 1 geeft een beeld van de ruimtelijke spreiding van de monsters in Priapus. Duidelijk blijkt de ruimtelijke clustering van de monsters, die is ontstaan doordat de monsters zijn genomen in het kader van regionale projecten. Opgemerkt moet worden dat een aantal monsters in Priapus exact gelijke ruimtelijke coördinaten hebben, terwijl het geen duplo-bepalingen betreft. Dit moeten monsters zijn die op verschillende diepten zijn genomen, of het moet het gevolg zijn van afronding van coördinaten. De 65 monsters waarvoor laboratoriumgegevens van textuur en/of gehalte aan organische stof beschikbaar zijn ('A' in figuur 1), zijn verzameld op 29 verschillende locaties. De 31 monsters waarvoor geen laboratoriumgegevens van textuur en/of gehalte aan organische stof beschikbaar zijn ('B' in figuur 1), zijn verzameld op 24 verschillende locaties. Op veertien locaties zijn zowel monsters van type 'A' als 'B' genomen. Het totaal aantal locaties waarop de in totaal 96 monsters zijn genomen bedraagt dus  $29+24-14=39$ . Verder valt op dat de coördinaten van de monsterlocaties vaak sterk zijn afgerond, bijvoorbeeld op 25, 50, 100 of zelfs 1000 meter.

**Tabel 4**

Overzicht van de eenheden bij sterke ruimtelijke opschaling, waarvoor in Priapus bodemfysische gegevens van ten minste twee monsters beschikbaar zijn

Einheid voor ruimtelijke opschaling	Aantal monsters in Priapus	Jaar van monsternamen
Bovengrond, moerig materiaal (geocode 100)	5	1969, 1979(3), -
Bovengrond, mariene afzettingen (geocode 200), humusarme zavel	4	1979(2), -(2)
Bovengrond, mariene afzettingen (geocode 200), humusarme klei	2	1979, -
Bovengrond, mariene afzettingen (geocode 200), humeuze klei	2	1979(2)
Bovengrond, fluviale afzettingen (geocode 300), humeuze klei	3	1979(2), 2004
Ondergrond, moerig materiaal (geocode 100)	13	1969, 1979(7), 1984(5)
Ondergrond, mariene afzettingen (geocode 200), humusarme zavel	7	1979(2), -(5)
Ondergrond, mariene afzettingen (geocode 200), humusarme klei	7	1979(5), -(2)
Ondergrond, fluviale afzettingen (geocode 300), humeuze klei	3	2004(2), 1979
Ondergrond, eolische en fluvioperiglaciale afzettingen (geocode 400), humusarm, leemarm, fijn zand	4	1979(4)
Ondergrond, eolische en fluvioperiglaciale afzettingen (geocode 400), humusarm, lemig, fijn zand	2	1979(2)



**Figuur 1**

Locaties van de monsters in Priapus. A: laboratoriumgegevens van textuur en/of gehalte aan organische stof beschikbaar. B: laboratoriumgegevens van textuur en/of gehalte aan organische stof niet beschikbaar

# 5 Plan voor verzameling van aanvullende gegevens

## 5.1 Mogelijke steekproefopzetten

Bij de opzet van de steekproef voor verzameling van aanvullende data in Priapus richten wij ons op de bodem van Nederland, tot op een diepte van 1,20 m. Daarbinnen richten wij ons op delen van de bodem waarvoor wij afzonderlijke informatie willen. In de steekproeftheorie worden deze deelpopulaties waarvoor afzonderlijke informatie gewenst is *domains of interest* genoemd.

De *domains of interest* worden bepaald door de indeling die is beschreven in hoofdstuk 3. Een voorbeeld van een ruimtelijke opschalingseenheid of *domain of interest* is: 'Ondergrond, fluviatiele afzettingen (geocode 300), matig humeuze, zeer zware klei'. Om ruimtelijke opschaling op basis van indelingen die de gebruiker opgeeft mogelijk te maken zouden er in alle mogelijke ruimtelijke eenheden op het meest gedetailleerde opschalingsniveau monsters moeten worden genomen (totaal 2364 eenheden). In elke eenheid zou ten minste één monster moeten liggen, en bij voorkeur meer om ook informatie te krijgen over de ruimtelijke variatie van bodemfysische eigenschappen binnen een opschalingseenheid. Dit zou een steekproefomvang betekenen die aanmerkelijk groter is dan wat naar alle waarschijnlijkheid maximaal haalbaar is. Er zijn grofweg twee mogelijkheden om dit probleem op te lossen:

**Mogelijkheid 1:** Het aantal *domains of interest* aanpassen aan de maximale steekproefomvang. Dit betekent dat er op een minder gedetailleerd niveau ruimtelijk wordt opgeschaald. **Voordeel:** een gestratificeerde enkelvoudig aselechte steekproef kan worden uitgevoerd, opschaling op domeinniveau is eenvoudig. **Nadeel:** voor de gebruiker is dit terug naar af, nl. teveel aggregatie.

**Mogelijkheid 2:** Accepteren dat er domeinen zijn waar geen steekproefeenheden in zijn geselecteerd. In de literatuur worden dit ook wel *empty domains* genoemd. De domeinen die niet 'leeg' zijn zullen vaak een beperkt aantal steekproefpunten bevatten. Om de nauwkeurigheid van schattingen voor deze domeinen te vergroten (*small area estimation*) kan gebruik worden gemaakt van informatie uit andere domeinen (zogenoeten *indirect estimators*). Impliciet of expliciet wordt hierbij gebruik gemaakt van een model. Een mogelijkheid is om *two-way stratification with small samples* (Cochran, 1977, p. 124) uit te breiden naar 'four-way' of 'five-way' stratification, nl. boven- en ondergrond, afzettingsmilieu, textuur (twee ingangen: leemgehalte en mediaan zandfractie) en gehalte aan organische stof. Cochran (1977) geeft echter geen schatters voor gemiddelden of totalen voor strata waarin geen steekproefpunten liggen. Met de *synthetic estimator* en de GREG estimator (GREG = *generalized regression*) is het echter wel mogelijk om voor de lege vakjes' (*empty domains*) schattingen te doen (De Gruijter et al., 2006, blz. 144-145; Chaudhuri, 1994; Ghosh en Rao, 1994; Tikkiwal en Ghiya, 2000; Rao, 2003; Falorsi en Righi, 2008; Van den Brakel, 2009, 2010).

**Voordeel:** opschaling/aggregatie voor kleine ruimtelijke eenheden (zoals de gebruiker graag wil) is mogelijk.

**Nadeel:** opschalings-/aggregatiemethoden voor *small areas* en *empty domains* zijn niet eenvoudig, gebruik van modellen hierbij is onvermijdelijk.

We concluderen dat mogelijkheid 2 de voorkeur heeft, omdat deze de gebruiker in staat stelt zelf het niveau van ruimtelijke opschaling te kiezen. Deze wens komt duidelijk naar voren in Verzandvoort et al. (2011).

## 5.2 Keuze voor een *latin-hypercube*-steekproef

Om mogelijkheid 2, hierboven genoemd in paragraaf 5.1, mogelijk te maken is het belangrijk om ervoor te zorgen dat in alle rijen en kolommen van de tabel monsters liggen. Dit kan worden bewerkstelligd door *latin hypercube sampling*. Tabel 5 geeft schematisch een steekproef weer voor de situatie waarin tien monsters kunnen worden genomen, terwijl er door classificatie op twee kenmerken 20 eenheden zijn waarvoor informatie gewenst is.

**Tabel 5**

Voorbeeld van een steekproef van tien steekprofeenheden, bij een stratificatie op basis van twee klasse-indelingen, met in totaal  $4 \times 5 = 20$  deelgebiedjes. In alle rijen en kolommen ligt ten minste één steekproefpunt. De verdeling van de steekproefpunten over de strata is evenredig met de grootte van de strata. Naar: Cochran (1977, blz. 125)

Rij	Kolom									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	A		B			C			D	
1	X									
2				X						
3		X								
4							X			
5						X				
6								X		
7			X							
8									X	
9					X					
10										X

## 5.3 *Random* of gerichte selectie van monsterlocaties?

De locaties van de aanvullende monsters kunnen gericht worden geselecteerd, of door middel van een kanssteekproef (*random*). In deze paragraaf bespreken we de voor- en nadelen van beide selectiemechanismen samen voor de verzameling van aanvullende bodemfysische karakteristieken, en bespreken we de samenhang tussen de selectiemethode en de methode van ruimtelijke opschaling.

### 5.3.1 Random selectie

Als de monsterlocaties worden geselecteerd met een kanssteekproef, dan kunnen bodemfysische karakteristieken ruimtelijk worden opgeschaald tot bijvoorbeeld gemiddelden door gebruik te maken van de zogeheten insluitkansen (De Gruijter et al., 2006). Ruimtelijke opschaling is relatief eenvoudig omdat er geen model van ruimtelijke variatie hoeft te worden geconstrueerd. Er wordt bij de ruimtelijke opschaling gebruik gemaakt van het ontwerp van de steekproef, en daarom wordt dit een ontwerpgebaseerde methode genoemd. De verkregen schattingen en de gekwantificeerde nauwkeurigheid van deze schattingen zijn in hoge mate objectief, omdat er geen gebruik wordt gemaakt van een model.

Bij selectie middels een kanssteekproef en ontwerpgebaseerde ruimtelijke opschaling zou de bodemkaart als basis kunnen dienen. Locaties worden dan geloot binnen kaarteenheden, en bodemfysische karakteristieken kunnen bijvoorbeeld worden geaggregeerd tot gemiddelde bodemfysische karakteristieken van deze kaarteenheden. De basis voor de opschaling is dus de ligging van een monsterlocatie binnen een kaarteenheid, en niet



de bodemkundige samenstelling van het monster. De monsterlocaties kunnen zowel in het zuivere als het onzuivere deel van de kaartenheid liggen.

De huidige gegevens in Priapus zijn gebaseerd op bepalingen aan monsters die zijn verzameld op gericht geselecteerde locaties. Er zijn echter wel mogelijkheden om deze gegevens te combineren met gegevens die volgens een kanssteekproef zijn verzameld (*model-assisted* benadering, regressieschatters; Brus en De Gruijter, 2003; De Gruijter et al., 2006). Verder is het mogelijk om de gegevens die met een kanssteekproef zijn verzameld met een modelgebaseerde (geostatistische) methode te verwerken tot ruimtelijk geaggregeerde informatie (zie paragraaf 5.3.2).

### 5.3.2 Gerichte selectie

Als de monsterlocaties gericht worden geselecteerd, of in elk geval niet met een kanssteekproef, dan moet bij de ruimtelijke aggregatie van bodemfysische karakteristieken gebruik worden gemaakt van een statistisch model van de ruimtelijke variatie om te komen tot ruimtelijk geaggregeerde informatie met gekwantificeerde nauwkeurigheid. Er zijn diverse mogelijkheden, zoals toepassing van geostatistische methoden (Isaaks en Srivastava, 1989). Om de ruimtelijke variatie binnen een opschalingseenheid te modelleren zijn echter aanmerkelijk meer monsters nodig dan nu beschikbaar zijn in Priapus, nl. ten minste 100 à 150 (Webster en Oliver, 1992). Kempen et al. (2010) combineren bij ruimtelijke voorspelling van gehalten aan organische stof gegevens over het werkelijke bodemtype met voorspellingen van de bodemkaart. Een dergelijk model zou ook voor ruimtelijke voorspelling en aggregatie van bodemfysische karakteristieken kunnen worden toegepast, waarbij gegevens over de bodemkundige samenstelling van het monster worden gecombineerd met informatie van de bodemkaart.

Gericht geselecteerde gegevens kunnen uitsluitend op een modelgebaseerde wijze ruimtelijk worden opgeschaald, terwijl gegevens die met een kanssteekproef zijn geselecteerd zowel op ontwerpgebaseerde als op modelgebaseerde wijze ruimtelijk kunnen worden opgeschaald.

Bij de gerichte selectie van monsterlocaties is tot nu toe de werkelijke bodemkundige samenstelling bepalend geweest, en niet de geografische ligging of de ligging binnen een bepaalde eenheid van de bodemkaart.

### 5.3.3 Keuze

Een keuze voor *random* selectie van aanvullende monsters heeft tot gevolg dat de hiaten die tabel 2 aangeeft niet direct worden opgevuld. De basis voor de selectie is namelijk de bodemkundige samenstelling volgens de bodemkaart, en niet de werkelijke bodemkundige samenstelling. Volgens tabel 2 zijn er bijvoorbeeld nu geen bodemfysische karakteristieken in Priapus aanwezig voor matig grof zand. Om deze te verkrijgen zouden er met een kanssteekproef aanvullende monsterlocaties kunnen worden geselecteerd in de kaartenheden van de bodemkaart met matig grof zand. Deze kaartenheden hebben echter een bepaalde onzuiverheid, waardoor het mogelijk is dat één of meerdere van de aanvullende monsters niet bestaan uit matig grof zand. Het is niet raadzaam om deze monsters 'af te laten vallen', omdat de kanssteekproef dan alleen informatie geeft over het zuivere deel van de kaartenheid, waarvan de ligging niet bekend is en de grootte alleen kan worden geschat.

De mogelijkheden om gericht geselecteerde gegevens te combineren met gegevens uit een kanssteekproef bij ruimtelijke opschaling zijn beperkt zolang het aantal kanssteekproefgegevens in de opschalingseenheden gering is. Als de aanvullende gegevensverzameling zich richt op het opvullen van hiaten in Priapus (tabel 2), is voor de overige opschalingseenheden vooralsnog alleen gericht geselecteerde bodemfysische informatie beschikbaar.

We onderkennen het voordeel van objectiviteit wanneer de gegevens met een kanssteekproef zouden worden verzameld en met een ontwerpgebaseerde methode zouden worden verwerkt tot ruimtelijk opgeschaalde informatie. We concluderen echter dat de verzameling van aanvullende informatie in eerste instantie gericht moet zijn op het opvullen van hiaten in Priapus, waardoor het voordeel van een ontwerpgebaseerde benadering voorsnog alleen voor die hiaten zou gelden. Er is voldoende methodiek voorhanden om op basis van gericht geselecteerde informatie bodemfysische karakteristieken bijvoorbeeld te aggregeren tot ruimtelijke gemiddelden, en de ruimtelijke variatie in bodemfysische karakteristieken binnen opschalingseenheden te beschrijven. Daarom bevelen we aan om de monsterlocaties gericht te selecteren, met als doel het opvullen van de hiaten in tabel 2.

## 5.4 Prioriteitsvolgorde verzameling aanvullende data

De keuze voor een *latin hypercube*-benadering betekent dat de klassen in tabel 2 waarin nu nul monsters liggen, of één monster, hoge prioriteit krijgen bij de gegevensverzameling. Daarnaast wordt de prioriteit bepaald door de oppervlakte van de klassen. Op basis van de gegevens van De Vries (1999) bepaalden we de oppervlakten van de klassen waarvoor momenteel nul of één monsters zijn geanalyseerd, zie bijlage 1, tabel B1. Op grond van deze oppervlakten stelden we een prioriteit voor de verzameling van aanvullende gegevens voor Priapus vast (tabel B1, laatste kolom).

Uit tabel B1 blijkt dat 'zware zavel' de eerste prioriteit moet krijgen bij de verzameling van aanvullende gegevens. Circa 20% van de Nederlandse bodem bestaat eruit, terwijl er nu slechts één monster van in Priapus is opgenomen. Lichte klei, dat circa 15% van de Nederlandse bodem beslaat, krijgt de tweede prioriteit. Derde prioriteit krijgt matig grof zand, dat zich in circa 7% van de Nederlandse bodem bevindt.

In het totaal moet voor circa 55% van de Nederlandse bodem (boven- en ondergrond samen) nog bodemfysische informatie worden verzameld.

## 5.5 Omvang aanvullende steekproef

Wanneer we een eis stellen aan de nauwkeurigheid van het geschatte gemiddelde of aan de waarde op een punt kan daarmee de minimale steekproefomvang worden bepaald. Er zijn echter geen nauwkeurigheidseisen bekend voor ruimtelijk opgeschaalde bodemfysische karakteristieken. De nauwkeurigheid van de opgeschaalde informatie hangt ook af van het opschalingsniveau en de opschalingsmethode. Uitgaande van ten minste twee monsters per klasse kan uit tabel 2 worden afgeleid dat de aanvullende steekproef moet bestaan uit ten minste 24 monsters. Opgemerkt moet worden dat de aanvullende steekproef alleen maar de hiaten opvult die er zijn op de 'assen' van de meerdimensionale tabel die wordt gevormd door de nieuwe indeling in ruimtelijke opschalingseenheden. Als we in de aanvullende steekproef ook boven- en ondergronden en verschillende afzettingsmilieus willen vertegenwoordigen, wat wij hier adviseren, dan kan uit tabel B1 worden afgeleid dat de minimale steekproefomvang 50 zou moeten bedragen.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

1. Het bestand Priapus bevat bodemfysische gegevens die voldoen aan de Status-A-kwalificatie volgens het WOT-MNP en de Helpdesk Vitaal Landelijk Gebied (Verzandvoort et al., 2011). We concluderen dat Priapus nu onvoldoende gegevens bevat om ruimtelijke opschalingen volgens de indeling die Verzandvoort et al. (2011, hoofdstuk 5) geven mogelijk te maken.
2. Wij concluderen dat het aantal mogelijke ruimtelijke opschalingseenheden op basis van de indeling in Verzandvoort et al. (2011) te groot (2364) is om binnen elke eenheid een monster te nemen.
3. Wij bevelen aan om met een aanvullende *Latin Hypercube*-steekproef ervoor te zorgen dat in ieder geval alle klassen naar boven- en ondergrond, afzettingsmilieu, textuur en gehalte aan organische stof in Priapus zijn vertegenwoordigd met ten minste twee monsters per klasse. Meerdere monsters per klasse zijn nodig om de nauwkeurigheid van geschatte gemiddelden te kunnen kwantificeren, of om benaderingen waarbij wordt geloot uit bodemfysische karakteristieken voor individuele locaties mogelijk te maken (*bootstrapping*).
4. Wij bevelen aan om de monsterlocaties gericht te selecteren, met als doel het opvullen van de hiaten in Priapus.
5. Wij bevelen aan om de hiaten die de grootste oppervlakten vertegenwoordigen het eerste op te vullen. De aanbevolen prioriteitsvolgorde is 1. zware zavel; 2. lichte klei; 3. matig grof zand; 4. klei-arm zand (in mariene en fluviatile afzettingsmilieus); 5. keileem; 6. zandige leem; 7. kleilig zand (mariene afzettingsmilieus); 8. zeer sterk lemig zand; 9. venige klei, en 10. uiterst fijn zand.
6. Als de aanvullende steekproef ook boven- en ondergronden en verschillende afzettingsmilieus moet vertegenwoordigen, en het aantal monsterlocaties ten minste twee per klasse moet bedragen, dan is de minimale steekproefomvang 50 monsterlocaties.
7. Veel gegevens van monsters in Priapus blijken meer dan dertig jaar oud te zijn. Mogelijk zijn de bodemfysische eigenschappen in de loop van de tijd gewijzigd als gevolg van landgebruik. Voor een analyse van de effecten van landgebruik op de compactie van de bodem verwijzen wij naar Van den Akker en Hoogland (2011). Wij bevelen aan om te analyseren hoe bodemfysische karakteristieken veranderen in de tijd, om inzicht te krijgen in de noodzaak van actualisatie van informatie in Priapus.



# Literatuur

Akker, J.J.H. van den en T. Hoogland, 2011. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. *Soil and Tillage Research* 114: 146-154.

Brakel, J. van den, 2009. *Sampling and estimation techniques for the implementation of the NACE Rev. 2 in Business Surveys*. The Hague/Heerlen, Statistics Netherlands, Discussion paper 09013.

Brakel, J. van den, 2010. Sampling and estimation techniques for the implementation of new classification systems: the change-over from NACE Rev. 1.1 to NACE Rev. 2 in business surveys. *Survey Research Methods* 4(2): 103-119.

Brus, D.J. en J.J. de Gruijter, 2003. A method to combine non-probability sample data with probability sample data in estimating spatial means of environmental variables. *Environmental Monitoring and Assessment* 83: 303-317.

Burg, J. van den, 1987. *Relaties tussen het vochtleverend vermogen van de grond, het waterverbruik en de groei van een aantal boomsoorten: een literatuurstudie*. Utrecht, Studiecommissie Waterbeheer Natuur, Bos en Landschap.

Chaudhuri, A., 1994. Small domain statistics: a review. *Statistica Neerlandica* 48: 215-236.

Cochran, W.G., 1977. *Sampling techniques*. New York, Wiley.

Diepen, C.A. van, J. Wolf, H. van Keulen en C. Rappoldt, 2007. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5(1): 16–24.

Efron, B. en R.J. Tibshirani, 1993. *An introduction to the bootstrap*. New York, Chapman & Hall.

Falorsi, P.D. en P. Righi, 2008. A balanced sampling approach for multi-way stratification designs for small area estimation. *Survey Methodology* 34(2): 223-234.

Ghosh, M. en J.N.K. Rao, 1994. Small area estimation: an appraisal. *Statistical Science* 9(1): 55-93.

Gruijter, J.J. de, D.J. Brus, M.F.P. Bierkens en M. Knotters, 2006. *Sampling for natural resources monitoring*. Berlijn, Springer.

Isaaks, M. en R.H. Srivastava, 1989. *Applied geostatistics*. New York, Oxford University Press.

Jansen, P.C., E.P. Querner en C. Kwakernaak, 2007. *Effecten van waterpeilstrategieën in veenweidegebieden : een scenariostudie in het gebied rond Zegveld*. Wageningen, Alterra-rapport 1516.

Kempen, B., G.B.M. Heuvelink, D.J. Brus en J.J. Stoorvogel, 2010. Pedometric mapping of soil organic matter using a soil map with quantified uncertainty. *European Journal of Soil Science* 61: 333-347.

Koorevaar, P., G. Menelik en C. Dirksen, 1983. *Elements of soil physics. Derde editie*. Amsterdam, Elsevier.

NHI, 2008. *Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI. Modelrapportage. Hoofdrapport, versie : NHIFASE\_1+12008\HR\_v2.*

Oostindie, K. en J.B.B. Bronswijk, 1995. Consequences of preferential flow in cracking clay soils for contamination-risk of shallow aquifers. *Journal of Environmental Management* 43(4): 359-373.

Rao, J.N.K., 2003. *Small area estimation.* New York, Wiley.

Ritsema, C.J., H. Kuipers, L. Kleiboer, H.G.M. van den Elsen, K. Oostindie, J.G. Wesseling, J.W. Wolthuis en P. Havinga, 2009. A new wireless underground network system for continuous monitoring of soil water contents. *Water Resources Research* 45: W00D36.

RIZA, HKV, Arcadis, KIWA, en Korbee en Hovelynck, 2006. *Droogtestudie Nederland. Aard, ernst en omvang van watertekorten in Nederland.* Den Haag, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Water. RIZA-rapport 2005.016.

Römkens, P.F.A.M., J.E. Groenenberg en L.T.C. Bonten, 2009. *Invloed van maatregelen t.b.v. de Kaderrichtlijn Water en op organische stof en zware metalen in de bodem en het oppervlaktewater.* Wageningen, Alterra-rapport 1824.

Soesbergen, G. van, C. van Wallenburg, K.R. van Lynden en H.A.J. van Lanen, 1986. *De interpretatie van bodemkundige gegevens.* Wageningen, STIBOKA-rapport 1967.

Stolte, J., J.G. Wesseling en S. Verzandvoort, 2007. *Kwaliteitsdocumentatie voor de verkrijging van Status A voor de gegevens van de Staringreeks zoals opgenomen in het gegevensbestand Priapus. Versie 1.* Wageningen, Alterra-rapport 1522.

Tietje, O. en M. Tapkenhinrichs, 1993. Evaluation of pedo-transfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1088-1095.

Tikkiwal, G.C. en A. Ghiya, 2000. A generalized class of synthetic estimators with application to crop acreage estimation for small domains. *Biometrical Journal* 42(7): 865-876.

Twaravaki, N.K.C., H. Saito, J. Simunek en M.Th. van Genuchten, 2008. A new approach to estimate soil hydraulic parameters using only soil water retention data. *Soil Science Society of America Journal* 72: 471-479.

Verzandvoort, S., H. Vroon, J. Wesseling, G. Bakker, K. Oostindie, G. Stoffelsen, N. Heidema en G. Heuvelink, 2011. *Programma Actualisatie BIS (BO-01-00-2). Deelproject Actualisatie Staringreeks.* Wageningen, Alterra-rapport 2238.

Vries, F. de, 1999. *Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken.* Wageningen, Staring Centrum-DLO rapport 654.

Vrugt, J. A., W. Bouten, H.V. Gupta en S. Sorooshian, 2002. Toward improved identifiability of hydrologic model parameters : the information content of experimental data. *Water Resources Research* 38(12): 1-12.

Vuuren, W.E. van, 1988. *Evaluatie DEMGEN : eindrapportage Werkgroep Landbouw PAWN 2.* Arnhem, Rijkswaterstaat, Dienst Binnenwateren/RIZA, Nota nr. 87.046.

Webster, R. and M.A. Oliver, 1992. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *Journal of Soil Science* 43: 177-192.

Wesseling, J.G. 2009. *Soil physical data and modeling soil moisture flow*. Wageningen University, PhD Thesis.

Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving, 1987. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Wageningen, Stiboka-rapport 1932, ICW-rapport 18.

Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst, 1988. *Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1: 250.000, ten behoeve van de PAWN-studie*. STIBOKA, Rapport 2055.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994*. Wageningen, Staring Centrum-DLO, Technisch Document 18.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001*. Wageningen, Alterra-rapport 153.





# **Bijlage 1    Prioriteitsvolgorde verzameling aanvullende gegevens**

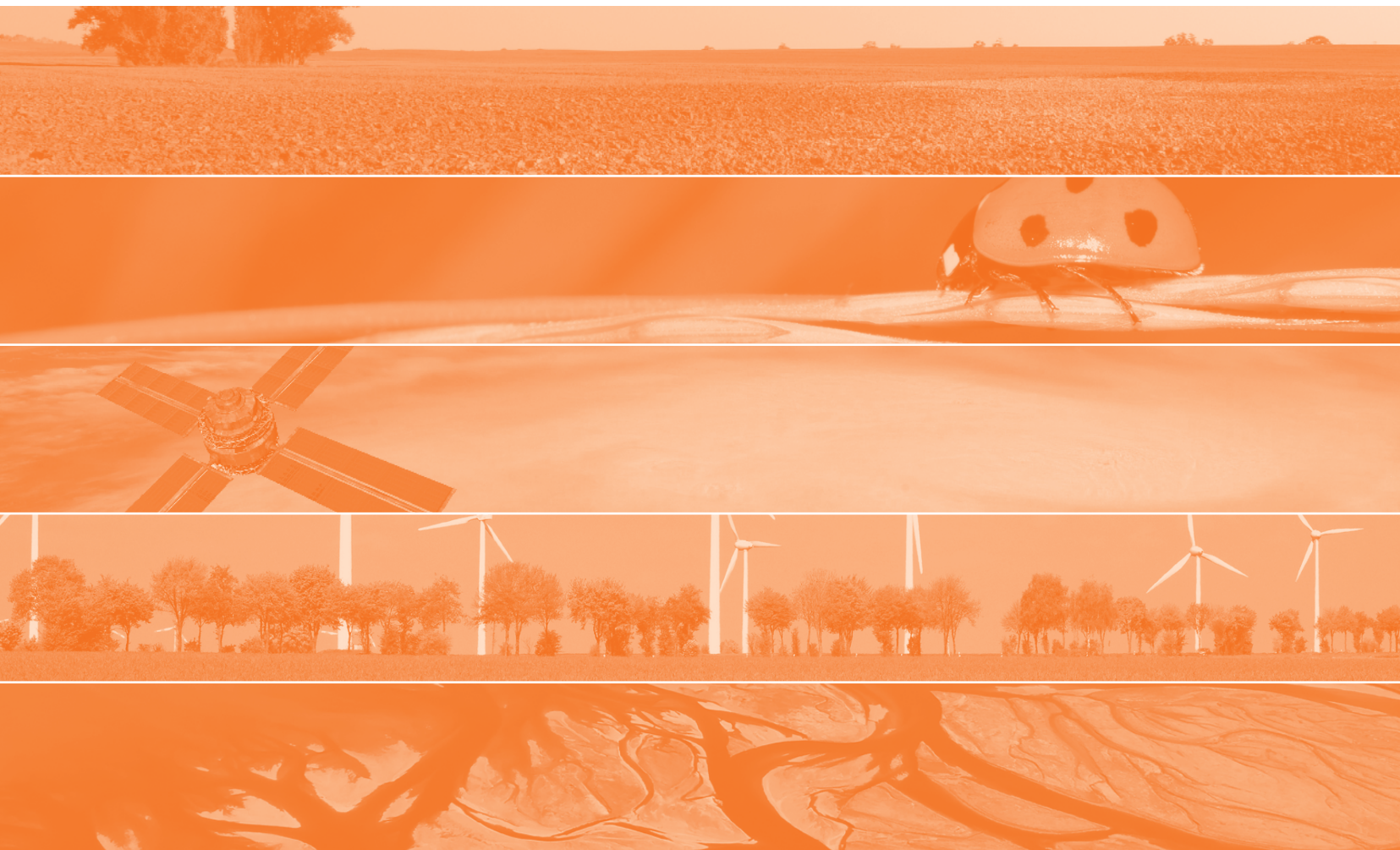
**Tabel B1**

Oppervlakten van klassen waarin nul of één Priapusmonster ligt, en prioriteitsvolgorde voor verzameling van aanvullende gegevens

Ingang	Klasse	Aantal monsters in Priapus	Oppervlakte		Prioriteit
			hectare	%	
Afzettingsmilieu	500 (keileem)	1	Bovengrond: 6197	0.14	
			Ondergrond: 138273	3.04	
			<b>Totaal: 144470</b>	<b>3.18</b>	<b>5</b>
Textuur eolische en sommige niet-eolische afzettingen: leemgehalte	Zeer sterk lemig zand	0	Bovengrond: 10672	0.23	
			Ondergrond: 39907	0.88	
			<b>Totaal: 50579</b>	<b>1.11</b>	<b>8</b>
	Zandige leem	1	Bovengrond: 16006	0.35	
			Ondergrond: 83864	1.84	
			<b>Totaal: 99869</b>	<b>2.20</b>	<b>6</b>
Textuur eolische en sommige niet-eolische afzettingen: M50 zandfractie	Uiterst fijn zand	1	Bovengrond, marien (200): <b>17511</b>	<b>0.38</b>	<b>10</b>
	Matig grof zand	0	Ondergrond, marien (200): 1918	0.04	
			Ondergrond, fluviatiel (300): 12852	0.28	
			Bovengrond, eolisch (400): 109058	2.40	
			Ondergrond, eolisch (400): 200360	4.40	
			Bovengrond, antropogeen (600): 10787	0.24	
	<b>Totaal: 334974</b>	<b>7.36</b>	<b>3</b>		
Zeer grof zand	0	Ondergrond, fluviatiel (300): <b>517</b>	<b>0.01</b>		
Textuur niet-eolische afzettingen: lutumgehalte	Kleiarm zand	0	Bovengrond, marien (200): 6575	0.14	
			Ondergrond, marien (200): 44629	0.98	
			Ondergrond, fluviatiel (300): 105541	2.32	
			<b>Totaal: 156745</b>	<b>3.45</b>	<b>4</b>
	Klei-arme silt	0	Ondergrond, marien (200): ?	?	
	Kleilig zand	0	Bovengrond, marien (200): 7675	0.17	
			Ondergrond, marien (200): 58430	1.28	
			<b>Totaal: 66105</b>	<b>1.45</b>	<b>7</b>
Kleilige silt	0	<b>0</b>	<b>0</b>		

Ingang	Klasse	Aantal monsters in Priapus	Oppervlakte		Prioriteit
			hectare	%	
	Zware zavel	1	Bovengrond, marien (200): 224448	4.93	
			Ondergrond, marien (200): 371655	8.17	
			Bovengrond, fluviaal (300): 121493	2.67	
			Ondergrond, fluviaal (300): 190143	4.18	
			<b>Totaal: 907739</b>	<b>19.96</b>	<b>1</b>
	Lichte klei	1	Bovengrond, marien (200): 201118	4.42	
			Ondergrond, marien (200): 330762	7.27	
			Bovengrond, fluviaal (300): 35493	0.78	
			Ondergrond, fluviaal (300): 131918	2.90	
			<b>Totaal: 699291</b>	<b>15.37</b>	<b>2</b>
Gehalte aan organische stof bij moerige gronden en veengronden	Venig zand	0	0	<b>0</b>	
	Venige klei	0	Bovengrond, moerig (100): 37249	0.82	
			Ondergrond, moerig (100): 1767	0.04	
<b>Totaal: 39016</b>	<b>0.86</b>	<b>9</b>			
<b>Totaal</b>			Bovengrond: 909823	20.00	
			Ondergrond: 1606995	35.33	
			<b>Totaal: 2516817</b>	<b>55.33</b>	





Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.