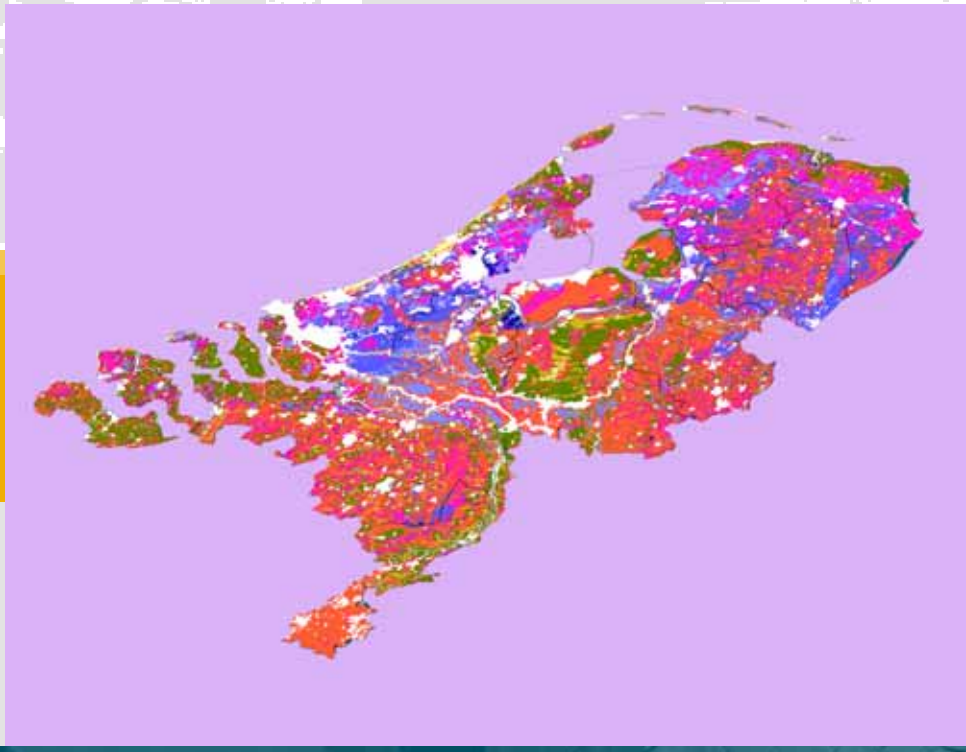
ALTERRA
WAGENINGEN UR

Monitoring van veranderingen in de koolstofvoorraad in de Nederlandse bodem

Ontwerp van een monitoringstrategie

T. Hoogland
M. Knotters
D.J. Brus
P.J. Kuikman



Alterra-rapport 1354, ISSN 1566-7197

Monitoring van veranderingen in de koolstofvoorraad in de Nederlandse bodem

In opdracht van LNV in het Beleidsondersteunend onderzoek, Cluster Vitaal Landelijk Gebied, thema Bodem

Monitoring van veranderingen in de koolstofvoorraad in de Nederlandse bodem

Ontwerp van een monitoringstrategie

Tom Hoogland, Martin Knotters, Dick Brus en Peter Kuikman

Alterra-Rapport 1354

Alterra, Wageningen, 2006

REFERAAT

Hoogland, T., M. Knotters, D.J. Brus en P. Kuikman, 2006. *Monitoring van veranderingen in de koolstofvoorraad in de Nederlandse bodem; ontwerp van een monitoringstrategie*. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1354. 54 blz.; 6 fig.; 2 tab.; 23 ref.

Het internationale klimaatverdrag van de Verenigde Naties en het Kyoto-protocol verplichten de Nederlandse overheid te rapporteren over de koolstofvoorraad in de bodem als functie van het landgebruik en over veranderingen hierin. Wij werken drie alternatieve strategieën voor monitoring van (veranderingen in) de C-voorraad uit, op basis van de verschillende internationale eisen en randvoorwaarden en de specifieke Nederlandse situatie ten aanzien van bodemgesteldheid, landgebruik en beschikbaarheid van gegevens.

Trefwoorden: koolstof, organische stof, monitoring, steekproefopzet, design-based sampling, ruimte-tijdsteekproef

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door € 20,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-Rapport 1354. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2006 Alterra
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

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 1354/augustus/2006]

Inhoud

Woord vooraf 7

Samenvatting 9

1 Inleiding 15

1.1 Achtergrond 15
1.2 Probleemstelling 15
1.3 Doelstelling 16
1.4 Opbouw van het rapport 16

2 Eisen en randvoorwaarden voor een monitoringstrategie 17

2.1 Internationale eisen en randvoorwaarden 17
2.2 Nederlandse omstandigheden en randvoorwaarden 18
2.2.1 Inleiding 18
2.2.2 Wisselend landgebruik 19
2.2.3 C-voorraden in bebouwd gebied 19
2.2.4 Aansluiting bij de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK) 19
2.2.5 Gebruik van de bodem- en Gt-kaart 1 : 50.000 20
2.2.6 C-voorraden in veen- en moerige gronden 20

3 Ontwerpkeuzes 23

3.1 Inleiding 23
3.2 Vaststellen van voorraden of veranderingen daarin? 23
3.3 Kwantitatieve of kwalitatieve informatie? 23
3.4 Vaste, wisselende of roterende bemonsteringslocaties? 24
3.5 Bepalingsmethode 26
3.6 Modelonafhankelijke schatting van nauwkeurigheid 29
3.7 Vergroting van nauwkeurigheid 29
3.8 Globale of lokale schattingen? 30
3.9 De rol van landgebruikinformatie 31
3.10 Oorzaken van veranderingen 32
3.11 Keuze voor een ruimtelijk steekproefpatroon 32

3.12 Flexibiliteit van het ontwerp 33
3.13 Implicaties van de verschillende ontwerpkeuzes 34

4 Uitwerking van alternatieve monitoringstrategieën 37

4.1 Inleiding 37
4.2 Statisch-synchroon patroon volgens LSK-steekproef met geharmoniseerde bepalingsmethode 38
4.3 Statisch-synchroon patroon met een ruimtelijke steekproef volgens een regelmatig grid 42
4.4 Synchroon patroon met gestratificeerde aselecte ruimtelijke steekproef 42

5 Aanbevelingen voor een monitoringstrategie 47

5.1 Aanbevelingen voor eisen en randvoorwaarden 47
5.2 Aanbevolen ontwerpkeuzes 47
5.3 Aanbevolen strategieën voor C-monitoring 49

6 Conclusies 51

Literatuur 53

Woord vooraf

Dit rapport doet verslag van een onderzoek naar strategieën voor monitoring van veranderingen van C-voorraden in de Nederlandse bodem. De resultaten van het onderzoek dragen bij aan het beleid van de Nederlandse overheid om verliezen van koolstof te beperken, conform de afspraken in het internationale klimaatverdrag van de Verenigde Naties en het Kyoto-protocol. Het project werd uitgevoerd als onderdeel van het thema Bodem van het cluster Vitaal Landelijk Gebied voor het Beleidsondersteunende Onderzoek (BO) van de beleidsdirectie Kennis van het ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit.

De auteurs zijn Willy de Groot, Gerard Heuvelink, Gert-Jan Nabuurs, Annemieke Smit, Folkert de Vries (Alterra) en Jan Verhagen (PRI) erkentelijk voor hun deskundige inbreng bij de voortgangsbespreking van het project. Gerard Heuvelink en Annemieke Smit namen het concept-rapport bovendien kritisch door, waarvoor dank.

Samenvatting

Inleiding

Nederland is als ondertekenaar van het klimaatverdrag van de Verenigde Naties en het Kyoto-protocol verplicht jaarlijks aan de internationale gemeenschap (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) te rapporteren over de koolstofvoorraad (C-voorraad) in de bodem als functie van landgebruik en over veranderingen in landgebruik. Vanuit de *EU Soil Strategy* is er bijzondere aandacht voor het veiligstellen van C-voorraden in kwetsbare gronden zoals bodems met minder dan 2% organische stof.

Nederland rapporteert C-voorraden in de bodem sinds 2005. Hierbij wordt de koolstofvoorraad bepaald aan de hand van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK). Veranderingen van de koolstofvoorraad zijn tot nu toe niet gekwantificeerd. De verandering van de C-voorraad is een langzaam proces; voor Engeland en Wales is een daling van gemiddeld 0.6% per jaar vastgesteld. Veranderingen kunnen hierdoor waarschijnlijk alleen over een langere periode en met intensief meten worden vastgesteld.

Het ***doel*** van dit onderzoek is een aantal alternatieven uit te werken voor een monitoringstrategie waarmee gerapporteerd kan worden over C-voorraden in de bodem en veranderingen hierin voor zes landgebruikscategorieën. De strategieën moeten voldoen aan de eisen die voortkomen uit het klimaatverdrag, het Kyoto-protocol en aan de richtlijnen voor harmonisatie in EU-kader. Met de monitoring-strategie moeten ook vragen die voort zullen komen uit de *EU Soil Strategy* kunnen worden beantwoord. Verder moet de strategie toegesneden zijn op de specifieke Nederlandse omstandigheden en beschikbaarheid van gegevens. De verschillende mogelijkheden worden vergeleken op aspecten zoals de flexibiliteit om verschillende soorten vragen te kunnen beantwoorden, gevoeligheid voor beïnvloeding van de resultaten, verwachte kosten en nauwkeurigheid.

Eisen en randvoorwaarden

Nederland wordt, gezien de eerdere rapportages over de C-voorraad gebaseerd op metingen, geacht te monitoren volgens een systematiek die zich laat vergelijken met eerdere rapportages en die daarom ook gebaseerd moet zijn op gemeten C-voor-raden.

Met monitoring dient per landgebruikscategorie de C-voorraad te worden geschat, en veranderingen in de C-voorraad over een periode (commitment period) van tussen de 5 tot 20 jaar dienen met 95% zekerheid te worden geschat. Om de meetinspan-ning voor het rapporteren van C-voorraden op EU-niveau te harmoniseren is een protocol opgesteld over de technische aspecten bij het vaststellen van C-voorraden in de bodem.

Nederland kent een aantal specifieke omstandigheden wat betreft de natuurlijke omstandigheden, de gehanteerde landbouwsystemen en de databeschikbaarheid waarmee rekening dient te worden gehouden bij het opzetten van een monitoring-systeem voor C-voorraden per landgebruikscategorie. Een belangrijk deel van de landbouwgronden kent een frequente wisseling, of een rotatiesysteem, tussen

bouwland en grasland. Omdat per landgebruikscategorie C-voorraden en veranderingen gerapporteerd moeten worden, dient hiermee bij het ontwerp van een monitoringstrategie rekening te worden gehouden. Grote delen van Nederland zijn vanwege hun lage ligging oorspronkelijk moerasgebieden (*wetlands*) met veengronden die na sterke ontwatering in gebruik zijn genomen voor landbouw, waardoor ook op groter diepten oxidatie van organisch materiaal optreedt. Nederland kent een relatief groot areaal bebouwd gebied, dat zeer gevarieerd is wat betreft de aanwezige C-voorraden en de wijze waarop deze door bebouwing of verharding zijn afgedekt. De bodem van Nederland is uitgebreid in kaart gebracht, maar per gebied verschilt de actualiteit en het detail van de kartering. Naast bodemkaarten zijn ook meetgegevens uit diverse bodemmeetnetten beschikbaar, met elk hun specifieke doelstelling, actualiteit en bepalingsmethoden.

Ontwerpkeuzes

Gegeven de internationale randvoorwaarden en eisen, de specifieke Nederlandse omstandigheden en de beschikbaarheid van gegevens zijn meerdere monitoringstrategieën denkbaar. De verschillende aspecten en overwegingen die hierbij een rol spelen worden hier verder uitgewerkt, uitmondend in drie monitoringstrategieën die onder de Nederlandse omstandigheden en randvoorwaarden geschikt zijn.

Jaarlijks wordt een rapportage van C-voorraden gevraagd. Het achterliggende doel is om met behulp van de gerapporteerde voorraden de *veranderingen* over een *commitment period* te kunnen vaststellen met de vereiste nauwkeurigheid van 95%. Hiervoor is een meetnet van vaste bemonsteringslocaties waar op verschillende tijdstippen een bepaling wordt verricht het meest geschikt. Door op de zelfde locaties opnieuw te bemonsteren kunnen veranderingen in de tijd immers het meest nauwkeurig worden vastgesteld. Een dergelijk patroon wordt een *statisch* patroon genoemd. Een bijkomend voordeel van een statisch patroon is dat het mogelijkheden biedt om waargenomen veranderingen op specifieke locaties te volgen, waardoor per locatie naar mogelijke verklaringen kan worden gezocht. Een statisch patroon heeft echter ook een aantal nadelen. Gedurende de periode van monitoring is het moeilijk om bij een statisch patroon over te schakelen op een andere strategie. Verder is de strategie beïnvloedbaar door landgebruikers en andere belanghebbenden.

De tegenpool van een statisch patroon is een *dynamisch* of *synchroon* patroon. Hierbij liggen de locaties niet vast; op elk meettijdstip worden nieuwe locaties bemonsterd. Bij een synchroon patroon wordt niet geprofiteerd van eventueel aanwezige temporele correlatie van de C-voorraad op een zelfde locatie, waardoor er vaak veel meer waarnemingen nodig zijn om met een bepaalde nauwkeurigheid veranderingen in de tijd vast te kunnen stellen. Het vaststellen van C-voorraden op de meettijdstippen (statusmonitoring) is echter goed mogelijk. Bij een synchroon patroon is er volledige vrijheid om het ruimtelijke steekproefontwerp in de loop van de tijd te wijzigen, bijvoorbeeld omdat er nieuwe vragen zijn, nieuwe eisen worden gesteld of nieuwe inzichten kunnen worden toegepast. In tegenstelling tot een statisch patroon is een synchroon patroon gevrijwaard van het risico van beïnvloeding door landgebruikers of andere belanghebbenden.

In een roterend patroon wordt in elke meetronde een deel van de steekproeflocaties van de vorige meetronde vervangen door nieuwe locaties. Het is als het ware een compromis tussen een statisch patroon en een synchroon patroon. Rotatiesteek-

proeven komen in principe in beeld wanneer zowel de actuele C-voorraad geschat moet worden als de verandering in de C-voorraad tussen twee meetrondes.
Het Joint Research Centre heeft een protocol opgesteld om de bepalingswijze voor C-voorraden in minerale bodems binnen de EU te harmoniseren. De voorgeschreven bepalingswijze verschilt echter van de bepalingswijze op basis van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK), die in Nederland voor eerdere rapportages is gebruikt. Als op een verbeterde bepalingswijze wordt overgegaan, moet worden bekeken in hoeverre geconstateerde verschillen in C-voorraad ten opzichte van de referentiesituatie het gevolg zijn van de verschillen in bepalingswijze. Dit kan vrij eenvoudig worden uitgevoerd door in de nieuwe monitoringstrategie eenmalig zowel volgens de nieuwe, geharmoniseerde, als volgens de oude bepalingswijze de C-voorraad vast te stellen, zodat de eerder verzamelde gegevens hiermee kunnen worden gecorrigeerd om een objectieve vergelijking mogelijk te maken.
Een gelijkmatige ruimtelijke verdeling van de steekproeflocaties over Nederland komt de nauwkeurigheid van de geschatte (verandering in) C-voorraad ten goede. In Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk wordt een regelmatig grid gehanteerd bij de selectie van meetlocaties. Voordeel van deze aanpak is dat in principe aanwezige landgebruiksvormen, bodemtypes en andere omstandigheden evenredig naar oppervlakte in de steekproef voorkomen. Nadeel is dat, vooral bij een grof grid, kleine deelgebieden met specifieke kenmerken niet of onvoldoende voorkomen in de steekproef.
Indien de ruimtelijke variatie van (de verandering in) de C-voorraad gerelateerd is aan vooraf bekende gebiedseigenschappen, is het zinvol deze kennis bij de opzet van een monitoringstrategie te benutten. Dit kan door het gebied te verdelen in deelgebieden (stratificatie). Een goede stratificatie vergroot de nauwkeurigheid van de voorspellingen of levert een vergelijkbare nauwkeurigheid met minder meetlocaties. Indien ook uitspraken over bepaalde bodemtypes, een specifiek beheer of combinaties hiervan gewenst zijn is het raadzaam hiermee al bij de stratificatie rekening te houden, zodat voldoende meetlocaties per deelgebied beschikbaar zijn. Vanuit de *EU Soil Strategy* bestaat bijvoorbeeld een bijzondere belangstelling voor bodems met minder dan 2% organische stof.
De nauwkeurigste schattingen van de C-voorraad mogen worden verwacht als monstername plaatsvindt op een tijdstip dat zo dicht mogelijk ligt bij het jaar waarvoor gerapporteerd wordt. Als om praktische redenen de monstername over meerdere jaren moet worden gespreid gaat dat ten koste van de nauwkeurigheid van schattingen voor een specifiek rapportagejaar. De temporele variatie in C-voorraad over meerdere jaren draagt bij tot de onzekerheid over de geschatte C-voorraad voor een specifiek rapportagejaar. De C-voorraad kent ook een seizoensdynamiek die samenhangt met de bewerking van het land en de weersgesteldheid. Het is daarom raadzaam om voor de bemonstering een zogenaamde indexperiode te hanteren. Deze indexperiode kan afhankelijk van het landgebruik verschillen in zowel tijdstip als lengte, omdat ieder landgebruik een specifieke dynamiek van bewerking kent. De bemonstering dient plaats te vinden binnen deze indexperiode. Meestal wordt hiervoor de winter gekozen.
Omdat rapportage van C-voorraden per landgebruikscategorie dient plaats te vinden en actuele landgebruiksinformatie veelal ontbreekt of van onvoldoende kwaliteit is, moet voor elke meetlocatie het landgebruik op het moment van monstername

geregistreerd worden. Onzekerheden over de kwaliteit en actualiteit van landgebruikgegevens voor grasland zouden ondervangen kunnen worden door een extra landgebruikscategorie te definiëren voor de rotatie van akkerbouw en grasland, zodat minder frequente wisseling optreedt tussen landgebruikscategorieën. Een andere mogelijkheid is het Deense monitoringsysteem te volgen en al het landbouwkundig gebruikt grasland bij de categorie bouwland (*cropland*) te voegen.

Uitwerking van alternatieve monitoringstrategieën

Drie monitoringstrategieën worden verder uitgewerkt, waarbij een inschatting wordt gemaakt van de haalbare nauwkeurigheid, de kosten en de praktische uitvoerbaarheid. De drie strategieën gaan uit van het monitoren van veranderingen in C-voorraden in de bovenste 30 cm van de bodem. De C-emissie uit veengronden en moerige gronden op grotere diepten valt buiten de monitoring. Voor bebouwde gebieden (settlements) en verhard oppervlak (other land) wordt verondersteld dat er geen verandering van de C-voorraad optreedt.

Alternatief 1 is een monitoringstrategie volgens een statisch-synchroon patroon, waarbij de locaties samenvallen met die van de Landelijke steekproef kaarteenheden (LSK). Bij een statisch-synchroon patroon wordt geprofiteerd van eventueel aanwezige temporele correlatie van de C-voorraad op een zelfde locatie, waardoor minder waarnemingen nodig zijn om met een bepaalde nauwkeurigheid veranderingen in de tijd vast te kunnen stellen. Door op eerder bemeten LSK-locaties terug te keren kan ook de verandering ten opzichte van de referentiesituatie zo nauwkeurig mogelijk worden vastgesteld.

Alternatief 2 is een monitoringstrategie die is gebaseerd op een statisch-synchroon patroon waarbij de locaties zijn geselecteerd volgens een systematische steekproef met een regelmatig grid. Door op dezelfde locaties terug te keren kan een verandering nauwkeurig worden vastgesteld. Dit patroon is door het ontbreken van alternatieve meetlocaties weinig flexibel, en schattingen van voorraden en veranderingen zijn niet gericht op deelgebieden. Dit patroon sluit het meest aan bij de monitoringstrategieën die worden gevolgd in Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk.

Alternatief 3 is gebaseerd op een synchroon patroon, waarbij de locaties worden geselecteerd volgens een gestratificeerde aselecte steekproef. Bij een synchroon patroon wordt niet geprofiteerd van eventueel aanwezige temporele correlatie van de C-voorraad op een zelfde locatie, waardoor er vaak veel meer waarnemingen nodig zijn om met een bepaalde nauwkeurigheid veranderingen in de tijd vast te kunnen stellen. Deze strategie kan wel eenvoudig worden gewijzigd, bijvoorbeeld bij een wijzigende vraagstelling, en is ongevoelig voor beïnvloeding.

Naast de drie uitgewerkte strategieën zijn diverse tussenvormen en combinaties mogelijk. Een afweging voor eventuele tussenvormen kan onderbouwd worden op basis van de overwegingen bij de ontwerpkeuze. Één tussenvorm, gelijk aan alternatief 1 maar met een andere gebiedsindeling en daardoor andere meetlocaties, willen we hier nog noemen. Dit alternatief heeft ten opzichte van alternatief 1 als voordeel dat er alle vrijheid is om nieuwe deelgebieden te kiezen specifiek gericht op veranderingen in de C-voorraad en aansluitend bij verwachte vragen uit bijvoorbeeld de *EU Soil Strategy*. Nadeel is dat minder nauwkeurig of tegen hoger kosten veranderingen ten opzichte van de referentiesituatie kunnen worden vastgesteld, omdat niet de meetlocaties van de LSK-steekproef worden herbemonsterd.

Aanbevelingen voor een monitoringstrategie

Indien beïnvloeding door belanghebbenden beslist moet worden vermeden, komt alleen alternatief 3 in aanmerking. Consequentie is dan wel dat de monitoring ofwel veel kost, ofwel tot onnauwkeurige schattingen van veranderingen zal leiden. Bovendien zal het niet mogelijk zijn om op locaties te zoeken naar verklaringen voor veranderingen in de C-voorraad. Ook indien het belangrijk is dat de ruimtelijke steekproefopzet in de toekomst kan worden gewijzigd (flexibiliteit), komt uitsluitend alternatief 3 in aanmerking, met de genoemde consequenties.

Als het belangrijk is dat veranderingen in de C-voorraad op locaties kunnen worden verklaard, dan komen alternatief 1 en 2 in aanmerking.

Indien het wenselijk is om voor deelgebieden C-voorraden en veranderingen daarin vast te kunnen stellen komen alternatief 1 en 3 in aanmerking. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij alternatief 1 de deelgebieden reeds vastliggen, terwijl deze in alternatief 3 nog gekozen kunnen worden. Als er geen eisen worden gesteld aan vermijden van beïnvloeding en flexibiliteit verdient alternatief 1 vanwege de geringere kosten de voorkeur.

Als het belangrijk is dat de verandering ten opzichte van de referentiesituatie zoals gerapporteerd in 2005 nauwkeurig wordt geschat, en er geen eisen aan vermijden van beïnvloeding en flexibiliteit worden gesteld, dan verdient alternatief 1 de voorkeur.

Voor alle alternatieven geldt dat bij elke bemonstering ook het landgebruik opgenomen dient te worden zodat correcte en actuele informatie over landgebruik voor de meetlocaties beschikbaar is. Deze informatie is nodig om per landgebruikscategorie veranderingen in de C-voorraad aan te geven.

Wij bevelen de bepalingswijze aan die op EU-niveau is geharmoniseerd. Bij de eerste bemonstering dienen C-voorraden zowel volgens de oude als de nieuwe, geharmoniseerde bepalingswijze te worden geschat. Bij latere rapportages kan worden volstaan met bepalingen volgens de nieuwe, geharmoniseerde bepalingswijze.

Conclusies

Op basis van de beschikbare gegevens konden in dit rapport drie alternatieve strategieën voor monitoring van veranderingen in de C-voorraad worden aanbevolen. Als de doelstellingen, eisen en randvoorwaarden, met name ten aanzien van kosten en nauwkeurigheid, exact gedefinieerd zijn, kan hieruit een optimale monitoringstrategie worden gekozen. Vervolgens kan een complete opzet voor monitoring worden ontwikkeld, die onder meer een beschrijving omvat van de statistische verwerkingsprocedures, de locaties en tijdstippen waarop wordt bemonsterd en een veld- en laboratoriumprotocol.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Omdat Nederland het klimaatverdrag van de Verenigde Naties heeft ondertekend en vervolgens ook het Kyoto-protocol, is het verplicht jaarlijks aan de internationale gemeenschap (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) te rapporteren over de koolstofvoorraad (C-voorraad) in de bodem als functie van landgebruik (zie De Groot *et al.*, 2005) en over veranderingen in landgebruik. Hier zijn vooral de bodems met grote C-voorraden relevant, omdat daarin ook een grote afname mogelijk is. In de *EU Soil Strategy* is vooral aandacht voor het veiligstellen van C-voorraden in kwetsbare bodem met weinig organische stof. Over bossen en natuurgebied wordt voor 'niet-bodem-koolstof' volgens een apart systeem gerapporteerd (Nabuurs *et al.*, 2003). Over bossen en natuurgebieden wordt voor 'niet-bodem-koolstof' volgens een apart systeem gerapporteerd (Nabuurs *et al.*, 2003).

Nederland rapporteert C-voorraden in de bodem sinds 2005 (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) en gebruikt daar protocollen voor die in 2005 zijn ontwikkeld op basis van werk van De Groot *et al.* (2005), Nabuurs *et al.* (2005) en Kuikman *et al.* (2005). In deze nationale systematiek wordt de koolstofvoorraad bepaald aan de hand van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK, Finke *et al.*, 2002) en landgebruik volgens topografische kaart (Kramer en Knol, 2005).

1.2 Probleemstelling

Met de huidige berekeningswijze (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) kunnen veranderingen in de koolstofvoorraad in de bodem niet worden gekwantificeerd. Het gaat om eenmalige waarnemingen, en gegevens over veranderingen in de C-voorraad in de bodem ontbreken. De verandering van de C-voorraad is een langzaam proces. Bellamy *et al.* (2005) rapporteren voor Engeland en Wales een daling van gemiddeld 0.6% per jaar, waardoor veranderingen alleen over een langere periode en met intensieve metingen kunnen worden vastgesteld. Veranderingen in de C-voorraad kunnen optreden bij veranderingen van landgebruik, of bij specifieke vormen van landgebruik waarbij de voorraden vermoedelijk stijgen zoals door koolstofvastlegging in bossen en permanente graslanden, of afnemen zoals verondersteld wordt bij akkerbouw. Bellamy *et al.* (2005) vinden voor Engeland en Wales geen relatie tussen landgebruik en vermindering van de C-voorraad. De veranderingen in C-voorraden als gevolg van landbouwkundige activiteiten dienen volgens artikel 3.4 van het Kyoto-protocol (IPCC, 2003) gerapporteerd te worden. Het gaat daarbij om:

- de veranderingen van de C-voorraad in de bodem als gevolg van veranderingen in landgebruik of beheer;
- de veranderingen van de C-voorraad in veengronden als gevolg van ontwatering of herstel van moerasgebied;
- de veranderingen van de C-voorraad in hout van bossen of boomgaarden;
- C-emissie door bekalking.

De landgebruikscategorieën waarvoor de C-voorraad in de bodem gerapporteerd dient te worden (IPCC, 2003) zijn bouwland, grasland, moeras (*wetlands*), bebouwd gebied (*settlements*), overig landgebruik, bossen en overige natuur. Daarnaast mag worden verwacht dat uit de *EU Soil Strategy* die momenteel wordt ontwikkeld een aantal vragen zullen voortkomen. Deze zullen waarschijnlijk gericht zijn op het verklaren van veranderingen in de C-voorraad in de bodem afhankelijk van de bodemkundige omstandigheden, het gevoerde beheer, vormen van landgebruik of landgebruiksystemen. Daarbij is er vanuit de *EU Soil Strategy* bijzondere aandacht voor het veiligstellen van C-voorraden in gronden met minder dan 2% organische stof.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is een aantal alternatieve monitoringstrategieën uit te werken waarmee gerapporteerd kan worden over C-voorraden in de bodem en veranderingen hierin voor zes landgebruikscategorieën (IPCC, 2003), en op basis van een vergelijking van deze alternatieven een aanbeveling te doen. De strategie moet voldoen aan de eisen die voortkomen uit het klimaatverdrag, het Kyoto-protocol (IPCC-richtlijnen) en aan de richtlijnen voor harmonisatie in EU-kader zoals opgesteld door het Joint Research Centre (JRC) (Stolbovoy *et al.*, 2005). Met de monitoringstrategie moeten vragen die voort zullen komen uit EU-richtlijnen en de te ontwikkelen *EU Soil Strategy* kunnen worden beantwoord. Verder moet de strategie toegesneden zijn op de specifieke Nederlandse omstandigheden en beschikbaarheid van data. De verschillende alternatieven worden vergeleken op aspecten zoals de flexibiliteit om verschillende soorten vragen te kunnen beantwoorden, gevoeligheid voor beïnvloeding van de resultaten, verwachte kosten en nauwkeurigheid.

1.4 Opbouw van het rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de eisen en de randvoorwaarden die gesteld worden aan een strategie voor C-monitoring. Hierbij onderscheiden we eisen en randvoorwaarden die internationaal gelden (§ 2.1) en eisen en randvoorwaarden die voortkomen uit specifiek Nederlandse omstandigheden (§ 2.2). Hoofdstuk 3 behandelt de keuzes die bij het ontwerp van een strategie voor C-monitoring moeten worden gemaakt. Op basis van de eisen en randvoorwaarden en ontwerpkeuzes zijn drie alternatieven voor een monitoringstrategie geselecteerd, die in hoofdstuk 4 worden uitgewerkt en vergeleken. In hoofdstuk 5 doen wij aanbevelingen voor een strategie voor C-monitoring in Nederland. Het rapport eindigt in hoofdstuk 6 met enkele conclusies.

2 Eisen en randvoorwaarden voor een monitoringstrategie

2.1 Internationale eisen en randvoorwaarden

Voor de rapportage van C-voorraden in de bodem (IPCC, 2003) zijn minimum vereisten geformuleerd (Tier1) in termen van eenvoudige modelbenaderingen, en worden mogelijkheden geschetst voor het gebruik van nationaal beschikbare data bij het nauwkeurig kwantificeren van C-voorraden. Binnen deze voorwaarden hebben landen vrijheid om een eigen systeem op te stellen, mits van goede kwaliteit en aantoonbaar beter dan de eenvoudigste methode (Tier1). Op het hoogste ambitieniveau (Tier3) wordt gewerkt met modellen of inventarisaties die gericht zijn op de specifieke nationale omstandigheden, waarbij de gehanteerde modellen via kwaliteitscontroles, audits en validatiestudies dienen te worden beoordeeld (IPCC, 2003). Nederland wordt, gezien de historie van rapportages op het gebied van de C-voorraad gebaseerd op metingen, geacht op het niveau van Tier 3 te monitoren volgens een systematiek die zich laat vergelijken met eerdere rapportages en die daarom ook gebaseerd moet zijn op gemeten C-voorraden.

Nederland rapporteert over de C-voorraden in de bodem sinds 2005 (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) en gebruikt daarvoor protocollen die zijn gebaseerd op De Groot *et al.* (2005), Nabuurs *et al.* (2005) en Kuikman *et al.* (2005). In deze nationale systematiek wordt de C-voorraad in de bovenste 30 cm bepaald aan de hand van bepalingen aan bodemmonsters zoals verzameld voor de LSK (Landelijke Steekproef Kaarteenheden, Finke *et al.*, 2002) en landgebruik volgens de topografische kaart (Kramer en Knol, 2005). De landgebruikscategorieën (LULUCF) waarover de C-voorraad in de bodem gerapporteerd dient te worden (IPCC, 2003) zijn bouwland, grasland, moeras (*wetlands*), bebouwd gebied (*settlements*), overig landgebruik, bossen en overige natuur.

De richtlijnen in het IPCC (2003) zijn erop gericht per LULUCF-categorie de C-voorraden en veranderingen hierin over een periode (*commitment period*) van tussen de 5 tot 20 jaar te schatten. Hiervoor dient vanaf een bepaald tijdstip (referentiejaar, meestal 1990) per LULUCF-categorie de gemiddelde C-voorraad en de nauwkeurigheid van dit gemiddelde te worden geschat. Voor de situatie 5 tot 20 jaar later dient hetzelfde te worden geschat, en dient de verandering met een zekerheid van 95% te worden geschat. Jaarlijks dient gerapporteerd te worden over C-voorraden en arealen per landgebruikscategorie, maar hiervoor zijn geen nauwkeurigheidseisen geformuleerd.

Recent is, om de meetinspanning voor het rapporteren van C-voorraden op EU-niveau te harmoniseren, een protocol van het Joint Research Centre (JRC) verschenen over de technische aspecten bij het vaststellen van C-voorraden in de bovenste 30 cm van de bodem en veranderingen daarin per landgebruiksplot (Stolbovoy *et al.*, 2005). Zou het JRC-protocol van Stolbovoy *et al.* (2005) naar de letter worden gevolgd, dan resteert er weinig ruimte voor de ontwikkeling van een monitoring-

strategie die toegesneden is op specifieke nationale omstandigheden en databeschikbaarheid, terwijl de IPCC (2003) hiervoor meer ruimte laat. Het JRC-protocol schrijft per LULUFC-plot een meetnet voor (zie Stolbovoy *et al.*, 2005), maar geeft niet aan hoe de C-voorraden per plot opgeschaald dienen te worden naar totale voorraden voor landgebruikscategorieën waarover gerapporteerd moet worden. Ook de monstername per landgebruiksplot en de bepalings- en berekeningswijze voor de C-voorraad per plot is in detail beschreven, en voorgeschreven is dat de verzamelde bodemmonsters dienen te worden bewaard. Het gebruik van eerder verzamelde gegevens voor vaststelling van de referentiesituatie conform deze voorschriften is hierdoor niet mogelijk, omdat in Nederland andere selectiemethoden voor meetlocaties zijn gehanteerd. Ook de bepalingswijzen voor het C-gehalte en bulkdichtheid zoals gehanteerd bij de LSK voldoen niet aan de voorschriften uit dit protocol.

Naast de genoemde richtlijnen en protocollen waaraan een monitoringstrategie moet voldoen zou bij het ontwerp geanticipeerd moeten worden op mogelijke toekomstige vragen zoals die voortkomen uit bijvoorbeeld de *EU Soil Strategy*. Voorziene vragen hebben betrekking op veranderingen van de C-voorraad voor bodemtypes met minder dan 2% organische stof en de gevolgen van specifiek bodembeheer of menselijk handelen op de C-voorraad in deze kwetsbare bodems. Ook het aanwijzen van 'Risk Areas' met kwetsbare bodems of gebieden waar organische stofgehalten sterk afnemen mag verwacht worden. Bij gerapporteerde veranderingen mogen vragen worden verwacht over de mogelijke oorzaken van deze veranderingen, al dan niet uitgesplitst naar bodemtype, landgebruik, landbouwsystemen, ontwateringsituatie of bodembeheer. Deze mogelijke toekomstige vragen vereisen flexibiliteit van het te ontwerpen monitoringsysteem.

2.2 Nederlandse omstandigheden en randvoorwaarden

2.2.1 Inleiding

Nederland kent een aantal specifieke omstandigheden zowel wat betreft de natuurlijke omstandigheden, de gehanteerde landbouwsystemen en de databeschikbaarheid die het lastig maken om een monitoringsysteem voor C-voorraden per landgebruikscategorie op te zetten.

Een belangrijk deel van de landbouwgronden kent een frequente wisseling, of een rotatiesysteem, tussen bouwland en grasland. Omdat per landgebruikscategorie C-voorraden en veranderingen gerapporteerd dienen te worden dient hiermee bij het ontwerp van een monitoringstrategie rekening te worden gehouden.

Grote delen van Nederland zijn vanwege hun lage ligging oorspronkelijk moerasgebieden (wetlands) met veengronden die na sterke ontwatering in gebruik zijn genomen voor landbouw waardoor ook op groter diepten oxidatie van organisch materiaal optreedt.
Nederland kent een relatief groot areaal bebouwd gebied, dat zeer gevarieerd is wat betreft de aanwezige C-voorraden en de wijze waarom deze door bebouwing of verharding zijn afgedekt.

De bodem van Nederland is uitgebreid in kaart gebracht, maar per gebied verschilt de actualiteit en het detailniveau waarmee kartering heeft plaatsgevonden. Naast bodemkaarten zijn ook meetgegevens uit diverse bodemmeetnetten beschikbaar, met elk hun specifieke doelstelling, actualiteit en bepalingsmethoden.

2.2.2 Wisselend landgebruik

Nederland kent in sommige gebieden een frequente wisseling van landgebruik, zoals rotaties van grasland en bouwland of korte onderbrekingen van gebruik als grasland voor bollen- of maïsteelt. De gebieden die zich hiervoor lenen zijn de relatief droge gronden waar bewerking relatief gemakkelijk is en die zowel voor gras- en bouwland geschikt zijn. De rapportageverplichting per landgebruikscategorie wordt hierdoor bemoeilijkt en kan leiden tot wisselende C-voorraden per landgebruikscategorie, terwijl aan de totale C-voorraad weinig verandert. Actuele informatie over het landgebruik, d.w.z. het landgebruik ten tijde van de opname, is door deze rapportageverplichting per landgebruikscategorie noodzakelijk. Een belangrijke vraag bij het ontwerpen van een monitoringstrategie is of de informatie over het landgebruik het beste gebruikt kan worden in de steekproeffase, d.w.z. bij de selectie van de steekproeflocaties, bijvoorbeeld door te stratificeren naar actueel landgebruik, of in de fase waarin de verzamelde steekproefgegevens inclusief het opgenomen landgebruik statistisch worden verwerkt. Voor het gebruik bij de selectie van steekproeflocaties is vooraf landsdekkende informatie over het actuele landgebruik noodzakelijk. Gezien de frequente wisselingen in landgebruik is het de vraag of gegevens over het actuele landgebruik wel landsdekkend beschikbaar zijn op het moment dat de locaties worden geselecteerd.

2.2.3 C-voorraden in bebouwd gebied

Het schatten van C-voorraden en veranderingen daarin onder bebouwd gebied (*settlements*) op basis van bepalingen aan bodemmonster is nauwelijks mogelijk omdat monsterlocaties slecht bereikbaar zijn. Daarnaast wordt in bebouwd gebied veelal een bouwlaag gestort die de oorspronkelijke bodem afdekt, zodat een bodemmonster van de bovenste 30 cm meestal niet de oorspronkelijke bodem betreft. Ook is de vraag in hoeverre de oorspronkelijke bodems in bebouwd gebied die grotendeels worden afgedekt door een bouwlaag en vervolgens door gebouwen of verharding nog kunnen bijdragen aan emissie. Voor bebouwde gebieden (*settlements*) en verhard oppervlak (*other land*) zal in het rapportagesysteem waarschijnlijk naar een pragmatische oplossing voor het rapporteren van C-voorraden en veranderingen hierin moeten worden gezocht.

2.2.4 Aansluiting bij de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK)

Om een verschil in de C-voorraad ten opzichte van de referentiesituatie te kunnen vaststellen ligt het voor de hand een bepalingswijze te kiezen die zich laat vergelijken met schattingen op basis van de LSK-steekproef of andere gegevens die in Nederland beschikbaar zijn. In het verleden is echter alleen een C-voorraad geschat op basis van organische-stofgehalte en schattingen van bulkdichtheid, terwijl voor

een nieuw op te zetten monitoringstrategie aangesloten zou moeten worden bij de poging tot harmonisatie van bepalingswijzen op EU-niveau van Stolbovoy *et al.* (2005). Hierin worden bepalingen van C-elementair aan mengmonsters en metingen van de bulkdichtheid van ongestoorde monster in 100cc-pF-ringen voorgesteld. De afweging die op dit punt moet worden gemaakt is of voortbouwen op de historische meetgegevens omwille van vergelijkbaarheid wenselijk is, of dat een verbeterde en geharmoniseerde bepalingswijze is gewenst, en afwijkingen ten opzichte van de bepalingswijze voor historische gegevens toelaatbaar zijn. Als een verbeterde bepalingswijze wordt gehanteerd moet worden bekeken in hoeverre geconstateerde verschillen in C-voorraad ten opzichte van de referentiesituatie het gevolg zijn van de verschillen in bepalingswijze. Dit kan vrij eenvoudig worden uitgevoerd door in de nieuwe monitoringstrategie eenmalig zowel volgens de nieuwe, geharmoniseerde, als volgens de oude bepalingswijze de C-voorraad vast te stellen, zodat de eerder verzamelde gegevens hiermee kunnen worden gecorrigeerd om een objectieve vergelijking mogelijk te maken. Dit garandeert echter niet dat bij voorraadschattingen voor de referentiesituatie op basis van beschikbare gegevens de vereiste nauwkeurigheid kan worden bereikt.

2.2.5 Gebruik van de bodem- en Gt-kaart 1 : 50.000

Nederland beschikt over een landsdekkende bodem- en Gt-kaart 1 : 50.000 (Steur en Heijink, 1991) en meetgegevens uit bodemmeeetnetten die in een bodemkundig informatiesysteem (BIS) zijn opgeslagen. Deze gegevens zijn deels niet meer actueel, maar bieden nog wel bruikbare informatie over patronen. Het ligt daarom voor de hand om gebruik te maken van deze gegevens, bijvoorbeeld door bij de selectie van steekproeflocaties te stratificeren naar bodemkaarteenheid.

2.2.6 C-voorraden in veen- en moerige gronden

Het areaal veengronden en moerige gronden in Nederland zal worden overschat als alleen gebruikt zou worden gemaakt van de bodemkaart 1:50:000, omdat sinds de kartering organisch materiaal is geoxideerd (De Vries, 2003; Pleijter, 2004).

Voor de meeste minerale gronden mag worden verwacht dat veranderingen in C-voorraden voor een belangrijk deel in de bovengrond plaatsvinden. Voor veengronden, moerige gronden en recent ingepolderde zeekleigronden mogen echter ook veranderingen op grotere diepten worden verwacht. Nederland heeft relatief veel veengronden en moerige gronden. Afhankelijk van de ontwateringsituatie en het gevoerde peilbeheer vindt in deze gebieden zakking van het maaiveld plaats, deels door compactie en deels door oxidatie van organisch materiaal (Kuikman *et al.*, 2004; Kuikman *et al.*, 2005). Als monitoring van de C-voorraad zich richt op de bovenste 30 cm van de bodem, zoals in huidige rapportage gebeurt (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) en zoals wordt voorgesteld door Stolbovoy *et al.* (2005), wordt het verdwijnen van organisch materiaal door oxidatie onderschat. Het schatten van C-voorraden en veranderingen daarin voor veengronden door metingen is lastig omdat veranderingen ook op grotere diepten plaatsvinden, die met gangbare meetmethoden moeilijk zijn vast te stellen. Het bemonsteren tot een vaste diepte van meer dan 30 cm ten

opzichte van maaiveld biedt hiervoor geen oplossing, omdat ook de bodeminhoud vermindert en daardoor bij latere bemonstering een ander deel van het profiel wordt bemonsterd. Het vaststellen van de C-voorraad door te meten tot op een vaste diepte waar geen oxidatie meer optreedt zou een oplossing kunnen bieden. Deze diepte zou dan echter binnen het profiel herkend of gemarkeerd moeten kunnen worden, zodat telkens hetzelfde bodemcompartiment wordt bemonsterd, ook al neemt dat door bodemdaling in volume af. In de huidige rapportage (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) worden naast C-voorraad schattingen voor de bovenste 30 cm voor alle bodemtypes separate schattingen gemaakt van C-emissie uit veengronden. Het lijkt raadzaam deze scheiding in een nieuw op te zetten monitoringstrategie te handhaven omdat het nauwkeurig meten van veranderingen in C-voorraden voor veengronden gecompliceerd is en om een veel tijdrovender bepalingswijze vraagt.

3 Ontwerpkeuzes

3.1 Inleiding

Gegeven de randvoorwaarden, eisen en de specifieke Nederlandse omstandigheden en beschikbaarheid van data die in het vorige hoofdstuk zijn besproken, zijn meerdere monitoringstrategieën denkbaar. Afhankelijk van de prioriteit die aan de verschillende rapportagedoelen en mogelijke toekomstige vragen wordt toegekend zal de voorkeur echter uitgaan naar één bepaald ontwerp. De verschillende aspecten en overwegingen die hierbij een rol spelen worden in dit hoofdstuk uitgewerkt, om te eindigen met een drietal monitoringstrategieën die onder de Nederlandse omstandigheden en randvoorwaarden geschikt zijn.

3.2 Vaststellen van voorraden of veranderingen daarin?

De rapportageverplichtingen zoals geformuleerd door de IPCC (2003) spreken van C-voorraden in de bodem voor elk van de zes LULUCF landgebruikscategorieën die jaarlijks gerapporteerd dienen te worden. Het achterliggende doel lijkt echter te zijn om met behulp van de gerapporteerde voorraden de *veranderingen* over een *commitment period* periode te kunnen vaststellen met een vereiste nauwkeurigheid. Indien vooral dit achterliggende doel, het vaststellen van een verandering, van belang is en de gerapporteerde voorraden slechts een middel zijn om veranderingen te berekenen, heeft dit gevolgen voor het ontwerp van een optimale monitoringstrategie.

Voor het vaststellen van veranderingen ten opzichte van de referentiesituatie (rond 1990) dient rekening te worden gehouden met een eventueel verschil in bepalingswijze van de C-voorraad. In § 3.5 gaan we hier nader op in.

3.3 Kwantitatieve of kwalitatieve informatie?

Een schatting van de C-voorraad of een schatting van een verandering in de C-voorraad noemen we kwantitatieve informatie. Een uitspraak of er een verandering is opgetreden is daarentegen kwalitatieve informatie. Feitelijk is er dan sprake van een toets met H0: er is geen verandering, en H1: er is een verandering. Een andere toets is bijvoorbeeld of de verandering een bepaalde norm overschrijdt, met H0: geen overschrijding, en H1: overschrijding van de norm. Zoals in § 2.1 is opgemerkt, wordt vooralsnog kwantitatieve informatie vereist. Het is echter denkbaar dat in de toekomst in het kader van de *EU Soil Strategy* ook kwalitatieve informatie wordt vereist in de vorm van een toets. In dat geval is het wenselijk om over een modelonafhankelijke schatting van de nauwkeurigheid te beschikken, zodat objectief kan worden getoetst. Bovendien is het bij het ontwerp van een monitoringstrategie ten behoeve van toetsing noodzakelijk om over de volgende informatie te beschikken:

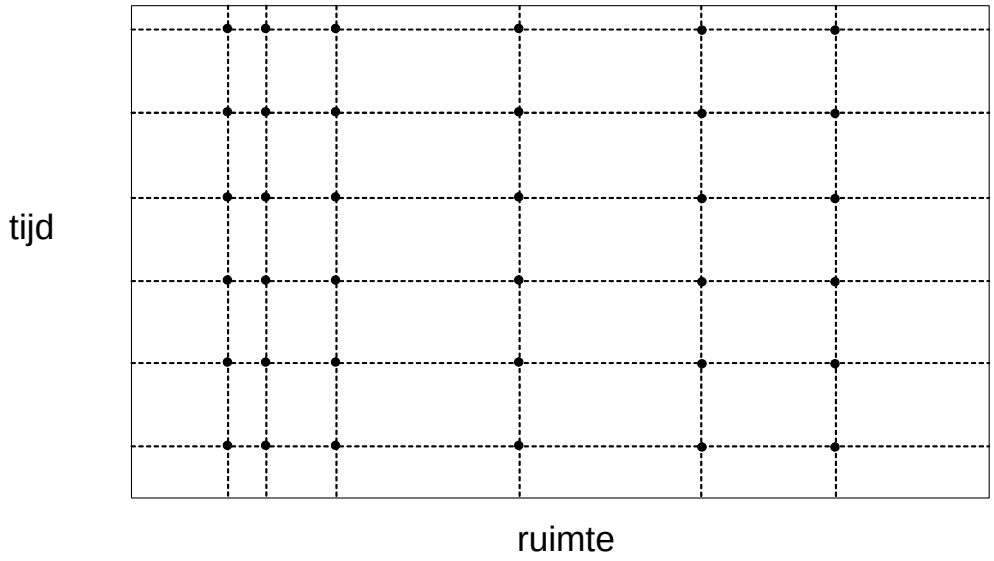
1. de onbetrouwbaarheidsdrempel α. Dit is de maximaal toelaatbare kans op het ten onrechte verwerpen van H0 (fout van de eerste soort). Vaak wordt -α=0.05 gekozen;

2. het verschil dat nog relevant is om te moeten worden aangetoond;
3. het onderscheidingsvermogen 1-β. Hierin is β de maximaal toelaatbare kans op het ten onrechte accepteren van H0 (fout van de tweede soort).

Verder is voorinformatie nodig over de ruimtelijke variantie van veranderingen in C-voorraad binnen het studiegebied en, in geval van gestratificeerde steekproeven, binnen strata.

3.4 Vaste, wisselende of roterende bemonsteringslocaties?

Indien het vaststellen van *veranderingen* in de C-voorraad het hoofddoel is, is een meetnet van vaste bemonsteringslocaties waar op verschillende tijdstippen een bepaling wordt verricht het meest geschikt (Särndal *et al.*, 1992). Een patroon waarbij telkens op vaste locaties wordt bemonsterd wordt een *statisch* patroon genoemd. Als tevens op alle locaties op dezelfde tijdstippen wordt bemonsterd, spreken we over een statisch-synchrooon patroon (Figuur 1).

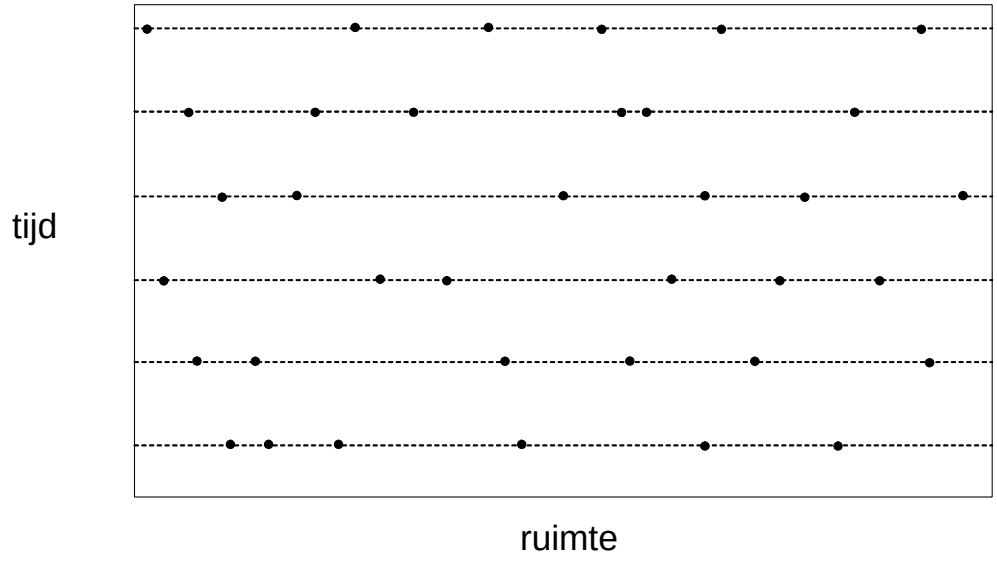


Figuur 1. Voorbeeld van een statisch-synchroon patroon. De tijdstippen zijn geselecteerd volgens een systematische steekproef met regelmatige intervallen, de locaties eenmalig volgens een enkelvoudige aselecte steekproef.

Omdat er sprake is van destructieve bemonstering kan niet op exact dezelfde locaties worden teruggekeerd, maar er kan wel op zeer korte afstand een nieuw monster worden genomen. Dit meermaals bemonsteren op vrijwel dezelfde locaties heeft alleen een voordeel als de variatie op korte afstand gering is. Bellamy *et al.* (2005) tonen voor Engeland en Wales aan dat dit het geval is. Op basis van geschatte C-voorraden op de locaties van de LSK-steekproef is een per stratum gestandaardiseerd semivariogram geschat, waaruit blijkt dat ook in de Nederlandse situatie de korte-afstandsvariatie van C-voorraden gering is (zie § 4.2). Een voordeel van een statisch patroon is dat het mogelijkheden biedt om waargenomen veranderingen op specifieke locaties te volgen, waardoor per locatie naar mogelijke verklaringen kan worden gezocht (zie § 3.10).

De keuze van vaste bemonsteringslocaties heeft ook een aantal nadelen. Gedurende de periode van monitoring is het moeilijk om bij een statisch patroon over te schakelen op een andere strategie. Kleine aanpassingen binnen een bepaalde ruimtelijke steekproefopzet zijn weliswaar mogelijk, maar een overschakeling naar een andere ruimtelijke steekproefopzet is niet mogelijk. Een dergelijke keuze kan nodig zijn als in de loop van de tijd nieuwe eisen aan het monitoringontwerp worden gesteld. Daarnaast heeft, door telkens terug te keren op een vaste locatie, de landgebruiker of een andere belanghebbende de mogelijkheid om toekomstige metingen te beïnvloeden. Ook kunnen meetlocaties in de loop der tijd door allerlei activiteiten ontoegankelijk worden, waardoor locaties afvallen en alternatieve locaties moeten worden gezocht.

De tegenpool van een statisch patroon is een *dynamisch* of *synchroon* patroon (Figuur 2). Hierbij liggen de locaties niet vast; op elk meettijdstip worden nieuwe locaties bemonsterd. Bij een synchroon patroon wordt niet geprofiteerd van eventueel aanwezige temporele correlatie van de C-voorraad op een zelfde locatie, waardoor er vaak veel meer waarnemingen nodig zijn om met een bepaalde nauwkeurigheid veranderingen in de tijd vast te kunnen stellen. Het vaststellen van C-voorraden op de meettijdstippen (status-monitoring) is echter goed mogelijk. Bij een synchroon patroon is er volledige vrijheid om het ruimtelijke steekproefontwerp in de loop van de tijd te wijzigen, bijvoorbeeld omdat er nieuwe vragen zijn, nieuwe eisen worden gesteld of nieuwe inzichten kunnen worden toegepast. In tegenstelling tot een statisch patroon is een synchroon patroon gevrijwaard van het risico van beïnvloeding door landgebruikers of andere belanghebbenden, hetgeen door IPCC (2003) wordt bepleit. De prijs voor deze voordelen van een synchroon patroon is echter dat er veel meer waarnemingen nodig zijn dan bij een statisch patroon om met een bepaalde nauwkeurigheid veranderingen vast te stellen.



Figuur 2. Voorbeeld van een synchroon patroon. De tijdstippen zijn geselecteerd volgens een systematische steekproef met regelmatige intervallen. De locaties zijn telkens geselecteerd volgens een enkelvoudige aselecte steekproef.

In een roterend patroon wordt in elke meetronde een deel van de steekproeflocaties van de vorige meetronde vervangen door nieuwe locaties. Het is als het ware een compromis tussen een statisch patroon waarin 0% van locaties wordt vervangen, en een synchroon patroon waarin 100% van de locaties wordt vervangen. Rotatiesteekproeven komen in principe in beeld wanneer zowel de actuele C-voorraad geschat moet worden als de verandering in de C-voorraad tussen twee meetrondes. Door overlap tussen de twee steekproeven van opeenvolgende meetrondes kunnen de metingen uit de vorige meetronde als een hulpvariabele worden gebruikt bij het schatten van de C-voorraad tijdens de tweede meetronde. Voor een voorbeeld verwijzen we naar Rietra *et al.* (2005). De winst in nauwkeurigheid ten opzichte van een synchroon patroon hangt af van de temporele correlatie tussen de C-voorraden op de twee tijdstippen: des te sterker deze correlatie, des te meer winst. Een overlap van 100% zoals in een statisch-synchroon patroon, is weer teveel van het goede wanneer de ruimtelijke variatie sterk is ten opzichte van de temporele variatie, Voor het schatten van een verandering in C-voorraden is een roterend patroon over het algemeen minder efficiënt dan een statisch-synchroon patroon, maar nauwkeuriger dan een synchroon patroon.

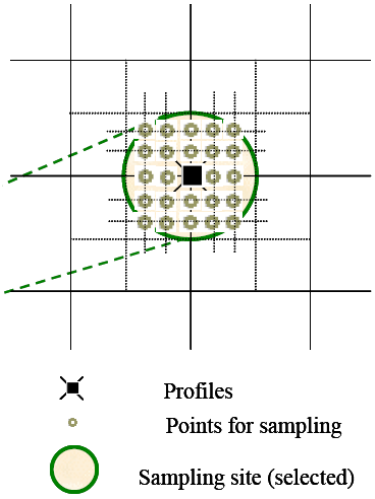
3.5 Bepalingsmethode

De huidige rapportage over C-voorraden (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) maakt gebruik van gegevens die zijn verzameld voor de Landelijke steekproef kaarteenheden (LSK, Finke *et al.*, 2002), en is gebaseerd op metingen van het organische-stofgehalte tot een diepte van 30 cm. Daaruit is de C-voorraad geschat gebruikmakend van schattingen over het koolstofgehalte in organische stof (50%), de dikte van bodemhorizonten en de met regressiemodellen (pedotransferfuncties) geschatte bulkdichtheid (Kuikman *et al.*, 2003). De bodemmonsters waarvoor organische-stofgehalten zijn

bepaald zijn enkelvoudige monsters, dat wil zeggen dat op één locatie monsters zijn genomen die ongemengd worden geanalyseerd.

In andere Europese landen worden C-voorraden geschat op basis van bepalingen in de bovengrond, soms zelfs ondieper dan 30 cm. In het Verenigd Koninkrijk gebeurt dit op basis van McGrath en Loveland (1992), in Frankrijk op basis van Arrouys *et al.* (2001). Het Joint Research Centre (Stolbovoy *et al.*, 2005) heeft een protocol opgesteld om de bepalingswijze voor C-voorraden in minerale bodems binnen de EU te harmoniseren. Hierin wordt voorgesteld het bodemcompartiment tot 30 cm diepte te beschouwen. De voorgeschreven bepalingswijze verschilt echter wel van de bepalingswijze die door Kuikman *et al.* (2003) is gebruikt. De bepalingswijze die Stolbovoy *et al.* (2005) voorschrijven is gebaseerd op de Internationale Standaard (ISO/FDIS 10381-1:2002(E)) over de vaststelling van een referentiesituatie die voorafgaat aan activiteiten die mogelijk de samenstelling of kwaliteit van bodems beïnvloeden.

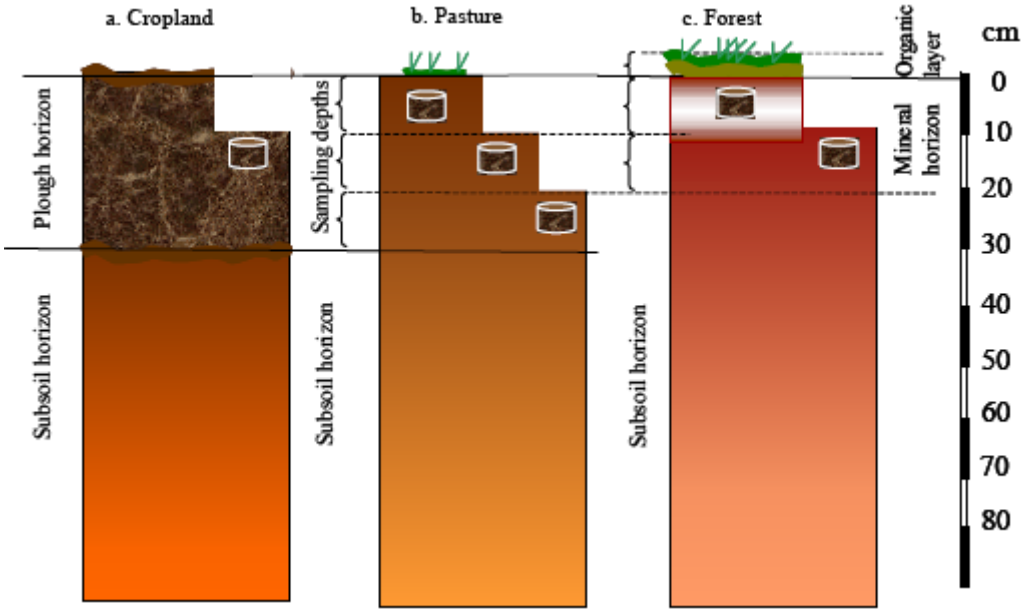
Stolbovoy *et al.* (2005) stellen een C-elementair-bepaling voor op een mengmonster van ten minste 500 gram, dat bestaat uit 25 steken die zijn genomen in een regelmatig grid, waarbij in het middelpunt de bulkdichtheid op een ongestoord monster van ten minste 100cc wordt bepaald (Figuur 3).



Figuur 3. Schema voor bemonstering van C in de bovengrond, volgens Stolbovoy et al. (2005).

De locatie van genomen meetlocatie dient exact, met GPS, te worden vastgelegd en het resterende bodemmonster dient te worden bewaard.

Bemonstering dient plaats te vinden tot een diepte van 30 cm onder maaiveld in het midden van één of meerdere diepte-intervallen, afhankelijk van het landgebruik (zie Figuur 4).



Figuur 4. Locaties van steken voor een mengmonster en bemonsteringsdiepten per type landgebruik, volgens Stolbovoy et al. (2005).

Berekening van de C-voorraad tot 30 cm vindt plaats volgens de volgende formule:

$$C_{0-30} = \sum_{laag=1}^{L} C_{laag} * \rho_{laag} * D_{laag} * (1 - frag_{laag}),$$

waarin C_{laag} [g/kg] het koolstof gehalte per laag is, φ_{laag} [g/cm^3] de bulkdichtheid per laag, D_{laag} [cm] de dikte per laag, $frag_{laag}$ de fractie grove delen per laag [-] en L het aantal lagen binnen 30 cm.

Om een verschil in de C-voorraad ten opzichte van de referentiesituatie te kunnen vaststellen ligt het voor de hand een bepalingswijze kiezen die zich laat vergelijken met schattingen op basis van de LSK-steekproef. Voor een nieuw op te zetten monitoringstrategie ligt het voor de hand aan te sluiten bij de poging tot harmonisatie van bepalingswijzen op EU-niveau van Stolbovoy *et al.* (2005). De afweging die op dit punt moet worden gemaakt is of voortbouwen op de historische meetgegevens omwille van vergelijkbaarheid wenselijk is, of dat een verbeterde en geharmoniseerde bepalingswijze wenselijk is en afwijkingen ten opzichte van de bepalingswijze voor historische gegevens toelaatbaar zijn. Als een verbeterde bepalingswijze wordt gehanteerd moet worden bekeken in hoeverre geconstateerde verschillen in C-voorraad ten opzichte van de referentiesituatie het gevolg zijn van de verschillen in bepalingswijze. Dit kan vrij eenvoudig worden uitgevoerd door in de nieuwe monitoringstrategie eenmalig voor een aantal monsters op zowel de nieuwe, geharmoniseerde, als de oude bepalingswijze de C-voorraad vast te stellen, zodat de eerder verzamelde gegevens hiermee gecorrigeerd kunnen worden om een objectieve vergelijking mogelijk te maken.

3.6 Modelonafhankelijke schatting van nauwkeurigheid

De richtlijnen van het IPCC (2003) en de Europese richtlijn (Stolbovoy *et al.*, 2005) geven geen voorkeur aan voor een modelgebaseerde of modelonafhankelijke schatting van de nauwkeurigheid. Een keuze voor modelonafhankelijke schattingen met behulp van *design-based* methoden ligt echter voor de hand. Bij een *design-based* benadering hoeven geen veronderstellingen te worden gemaakt over correlatiestructuren, waardoor een modelonafhankelijke schatting van de nauwkeurigheid mogelijk is, wat een voordeel is bij onder andere toetsen waarbij waarde aan objectiviteit en validiteit wordt gehecht (Brus en De Gruijter, 1997).

3.7 Vergroting van nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van schattingen van de C-voorraad of veranderingen daarin voor bepaalde gebieden, bodemtypes of landgebruikscategorieën wordt bepaald door meetfouten, de ruimtelijke variatie in voorraden of veranderingen en het aantal meetlocaties waarop deze voorraden of veranderingen zijn bepaald. Naarmate er meer variatie aanwezig is in de voorraden zoals bepaald op de meetlocaties zal een schatting van de voorraad minder nauwkeurig zijn. Naarmate er meer meetlocaties gebruikt worden voor het schatten van een C-voorraad zullen de schattingen nauwkeuriger worden.

Indien de variatie van C-voorraden gerelateerd is aan vooraf bekende gebiedseigenschappen, is het zinvol hiermee bij de opzet van een monitoringstrategie rekening te houden. Dit kan door het gebied te verdelen in deelgebieden (stratificatie). Een goede stratificatie vergroot de nauwkeurigheid van de voorspellingen of levert een vergelijkbare nauwkeurigheid met minder meetlocaties op (De Gruijter *et al.*, 2006). Indien ook uitspraken over bepaalde bodemtypes, een specifiek beheer of landgebruik en combinaties hiervan gewenst zijn is het raadzaam hiermee al bij de stratificatie rekening te houden, zodat wordt voorkomen dat voor weinig voorkomende combinaties te weinig meetlocaties beschikbaar zijn. Vanuit de *EU Soil Strategy* mag bijvoorbeeld een bijzondere belangstelling voor gronden met een intensief landbouwkundig gebruik en minder dan 2% organische stof verwacht worden. Indien de C-voorraden per stratum geschat zijn is het mogelijk op basis van de ruimtelijke ligging van strata een vlakkenkaart te maken, waarmee deze gronden gelokaliseerd kunnen worden.

Voor het vervaardigen van de bodemkaarten worden reeds sinds tientallen jaren organische stofgehaltes bepaald en ook in bodemmeetnetten en voor bemestingsadviezen in opdracht van landgebruikers worden met grote regelmaat organische stofbepalingen uitgevoerd. Deze gegevens zijn niet verzameld door middel van loting volgens een goed gedefinieerde steekproefopzet (kanssteekproef), en kunnen daarom niet rechtstreeks gebruikt worden in *design-based* schattingen van de C-voorraad. Eventueel zouden deze bestaande puntgegevens na interpolatie wel gebruikt kunnen worden als een hulpvariabele in een regressieschatter, zoals beschreven door Brus en De Gruijter (2003).

De nauwkeurigste schattingen van de C-voorraad mogen worden verwacht als monstername plaatsvindt op een tijdstip dat zo dicht mogelijk ligt bij het tijdstip (jaar) waarvoor gerapporteerd wordt. Het is daarom aan te bevelen de monstername te concentreren in een zo kort mogelijke periode waarvoor een rapportageverplichting geldt. Als om praktische redenen, bijvoorbeeld de beschikbaarheid van gekwalificeerd personeel, de monstername over meerdere jaren moet worden gespreid, dan gaat dat ten koste van de nauwkeurigheid van schattingen voor een specifiek rapportagejaar. De temporele variatie in C-voorraad over meerdere jaren draagt bij tot de onzekerheid over de geschatte C-voorraad voor een specifiek rapportagejaar.

Bellamy *et al.* (2005) rapporteren een afname van de C-voorraad met gemiddeld 0.6% per jaar in Engeland en Wales. Gezien deze beperkte temporele dynamiek in C-voorraden en de goedkeuring van IPCC (2003) om C-voorraden voortschrijdend te middelen over meerdere jaren kan monstername wellicht over meerdere jaren worden gespreid.

De C-voorraad kent ook een seizoensdynamiek die samenhangt met de bewerking van het land en de weersgesteldheid. Zo zullen gewasresten die worden ondergeploegd geleidelijk worden afgebroken tot humus. Indien kort na onderploegen wordt bemonsterd zullen de gewasresten vanwege hun grootte worden uitgezeefd, terwijl wanneer later in het seizoen wordt bemonsterd een deel van de gewasresten reeds in humus zal zijn omgezet en worden meegerekend voor de C-voorraad. Het is daarom raadzaam om voor de bemonsteringsperiode binnen een jaar een zogenaamde indexperiode te hanteren. Deze indexperiode kan afhankelijk van het landgebruik verschillen in zowel tijdstip als lengte, omdat ieder landgebruik een specifieke dynamiek van bewerking kent. De bemonstering dient plaats te vinden binnen deze indexperiode. Meestal wordt hiervoor de winter gekozen. Ook de GPG (IPCC, 2003) en Stolbovoy *et al.* (2005) raden dit aan.

3.8 Globale of lokale schattingen?

Omdat de C-voorraad in de bodem of veranderingen daarin per landgebruikscategorie dienen te worden gerapporteerd, is het niet nodig om gedetailleerde ruimtelijke voorspellingen te doen. Om deze reden, en vanwege de eis van een modelonafhankelijke schatting van de nauwkeurigheid (zie § 3.6), komt een *design-based* steekproefstrategie het eerst in aanmerking. Zoals in § 3.7 al is opgemerkt, kunnen, door bij een *design-based* benadering deelgebieden of strata te onderscheiden op basis van bodemtype, beheer, landbouwsysteem of ontwateringsituatie, voor deze deelgebieden schattingen worden gemaakt, waardoor een ruimtelijk beeld ontstaat van (veranderingen in) de C-voorraad. Nadeel van deze aanpak is dat al op voorhand de eenheden waarvoor voorraden geschat dienen te worden bekend moeten zijn, omdat anders het risico bestaat dat voor bepaalde eenheden onvoldoende metingen beschikbaar zijn. Dit risico wordt groter naarmate voor kleinere ruimtelijke eenheden voorraden geschat dienen te worden; voor grote eenheden is het risico op weinig waarnemingen immers gering. Vragen vanuit de *EU Soil Strategy* hebben betrekking op veranderingen van de C-voorraad voor bodemtypes met minder dan 2% organische stof en de gevolgen van specifiek bodembeheer of menselijk handelen op

de C-voorraad in deze kwetsbare bodems. Ook het aanwijzen van 'Risk Areas' met kwetsbare bodems of gebieden waar organische stofgehalten sterk afnemen mag verwacht worden. Daarom is het aan te raden het maken van kaartjes voor deze deelgebieden in het toekomstig monitoring systeem mogelijk te maken.

Met *model-based* methoden is het mogelijk om ruimtelijke voorspellingen te doen voor willekeurige locaties, onafhankelijk van een bepaalde gebiedsindeling. Indien het vervaardigen van kaarten met een hoge resolutie, bijvoorbeeld rasterkaarten, het hoofddoel zou zijn ligt een *model-based* benadering het meest voor de hand. Er wordt dan met behulp van geostatistische modellen, waarbij veronderstellingen worden gemaakt over ruimtelijke correlaties, een voorspelling gedaan van de waarde op een punt of rastercel, zonder dat daarbij *per se* een koppeling met gegevens uit een bodem- of landgebruikkaart nodig is. Overigens kan ook bij een *model-based* benadering de nauwkeurigheid worden vergroot door te stratificeren. Nadeel van een *model-based* benadering is dat geen modelonafhankelijke schatting van de nauwkeurigheid mogelijk is (Brus en De Gruijter, 1997). Deze berust namelijk op veronderstellingen over de ruimtelijke correlatie, zoals die beschreven is met een semivariogrammodel. Voor een *model-based* benadering leent zich het best een configuratie van bemonsteringslocaties met een gelijkmatige ruimtelijke verdeling over het in kaart te brengen gebied, bijvoorbeeld een regelmatig grid. Om correcte veronderstellingen over de ruimtelijke correlatie te kunnen maken dient echter ook de korte-afstandsvariatie geschat te kunnen worden. Omdat dit op basis van metingen volgens een regelmatig grid niet mogelijk is, zou een aparte set waarnemingen nodig zijn om een semivariogram te schatten.

3.9 De rol van landgebruikinformatie

Het landgebruik in Nederland wisselt frequent doordat intensief grasland regelmatig wordt gescheurd en voor een of meerdere jaren als bouwland (meestal maïs, soms bloembollen) wordt gebruikt (De Groot *et al.*, 2005). Het is daarom twijfelachtig of een monitoringstrategie gebaseerd op (historische) landgebruiksgegevens wenselijk is en of actuele gegevens over het landgebruik op het moment van monstername beschikbaar zijn. Omdat rapportage van C-voorraden per LULUCF-landgebruikscategorie dient plaats te vinden en actuele landgebruiksinformatie veelal ontbreekt of van onvoldoende kwaliteit is, moet voor elke meetlocatie het landgebruik op het moment van monstername geregistreerd worden. Met deze informatie, eventueel aangevuld met andere gebiedsdekkende gegevens over het landgebruik, kan achteraf bij de verwerking van de gegevens een onderscheid naar landgebruikscategorieën worden gemaakt (poststratificatie, De Guijter *et al.*, 2006, blz. 116-117).

De LULUCF-landgebruikscategorieën waarvoor over de C-voorraad in de bodem gerapporteerd dient te worden (IPCC, 2003) zijn bouwland (*cropland*), grasland (*grassland*), moeras (*wetlands*), bebouwd gebied (*settlements*), bossen (*forest land*), overige natuur en overig landgebruik (*other land*). Omdat het landgebruikscategorieën betreft die ieder op een aanzienlijk areaal voorkomen mag bij aselecte keuze van de meetlocaties worden verwacht dat meetpunten in iedere landgebruikscategorie voorkomen. Daardoor is het niet noodzakelijk dit middels een stratificatie op landgebruik

af te dwingen, hetgeen gezien het ontbreken van actuele, kwalitatief goede landgebruiksinformatie een voordeel is. Onzekerheden over de kwaliteit en actualiteit van landgebruikgegevens voor grasland zouden ondervangen kunnen worden door een extra landgebruikscategorie te definiëren voor de rotatie van akkerbouw en grasland, zodat minder frequente wisseling optreedt tussen landgebruikscategorieën. Gebieden die nu een permanent gebruik kennen, kunnen in de toekomst echter overgaan op een rotatie van landgebruik of vice versa. Deze moeilijkheden kunnen voorkomen worden door het Deense monitoringsysteem (Oleson, 2006) te volgen en al het landbouwkundig gebruikt grasland bij de categorie bouwland (*cropland*) te voegen.

3.10 Oorzaken van veranderingen

Over de oorzaken en achtergronden van gerapporteerde veranderingen kunnen aanvullende vragen worden verwacht. Deze hebben betrekking op veranderingen van de C-voorraad voor bodemtypes met weinig organische stof en de gevolgen van specifiek bodembeheer of bepaalde activiteiten op veranderingen in de C-voorraad. Ook zullen bij gerapporteerde veranderingen vragen verwacht mogen worden over de mogelijke oorzaken van deze veranderingen, al dan niet uitgesplitst naar bodemtype, grondgebruik, ontwateringsituatie, peilbeheer of bodembeheer.

Een monitoringstrategie met vaste meetlocaties, een statisch patroon (zie § 3.4), biedt mogelijkheden om waargenomen veranderingen op specifieke locaties te volgen. Afhankelijk van wisselingen in landgebruik, beheer of andere omstandigheden kan dan per locatie naar mogelijke verklaringen worden gezocht. Een strategie met wisselende meetlocaties biedt deze mogelijkheden in veel mindere mate omdat veranderingen in te tijd lastig zijn te scheiden van ruimtelijke variatie en omdat mogelijke oorzaken niet aan een specifieke locatie te koppelen zijn.

3.11 Keuze voor een ruimtelijk steekproefpatroon

Een goede verdeling van de steekproeflocaties over Nederland komt de nauwkeurigheid van de geschatte (verandering in) C-voorraad ten goede. De meest eenvoudige manier om dit te bereiken is bemonstering volgens een regelmatig grid. In Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk wordt een regelmatig grid gehanteerd voor bij de selectie van meetlocaties (Arrouays *et al.*, 2001; McGrath en Loveland, 1992). Voordeel van deze aanpak is dat in principe aanwezige landgebruiksvormen, bodemtypes en andere omstandigheden evenredig naar oppervlakte in de steekproef voorkomen. Nadeel is dat, vooral bij een grof grid, kleine deelgebieden met specifieke kenmerken niet of onvoldoende voorkomen in de steekproef. Als toekomstige vragen gericht op specifieke gebieden worden verwacht, zoals gronden met minder dan 2% organische stof, of juist veel organische stof zoals veengronden, is dat wellicht niet mogelijk op basis van deze steekproef. Ook is het bij een steekproefopzet volgens een regelmatig grid lastiger om gebruik te maken van voorkennis over de ruimtelijke variatie van de C-voorraad, waardoor naar verwachting meer meetlocaties nodig zijn om een vergelijkbare nauwkeurigheid te bereiken dan bij bijvoorbeeld een gestratificeerde aselecte steekproef.

Een probleem bij systematische steekproeven is het schatten van de steekproefvariantie van de geschatte (verandering in) C-voorraad. Er zijn vele schatters voor de variantie, maar alle zijn gebaseerd op veronderstellingen over de ruimtelijke variatie (zie Cochran, 1977, v.a. blz. 207). Een eenvoudige procedure is de steekproefvariantie op dezelfde wijze te berekenen als bij een enkelvoudige aselecte steekproef. Dit leidt echter tot een overschatting van de steekproefvariantie en dus een onderschatting van de nauwkeurigheid (De Gruijter *et al.*, 2006).

Indien de variatie van C-voorraden afhankelijk is van vooraf bekende gebiedseigenschappen, is het zinvol hiermee bij de opzet van een monitoringstrategie rekening te houden. Dit kan door het gebied te stratificeren. Een goede stratificatie vergroot namelijk de nauwkeurigheid van de voorspellingen of levert een vergelijkbare nauwkeurigheid met minder meetlocaties op (De Gruijter *et al.*, 2006). Als een deel van de meetlocaties van een aselecte steekproef ontoegankelijk zou worden of om een andere reden niet meer bemonsterd zou worden is het relatief eenvoudig alternatieve locaties te loten. Bij een systematische steekproef volgens een regelmatig grid is dit niet mogelijk omdat alle mogelijke locaties al vast liggen na de keuze van de oorsprong van het grid en de gridgrootte.

3.12 Flexibiliteit van het ontwerp

Zoals in § 3.4 is opgemerkt, is een synchroon patroon het meest flexibele steekproefontwerp in ruimte en tijd (Figuur 2). Als de doelen van monitoring wijzigen in de tijd, kunnen afhankelijk van de belangrijkste doelen voor ieder meetmoment een steekproefopzet worden gekozen dat hierbij het beste aansluit. De flexibiliteit heeft echter een prijs: omdat telkens andere meetlocaties worden geselecteerd kunnen geen veranderingen per meetlocatie worden vastgesteld en daardoor zijn er zeer waarschijnlijk meer meetlocaties nodig om veranderingen in de tijd nauwkeurig vast kunnen te stellen.

Een statisch-synchroon patroon (Figuur 1) waarbij dezelfde meetlocaties op ieder opnametijdstip opnieuw worden bemonsterd is minder flexibel dan het bovengenoemde synchrone patroon. Er kan immers niet voor elk meettijdstip een ander ruimtelijk steekproefpatroon worden gekozen. Voor het vaststellen van veranderingen in de tijd is het herhaald bemonsteren van dezelfde locaties echter gunstig omdat de ruimtelijke variatie het vaststellen van veranderingen niet vertroebelt.

Als bij een statisch-synchroon patroon gekozen wordt voor een ruimtelijk steekproefpatroon volgens een regelmatig grid, dan is het kiezen van alternatieve locaties bij onbereikbaar worden van meetlocaties volgens hetzelfde patroon niet mogelijk. Daardoor is dit ruimtelijke steekproefpatroon minder flexibel dan bijvoorbeeld een gestratificeerd aselecte steekproef.

3.13 Implicaties van de verschillende ontwerpkeuzes

Jaarlijks wordt een rapportage van C-voorraden gevraagd. Het achterliggende doel is om met behulp van de gerapporteerde voorraden de *veranderingen* over een *commitment period* periode te kunnen vaststellen met de vereiste nauwkeurigheid van 95%. Hiervoor is een meetnet van vaste bemonsteringslocaties waar op verschillende tijdstippen een bepaling wordt verricht het meest geschikt Een patroon waarbij telkens op vaste locaties wordt bemonsterd wordt een *statisch* patroon genoemd. Een voordeel van een statisch patroon is dat het mogelijkheden biedt om waargenomen veranderingen op specifieke locaties te volgen, waardoor per locatie naar mogelijke verklaringen kan worden gezocht. Een statisch patroon heeft echter ook een aantal nadelen. Gedurende de periode van monitoring is het moeilijk om bij een statisch patroon over te schakelen op een andere strategie. Daarnaast zijn bij een statisch patroon de uitkomsten van monitoring gevoelig voor beïnvloeding door belanghebbenden zoals landgebruikers.

De tegenpool van een statisch patroon is een *dynamisch* of *synchroon* patroon. Hierbij liggen de locaties niet vast; op elk meettijdstip worden nieuwe locaties bemonsterd. Bij een synchroon patroon wordt niet geprofiteerd van eventueel aanwezige temporele correlatie van de C-voorraad op een zelfde locatie, waardoor er vaak veel meer waarnemingen nodig zijn om met een bepaalde nauwkeurigheid veranderingen vast te kunnen stellen. Het vaststellen van C-voorraden op de meettijdstippen (statusmonitoring) is echter goed mogelijk. Bij een synchroon patroon is er volledige vrijheid om het ruimtelijke steekproefontwerp in de loop van de tijd te wijzigen, bijvoorbeeld omdat er nieuwe vragen zijn, nieuwe eisen worden gesteld of nieuwe inzichten kunnen worden toegepast. In tegenstelling tot een statisch patroon is een synchroon patroon gevrijwaard van het risico van beïnvloeding door landgebruikers of andere belanghebbenden.

Het Joint Research Centre heeft een protocol opgesteld om de bepalingswijze voor C-voorraden in minerale bodems binnen de EU te harmoniseren (Stolbovoy *et al.*, 2005). De voorgeschreven bepalingswijze verschilt echter van de bepalingswijze op basis van de Landelijke Steekproef Kaarteenheden (LSK) die in Nederland voor eerdere rapportages is gebruikt. Als op een verbeterde bepalingswijze wordt overgegaan, moet worden bekeken in hoeverre geconstateerde verschillen in C-voorraad ten opzichte van de referentiesituatie het gevolg zijn van de verschillen in bepalingswijze. Dit kan vrij eenvoudig worden uitgevoerd door in de nieuwe monitoringstrategie eenmalig zowel volgens de nieuwe, geharmoniseerde, als volgens de oude bepalingswijze de C-voorraad vast te stellen, zodat de eerder verzamelde gegevens hiermee kunnen worden gecorrigeerd om een objectieve vergelijking mogelijk te maken.

Een gelijkmatige ruimtelijke verdeling van de steekproeflocaties over Nederland komt de nauwkeurigheid van de geschatte (verandering in) C-voorraad ten goede. In Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk wordt een regelmatig grid gehanteerd bij de selectie van meetlocaties. Voordeel van deze aanpak is dat in principe aanwezige landgebruiksvormen, bodemtypes en andere omstandigheden evenredig naar oppervlakte in de steekproef voorkomen. Nadeel is dat, vooral bij een grof grid, kleine

deelgebieden met specifieke kenmerken niet of onvoldoende voorkomen in de steekproef. Indien de ruimtelijke variatie van (de verandering in) de C-voorraad gerelateerd is aan vooraf bekende gebiedseigenschappen, is het zinvol hiermee bij de opzet van een monitoringstrategie rekening te houden. Dit kan door het gebied te verdelen in deelgebieden (stratificatie). Een goede stratificatie vergroot de nauwkeurigheid van de voorspellingen of levert een vergelijkbare nauwkeurigheid met minder meetlocaties. Indien ook uitspraken over bepaalde bodemtypes, een specifiek beheer of combinaties hiervan gewenst zijn is het raadzaam hiermee al bij de stratificatie rekening te houden, zodat voldoende meetlocaties per deelgebied beschikbaar zijn. Vanuit de *EU Soil Strategy* bestaat bijvoorbeeld een bijzondere belangstelling voor bodems met minder dan 2% organische stof.

De nauwkeurigste schattingen van de C-voorraad mogen worden verwacht als monstername plaatsvindt op een tijdstip dat zo dicht mogelijk ligt bij het jaar waarvoor gerapporteerd wordt. Als om praktische redenen de monstername over meerdere jaren moet worden gespreid gaat dat ten koste van de nauwkeurigheid van schattingen voor een specifiek rapportagejaar. De temporele variatie in C-voorraad over meerdere jaren draagt bij tot de onzekerheid over de geschatte C-voorraad voor een specifiek rapportage jaar. De C-voorraad kent ook een seizoensdynamiek die samenhangt met de bewerking van het land en de weersgesteldheid. Het is daarom raadzaam om voor de bemonstering een zogenaamde indexperiode te hanteren. Deze indexperiode kan afhankelijk van het landgebruik verschillen in zowel tijdstip als lengte, omdat ieder landgebruik een specifieke dynamiek van bewerking kent. De bemonstering dient plaats te vinden binnen deze indexperiode. Meestal wordt hiervoor de winter gekozen.

Omdat de rapportage van C-voorraden per landgebruikscategorie dient plaats te vinden en actuele landgebruiksinformatie veelal ontbreekt of van onvoldoende kwaliteit is, moet voor elke meetlocatie het landgebruik op het moment van monstername geregistreerd worden. Onzekerheden over de kwaliteit en actualiteit van landgebruikgegevens voor grasland zouden ondervangen kunnen worden door een extra landgebruikscategorie te definiëren voor de rotatie van akkerbouw en grasland, zodat minder frequente wisseling optreedt tussen landgebruikscategorieën. Een andere mogelijkheid is het Deense monitoringsysteem te volgen en al het landbouwkundig gebruikt grasland bij de categorie bouwland (*cropland*) te voegen (Oleson, 2006).

4 Uitwerking van alternatieve monitoringstrategieën

4.1 Inleiding

Op basis van de eisen en randvoorwaarden (hoofdstuk 2) en ontwerpkeuzes (hoofdstuk 3) zijn drie verschillende monitoringstrategieën gekozen die in dit hoofdstuk verder worden uitgewerkt. Hierbij wordt een inschatting gemaakt van de haalbare nauwkeurigheid, de kosten en de praktische uitvoerbaarheid. Een aantal zaken geldt voor alle drie strategieën; deze worden hier kort toegelicht.

Alle drie strategieën gaan uit van het monitoren van veranderingen in C-voorraden in de bovenste 30 cm van de Nederlandse bodem zoals in de huidige rapportage (Klein Goldewijk *et al.*, 2005). De C-emissie als gevolg van oxidatie van organisch materiaal op grotere diepten in veengronden en moerige gronden worden geschat uit gegevens over de maaiveldsdaling en valt buiten de bepaling van de veranderingen in de C-voorraad door monitoring. De noodzaak om C-emissies uit veengronden buiten het monitoringsysteem te houden werd besproken in § 2.2.5. Voor de bovenste 30 cm van veengronden en moerige gronden wordt echter wel een schatting van de C-voorraden en veranderingen hierin gemaakt, omdat dan pas duidelijk is op welke gronden nog een bijdrage aan C-emissies van groter diepten verwacht mag worden. Bij het rapporteren van C-emissies moet echter wel gewaakt worden voor een dubbeltelling van emissies uit veengronden en moerige gronden, omdat voor dezelfde gronden emissieschattingen worden gemaakt uit zowel de gemeten veranderingen in de voorraad als uit maaiveldsdaling.

Het schatten van C-voorraden en veranderingen daarin onder bebouwd gebied (*settlements*) is nauwelijks mogelijk omdat monsterlocaties slecht bereikbaar zijn. Ook is de vraag in hoeverre de oorspronkelijke bodems in bebouwd gebied die grotendeels worden afgedekt door een bouwlaag en vervolgens door gebouwen of verharding nog kunnen bijdragen aan emissie. Voor bebouwde gebieden (*settlements*) en verhard oppervlak (*other land*) zal worden verondersteld dat geen verandering van de C-voorraad optreedt.

De kwaliteit en actualiteit van landsdekkende gegevens over het landgebruik vallen buiten deze studie, hoewel de beschikbaarheid van deze gegevens voor de rapportage van C-voorraden per langebruikscategorie wel van belang is. Wel wordt bij de vergelijking van alternatieven aandacht geschonken aan de gevolgen van landgebruiksgegevens van onvoldoende kwaliteit of actualiteit en de mogelijkheden om hier in het monitoringsysteem mee om te gaan.

In § 4.2 beschrijven we een steekproefstrategie volgens een statisch-synchroon patroon (zie § 3.4, Figuur 1), waarbij de locaties samenvallen met die van de Landelijke steekproef kaarteenheden (LSK). Deze strategie sluit het best aan bij de Nederlandse omstandigheden en voorinformatie. Om de geschatte C-voorraad uit de LSK-steekproef (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) te kunnen vergelijken met toekomstige

schattingen volgens de procedure die door Stolbovoy *et al.* (2005) worden voorgesteld, stellen we voor de bepalingswijzen te harmoniseren. In § 4.3 behandelen we een monitoringstrategie die is gebaseerd op een statisch-synchroon patroon waarbij de locaties zijn geselecteerd volgens een systematische steekproef met een regelmatig grid. Dit patroon sluit het meest aan bij de strategie die is beschreven door Stolbovoy *et al.* (2005) en de strategieën die worden gevolgd in Frankrijk (Arrouays *et al.*, 2001) en het Verenigd Koninkrijk (McGrath en Loveland, 1992; Bellamy *et al.*, 2005). In § 4.4 werken we een monitoringstrategie uit die is gebaseerd op een synchroon patroon (zie § 3.4, Figuur 2), waarbij de locaties worden geselecteerd volgens een gestratificeerde aselecte steekproef. Deze strategie kan eenvoudig worden gewijzigd, bijvoorbeeld bij een wijzigende vraagstelling, en is ongevoelig voor beïnvloeding door belanghebbenden en landgebruikers. Tenslotte vatten we in § 4.5 de drie alternatieven samen en vergelijken we de kosten (meetinspanning), nauwkeurigheid, flexibiliteit en gevoeligheid voor beïnvloeding.

4.2 Statisch-synchroon patroon volgens LSK-steekproef met geharmoniseerde bepalingsmethode

Er kan voor toekomstige rapportages een schatting van C-voorraden worden gemaakt op dezelfde wijze als op basis van de LSK-steekproef is gebeurd (Klein Goldewijk *et al.*, 2005). De nauwkeurigheid van toekomstige schattingen van de C-voorraad zal in dezelfde grootteorde liggen als die van de schatting voor de jaren negentig. De nauwkeurigheid, uitgedrukt als het 95%-betrouwbaarheidsinterval, bedraagt voor de schatting van de totale C-voorraad 2.1% van de totale voorraad (De Groot *et al.*, 2005).

Mogelijk kan de nauwkeurigheid van geschatte C-voorraden worden vergroot door oorspronkelijke strata van de LSK samen te voegen, op basis van eerder geschatte C-voorraden en informatie over de variatie van C-voorraden binnnen een stratum. Op deze wijze kunnen meer meetlocaties per deelgebied worden benut om de C-voorraad per stratum te schatten. De flexibiliteit om op basis van dezelfde meetlocaties voor een andere stratumindeling te kiezen dient beperkt te blijven tot het samenvoegen van *gehele* strata, omdat de gestratificeerd aselect gekozen meetlocaties horen bij de destijds gehanteerde stratumindeling. De C-voorraad kan ook voor andere deelgebieden dan de strata worden geschat, door rekening te houden met de insluitkansen van de steekproefopzet die bij de LSK is gehanteerd.

Bij een statisch-synchroon patroon met vaste locaties is de winst in nauwkeurigheid ten opzichte van een synchroon patroon met steeds wisselende locaties afhankelijk van de correlatie tussen gemeten C-voorraden op de beide tijdstippen waarover een verschil bepaald wordt (De Gruijter *et al.*, 2006). Verschillen in geschatte C-voorraden op vaste meetlocaties worden berekend met:

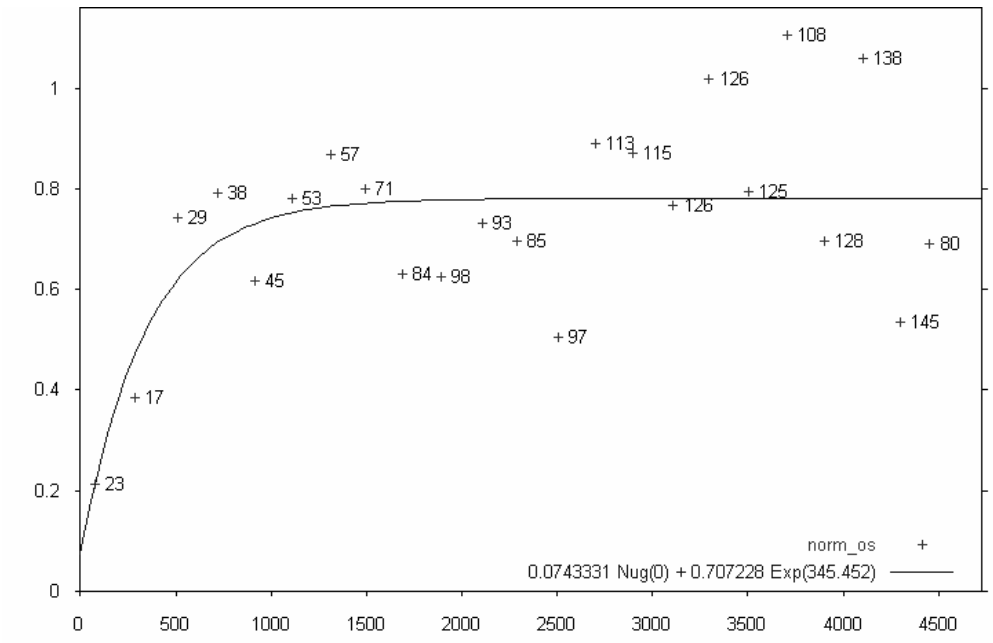
$$\hat{d}_{2,1} = \hat{z}(t_2) - \hat{z}(t_1) .$$

De variantie van de geschatte verandering kan als volgt worden berekend:

$$V(\hat{d}_{2,1}) = V(\hat{z}(t_2)) + V(\hat{z}(t_1)) - 2C(\hat{z}(t_2), \hat{z}(t_1)),$$

waarin $V(.)$ varianties zijn en $C(.)$ een covariantie. Uit deze vergelijking blijkt dat bij een positieve correlatie de variantie van het geschatte verschil bij een statisch-synchroon patroon altijd kleiner is dan bij twee onafhankelijke steekproeven van een synchroon patroon. De winst is gelijk aan de covariantieterm in bovenstaande vergelijking.

De winst in nauwkeurigheid is het grootst indien op exact dezelfde meetlocaties wordt gemeten omdat dan de correlatie het sterkst zal zijn. Uit het semivariogram gebaseerd op C-voorraden bepaald met de LSK-steekproef in Figuur 5 blijkt dat ook in geval van kleine verschuivingen van enkele meters winst verwacht mag worden. Omdat er sprake is van destructieve bemonstering kan niet op exact dezelfde locaties worden teruggekeerd, maar er kan wel op zeer korte afstand een nieuw monster worden genomen. Als de meetlocaties met behulp van een *hand-held* GPS worden herbemonsterd mag een positienauwkeurigheid van tussen de 5 en 10 m verwacht worden. Het meermaals bemonsteren op vrijwel dezelfde locaties heeft alleen een voordeel als de variatie op korte afstand gering is. Deze kan worden afgeleid van een semivariogram. Op basis van C-voorraden op de locaties van de LSK- steekproef is een gestandaardiseerd, semivariogram geschat waaruit blijkt dat de korte afstands-variatie van C-voorraden gering is; ongeveer éénvijfde van de variantie binnen 200 m (Figuur 5). Het heeft dus zin om zo dicht mogelijk bij de oude meetlocaties terug te keren.



Figuur 5. Gestandaardiseerde semivariantie[-] van de C-voorrad op de verticale as tegen de afstand[m] op de horizontale as; de getallen bij + geven het aantal puntenparen aan met hun onderlinge afstand.

Bij de monitoring van de C-voorraad in bossen (Nabuurs *et al.*, 2005) is voor 124 locaties de C-voorraad in zowel 1990 als 1995 bepaald op basis van organische-stofgehalten en geschatte bulkdichtheden. Met deze informatie is het verschil in C-voorraden geschat, en de standaardfout van dit geschatte verschil. Hierbij is aangenomen dat het om enkelvoudig aselecte steekproefgegevens gaat. Om inzicht te krijgen in de winst tengevolge van het terugkeren naar dezelfde locaties (statisch patroon) ten opzichte van steeds wisselende locaties (synchroon patroon) is de standaardfout ook berekend als de vierkantswortel uit de som van de twee varianties van de geschatte voorraden in 1990 en in 1995 (Tabel 1, laatste kolom). In dit geval wordt dus verondersteld dat de covariantieterm in de bovenstaande vergelijking 0 is, wat ook juist zou zijn als bemonsterd zou zijn volgens een synchroon patroon bestaande uit twee onafhankelijke steekproeven.

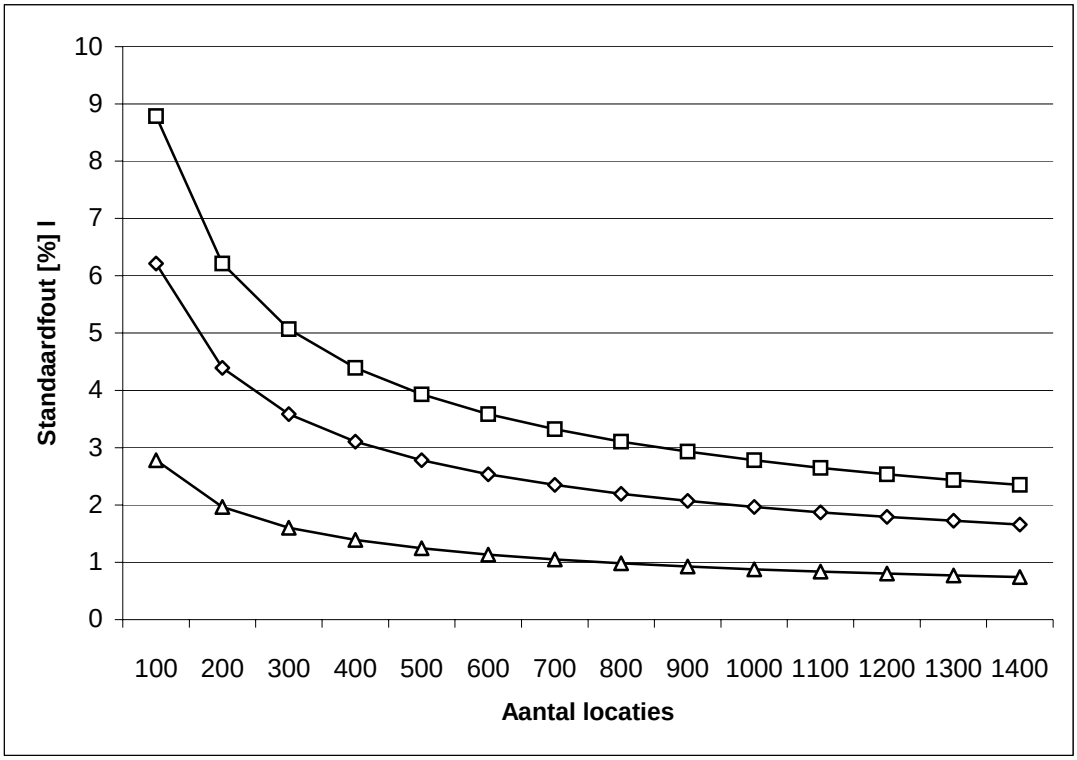
Tabel 1. Geschatte C-voorraad in 1990 en 1995, en geschatte verandering in C-voorraad in bosgebieden. De standaardfout van de geschatte verandering in C-voorraad is geschat als de standaardfout van het gemiddelde verschil op meetlocaties (voorlaatste kolom), en als het verschil van de twee gemiddelden (laatste kolom). Eenheid: kg/m².

	C-voorraad 1990	C-voorraad 1995	Verschillen op meetlocaties	Verschil in C-voorraden
Gemiddelde	8.166	8.723	0.557	0.557
Standaardfout	0.356	0.341	0.156	0.493

Uit Tabel 1 blijkt dat de verandering met een standaardfout van 0.156 kg/m^2 kan worden vastgesteld, terwijl de C-voorraden in 1990 en 1995 met een standaardfout van respectievelijk 0.356 en 0.341 kg/m^2 kunnen worden geschat. Indien uit het verschil tussen de C-voorraad in 1990 en 1995 een verandering wordt geschat, zonder rekening te houden met correlatie tussen de tijdstippen, zou de standaardfout van de geschatte verschillen 0.493 kg/m^2 bedragen, wat dus aanmerkelijk hoger is dan de standaardfout van 0.156 kg/m^2 die wordt bereikt wanneer verschillen op ieder van de 124 meetlocaties worden vastgesteld. De nauwkeurigheid van een geschatte C-voorraad uitgedrukt als de variantie van het gemiddelde is berekend door de variantie in de steekproef te delen door het aantal waarnemingen. Om in de variantie van het gemiddelde een reductie van 90% te bereiken zijn dus 10 maal zoveel waarnemingen nodig. Om op basis van verschillen in C-voorraad een schatting van de verandering te krijgen die even nauwkeurig is als die op basis van gemeten verschillen op punten, zijn in dit voorbeeld met een correlatie van 0.901, in plaats van de gebruikte 124 meetlocaties, 1242 meetlocaties nodig. In deze situatie, die gebaseerd is op 124 meetlocaties in bossen, is het dus zeer lonend om veranderingen op vaste meetlocaties te bepalen. Of dat nog steeds opgaat als de periode tussen metingen langer wordt en de temporele correlatie dus mogelijk afneemt, en als ook gebieden met andere vormen van landgebruik worden beschouwd, is nauwelijks te voorzien. Een lagere correlatie tussen gemeten voorraden op beide tijdstippen mag verwacht worden; hoeveel lager is echter moeilijk in te schatten.

Omdat op voorhand nog geen inschatting van de correlatie tussen geschatte C-voorraden op twee tijdstippen kan worden gemaakt is ook niet in te schatten hoeveel meetlocaties nodig zijn om een gewenste nauwkeurigheid te bereiken. In een nieuw op te zetten monitoringstrategie kan worden begonnen met herbemonstering met

een beperkt aantal meetlocaties per stratum, die stapsgewijs wordt vergroot totdat de gewenste nauwkeurigheid, die overigens nog moet worden vastgesteld (zie § 2.1), wordt bereikt. In Figuur 6 is weergegeven welke nauwkeurigheid bij het vaststellen van een verandering mag worden verwacht afhankelijk van het aantal waarnemingen en de correlatie in C-voorraden tussen twee meettijdstippen.



Figuur 6. Nauwkerigheid van de geschatte verandering in C-voorraad[%] afhankelijk van het aantal meetlocaties. □ =Synchroon patroon, ◇ = Statisch-synchroon patroon (correlatiecoëfficiënt 0.5) en △ = Statisch-synchroon patroon (correlatiecoëfficiënt 0.9).

Zoals uit het bovenstaande blijkt en beschreven is in § 3.4, kunnen veranderingen nauwkeurig worden vastgesteld door bij een volgende bemonstering op dezelfde meetlocaties te bemonsteren volgens dezelfde bepalingswijze. De harmonisatie op EU-niveau zoals voorgesteld door Stolbovoy *et al.* (2005) vraagt echter om een andere bepalingsmethode waarbij aan mengmonsters van 25 steken C-elementair bepaald wordt en de bulkdichtheid op basis van metingen aan ongestoorde monsters dient te worden vastgesteld. Als gekozen wordt voor deze bepalingswijze treden de volgende bronnen van onzekerheid op bij het schatten van veranderingen: (1) onzekerheid ten gevolge van het nemen van een steekproef uit de gehele populatie, (2) onzekerheid ten gevolge van de bepalingsmethode (meetfouten, en systematische verschillen tussen bepalingsmethoden), en (3) onzekerheid als gevolg van verschillen tussen mengmonsters en enkelvoudige monsters. Door eenmalig zowel volgens de LSK-bepalingswijze als volgens de bepalingswijze zoals voorgesteld door Stolbovoy *et al.* (2005) de C-voorraad te schatten op een aantal locaties van de LSK-steekproef, kan een schatting worden gemaakt van het aandeel van de bepalingswijze in het geschatte verschil. Het verschil ten opzichte van de referentie-

situatie (jaren negentig) kan dan op basis van de LSK-bepalingswijze worden geschat, terwijl toekomstige verschillen kunnen worden geschat volgens de nieuwe, geharmoniseerde bepalingswijze.

Door bij toekomstige opname, zoals ook bij de LSK is gebeurd, tijdens de bemonstering ook het landgebruik op te nemen kunnen voorraden per landgebruikscategorie worden geschat, onafhankelijk van de beschikbaarheid van landsdekkende gegevens over het landgebruik.

Zoals is beschreven in § 3.10 biedt een monitoringstrategie met vaste meetlocaties mogelijkheden om waargenomen veranderingen op specifieke locaties te volgen. Afhankelijk van wisselingen in landgebruik, beheer of andere omstandigheden kan dan per locatie naar mogelijke fysische verklaringen worden gezocht.

4.3 Statisch-synchroon patroon met een ruimtelijke steekproef volgens een regelmatig grid

Een systematisch steekproefpatroon volgens een regelmatig grid met vaste meetlocaties wordt gehanteerd door Frankrijk (Arrouays *et al.*, 2001.) en het Verenigd Koninkrijk (McGrath en Loveland, 1992; Bellamy *et al.*, 2005) voor het monitoren van C-voorraden. In § 3.11 zijn de voor- en nadelen van een systematische steekproef volgens een regelmatig grid besproken.

Omdat bij dit patroon op dezelfde locaties wordt herbemonsterd volgens een zelfde bepalingswijze zijn toekomstige veranderingen in de C-voorraad met een grote nauwkeurigheid vast te stellen. Een verandering ten opzichte van de referentiesituatie is echter alleen op basis van een verschil in schattingen van de C-voorraad vast te stellen en niet op basis van veranderingen die op meetlocaties zijn waargenomen, omdat in de LSK-steekproef (Finke *et al.*, 2002) andere meetlocaties zijn gebruikt. De verandering ten opzichte van de referentiesituatie zal daardoor, afhankelijk van de temporele correlatie (zie § 4.2), minder nauwkeurig vastgesteld kunnen worden dan toekomstige veranderingen.

4.4 Synchroon patroon met gestratificeerde aselecte ruimtelijke steekproef

In § 3.4 is een synchroon steekproefpatroon genoemd als alternatief voor een statisch-synchroon patroon. Voordelen ten opzichte van een statisch-synchroon patroon zijn de flexibiliteit en de vrijwaring van beïnvloeding door landgebruikers en belanghebbenden, maar een belangrijk nadeel is dat bij een synchroon steekproefpatroon waarschijnlijk meer waarnemingen nodig zijn om veranderingen in de tijd met een bepaalde nauwkeurigheid te schatten dan bij het statisch-synchrone patroon zoals beschreven in § 4.2 en 4.3. Een ander nadeel van wisselende meetlocaties is dat het lastiger is om oorzakelijke verbanden tussen waargenomen C-voorraad veranderingen en veranderingen in landgebruik, beheer of ontwatering te kunnen duiden en verklaren (zie § 3.10). In deze paragraaf werken we een synchroon patroon uit en

analyseren we wat de genoemde voordelen ten opzichte van een statisch-synchroon patroon kosten.

Het is raadzaam om bij de selectie van locaties gebruik te maken van voorkennis over gebiedseigenschappen door middel van stratificatie (§ 3.11). Er zou daarbij ook een andere indeling in deelgebieden (strata) kunnen worden gemaakt dan is gebruikt bij de LSK. De LSK-stratificatie is immers niet gericht op schattingen van (veranderingen in) de C-voorraad. Op basis van de bodemkaart of landgebruikskaart kan mogelijk een betere stratificatie worden opgesteld, waarmee de variatie van (veranderingen in) C-voorraden binnen strata wordt verminderd en tussen strata wordt vergroot. Wijzigen van de stratificatie biedt ook de mogelijkheid de stratificatie beter af te stemmen op de vraag. Als toekomstige vragen gericht op specifieke gebieden verwacht worden, zoals vragen over gronden met minder dan 2% organische stof of juist veel organische stof zoals veengronden, is het raadzaam hiermee bij de stratificatie al rekening te houden.

De extra meetinspanning die een synchroon patroon ten opzichte van een statisch-synchroon patroon vraagt voor het nauwkeurig vaststellen van veranderingen, hangt af van de sterkte van de correlatie tussen de geschatte C-voorraden op beide tijdstippen. Als het gaat over veranderingen voor alle landgebruiksvormen waarvoor dient te worden gerapporteerd over een periode langer dan vijf jaar, mag een lagere correlatie verwacht worden dan in het voorbeeld voor bossen uit § 4.2. Bij een correlatie van 0.5 zouden twee keer zoveel wisselende meetlocaties nodig zijn als vaste meetlocaties om met eenzelfde nauwkeurigheid een verandering te kunnen vaststellen (zie § 4.5 en Tabel 2).

Vergelijking van de alternatieve monitoringstrategieën
Naast de drie uitgewerkte strategieën zijn diverse tussenvormen en combinaties mogelijk. Een afweging voor eventuele tussenvormen kan onderbouwd worden op basis van de overwegingen bij de ontwerpenkeuze. Eén tussenvorm, gelijk aan alternatief 1 maar met een andere gebiedsindeling en daardoor andere meetlocaties, willen we hier nog noemen. Dit alternatief heeft ten opzichte van alternatief 1 als voordeel dat er alle vrijheid is om nieuwe deelgebieden te kiezen specifiek gericht op veranderingen in de C-voorraad en aansluitend bij verwachte vragen uit bijvoorbeeld de *EU Soil Strategy*. Nadeel is dat minder nauwkeurig of tegen hoger kosten veranderingen ten opzichte van de referentie situatie vastgesteld kunnen worden omdat niet de meetlocaties van de LSK-steekproef worden herbemonsterd.

In Tabel 2 worden de drie alternatieve monitoringstrategieën uit dit hoofdstuk vergeleken wat betreft de benodigde meetinspanning (kosten) voor een gewenste nauwkeurigheid, flexibiliteit en gevoeligheid voor beïnvloeding. Hierbij is, arbitrair bij gebrek aan voorinformatie, uitgegaan van een temporele correlatie van 0.5 tussen gemeten C-voorraden op vaste meetlocaties (zie § 4.2). Als daarnaast wordt verondersteld dat de nauwkeurigheid van toekomstige schattingen van de C-voorraad in dezelfde grootteorde zal liggen als die van de schatting voor de jaren negentig (De Groot *et al.*, 2005) zal de nauwkeurigheid uitgedrukt als standaardfout ongeveer 1% van de totale C-voorraad bedragen. Veranderingen op basis van verschillen in

C-voorraden op twee tijdstippen kunnen dan worden vastgesteld met een nauwkeurigheid van 2% van de totale C-voorraad.

Om een verandering in de C-voorraad op basis van verschillen die zijn waargenomen op vaste meetlocaties even nauwkeurig te schatten als een verandering op basis van het verschil in de C-voorraad tussen twee tijdstippen, is slechts de helft van het aantal meetlocaties nodig. Het aantal meetlocaties van de LSK-steekproef dat wordt gebruikt voor het schatten van de C-voorraad bedraagt 1392 (Kuikman *et al.*, 2003). Door alle locaties te herbemonsteren zou, bij een veronderstelde correlatie van 0.5, een tweemaal hogere nauwkeurigheid in de geschatte verandering van de C-voorraad bereikt worden dan bij bemonstering van hetzelfde aantal nieuwe locaties. Voor het vaststellen van een verandering met gelijke nauwkeurigheid zou dus de helft van de vaste meetlocaties volstaan.

Indien, bijvoorbeeld vanwege andere doelstellingen of vragen, overgeschakeld wordt op een andere monitoringstrategie met andere meetlocaties, is voor de periode tussen de overschakeling minder nauwkeurig een verandering vast te stellen. Als in de daaropvolgende meetrondes steeds op dezelfde locaties wordt gemeten, zijn toekomstige veranderingen wel weer met dezelfde nauwkeurigheid te schatten. Door een overschakeling zorgvuldig te plannen en eventueel na een periode weer terug te grijpen op een eerder meetnetontwerp kunnen veranderingen over specifieke periodes met een maximale nauwkeurigheid worden geschat.

Tabel 2. Vergelijking van drie strategieën voor het vaststellen van veranderingen in de totale C-voorraad met een nauwkeurigheid 2.21% van de C-voorraad op meetinspanning, flexibiliteit, risico van beïnvloeding, verklaringen voor vastgestelde veranderingen en veranderingen per deelgebied.

	Statisch-synchroon, LSK-locaties	Statisch-synchroon, regelmatig grid	Synchroon, gestratificeerde aselecte steekproef
Benodigd aantal locaties voor vaststellen van veranderingen	700	± 700	± 1400
Benodigd aantal locaties voor vaststellen van veranderingen t.o.v. de referentiesituatie	700	± 1400	± 1400
Benodigd aantal locaties voor vaststellen van de C-voorraad	1400	± 1400	± 1400
Flexibiliteit. Aanpasbaarheid bij aanvullende vragen	-	-	+
Bestand tegen beïnvloeding	-	-	+
Verklaringen voor veranderingen	+	+	-
Veranderingen per deelgebied	+	-	+

Als op een nieuwe geharmoniseerde bepalingswijze, zoals voorgesteld in het JRC-protocol, wordt overgeschakeld, waarbij een profielbeschrijving wordt gemaakt, een mengmonster samengesteld uit 25 steken wordt genomen en in 100cc ringen een ongestoord bodemmonster wordt gestoken voor bepaling van de bulkdichtheid kan dit de nauwkeurigheid beïnvloeden (zie § 3.5).

Ook praktisch gezien heeft een andere bepalingswijze consequenties; zo kunnen door bij de bepalingswijze uit de LSK-steekproef door één persoon ongeveer drie meetlocaties per dag worden bemonsterd. Bij de nieuwe bepalingsmethode waarin afhankelijk van het landgebruik de bulkdichtheid voor verschillende dieptes dient te worden bepaald aan ongestoorde bodemmonsters en mengmonsters worden gemaakt van 25 steken waaraan C-elementair bepalingen worden verricht (zie § 3.5), kunnen ongeveer twee locaties per dag worden bemonsterd. De kosten voor het bepalen van de bulkdichtheid en het C-elementairgehalte bedragen ongeveer € 150 per monster, terwijl de bepaling van het organische-stofgehalte en het schatten van de bulkdichtheid voor de LSK-bepalingswijze ongeveer € 100 per locatie kost. Uitgaande van € 600 voor een velddag bedragen de totale kosten bij de nieuwe bepalingsmethode ongeveer € 375 en voor de LSK-bepalingsmethode ongeveer € 230 euro per locatie. Als bij de eerste bemonstering volgens de nieuwe monitoringstrategie zowel op de oude als nieuwe manier wordt bemonsterd op dezelfde locatie bedragen de kosten ongeveer € 425 euro per locatie. Indien na een inwerkperiode de uitvoering van veld- en laboratoriumwerkzaamheden geleidelijk naar andere partijen worden verschoven kunnen deze kosten nog dalen. Daarnaast dient afhankelijk van de rapportagefrequentie rekening te worden gehouden met de terugkerende kosten van gegevensanalyse en rapporteren.

5 Aanbevelingen voor een monitoringstrategie

5.1 Aanbevelingen voor eisen en randvoorwaarden

1. Er zijn geen internationale eisen voor de nauwkeurigheid waarmee veranderingen in de C-voorraad tenminste vastgesteld moeten worden, zie § 2.1. Deze eisen zijn echter onmisbaar voor het ontwerp van een operationele monitoringstrategie. Aanbevolen wordt deze eisen te bespreken in internationaal verband.
2. Teneinde de monitoringstrategie kosteneffectief en overzichtelijk te houden wordt aanbevolen frequent wisselende landgebruikscategorieën samen te voegen tot één categorie (in navolging van Denemarken, Oleson, 2006), of een aparte categorie voor wisselend landgebruik te definiëren, zie § 2.2.1.
3. Aanbevolen wordt het 'doeluniversum' waarop de monitoring zich richt scherp te definiëren, door landgebruiksvormen waarvoor nauwelijks betrouwbare metingen van de C-voorraad mogelijk zijn, zoals *settlements* en overig landgebruik, buiten beschouwing te laten. Hiervoor zijn veronderstellingen nodig over de veranderingen in de C-voorraad in deze gebieden. Het is gerechtvaardigd te veronderstellen dat in gebieden als *settlements* de veranderingen in de C-voorraad van de bodem verwaarloosbaar zijn (zie § 2.2.2).
4. Het verdient aanbeveling om aan te sluiten bij de schatting van de C-voorraad op eerdere schattingen van Klein Goldewijk *et al.*, (2005). Dit betekent dat de bepalingsmethode moet worden geharmoniseerd met die van Stolbovoy *et al.* (2005). Aanbevolen wordt om hiertoe voor een aantal locaties beide bepalingswijzen te volgen en vervolgens de LSK-gegevens te corrigeren op basis van de gevonden verschillen, zie § 2.2.3.
5. Wij bevelen aan om de kennis uit het Bodemkundig Informatiesysteem (BIS) te benutten door te stratificeren op basis van de bodem- en grondwatertrappenkaart schaal 1 : 50.000, zie § 2.2.4. Stratificatie zal de nauwkeurigheid waarmee C-voorraden en veranderingen daarin worden geschat kunnen vergroten. Daarnaast biedt het de mogelijkheid om uitspraken te doen voor deelgebieden waarvoor vanuit de *EU Soil strategy* aandacht is. Stratificatie op basis van de bodem- en grondwatertrappenkaart schaal 1 : 50.000 gebeurt overigens ook bij schattingen van C-voorraden op basis van de LSK.
6. Het is aan te bevelen de geschatte C-emissies uit de diepere ondergrond van veengronden of moerige gronden buiten de doelvariabelen waarop de monitoringstrategie zich richt te houden, vanwege operationele bezwaren bij het meten op grotere diepten, bij dalend maaiveld en om nauwkeurigheidsverlies te voorkomen (zie § 2.2.5).

5.2 Aanbevolen ontwerpkeuzes

1. Gezien de doelstellingen bij C-monitoring in de bodem bevelen we aan om het ontwerp te baseren op het schatten van *veranderingen* in de C-voorraad, zie § 3.2. Een statisch-synchroon patroon is dan te verkiezen boven een synchroon of een

roterend patroon, omdat een statisch-synchroon patroon veruit het meest kosten-effectief is bij het schatten van veranderingen in de C-voorraad, zie § 3.4.

2. Het verdient aanbeveling aan te sluiten bij de poging tot harmonisatie van bepalingswijzen op EU-niveau van Stolbovoy *et al.* (2005). Aanbevolen wordt te onderzoeken in hoeverre geconstateerde verschillen in C-voorraad ten opzichte van de historische referentiesituatie (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) het gevolg zijn van de verschillen in bepalingswijze, en de historische gegevens voor deze verschillen te corrigeren, zie § 3.5.
3. Om te kunnen beoordelen of er een significante verandering van de C-voorraad is opgetreden verdient het aanbeveling de nauwkeurigheid modelonafhankelijk te schatten. Daarom bevelen we de toepassing van een *design-based* monitoring-strategie aan, zie § 3.6, zoals ook bij de LSK-steekproef heeft plaatsgevonden (Finke *et al.*, 2002).
4. Om de nauwkeurigheid te vergroten bevelen we aan om (1) door middel van stratificatie voorkennis te gebruiken over de variatie in C-voorraden, (2) zo dicht mogelijk bij het jaar waarvoor een rapportageverplichting geldt te bemonsteren, en (3) binnen een jaar van bemonstering een zogenaamde indexperiode te hanteren die afhankelijk van het landgebruik kan verschillen (zie § 3.7).
5. Aanbevolen wordt om de monitoringstrategie in eerste instantie te richten op 'globale' in plaats van lokale schattingen van veranderingen in de C-voorraad, zie § 3.8. Dit betekent dat er één getal per landgebruikscategorie voor Nederland wordt geschat. De aanbevolen stratificatie maakt het mogelijk om daarnaast ook voor deelgebieden uitspraken te doen.
6. Het is aan te bevelen om een extra landgebruikscategorie te definiëren voor de rotatie van akkerbouw en grasland, zodat minder frequente wisseling optreedt tussen landgebruikscategorieën. Een alternatief is het Deense monitoringsysteem (Oleson, 2006) te volgen, waarbij landbouwkundig gebruikt grasland bij de categorie bouwland (*cropland*) wordt gevoegd (zie § 3.9).
7. Om oorzaken van vastgestelde veranderingen in de C-voorraad te kunnen verklaren verdient een monitoringstrategie met vaste locaties (statisch of statisch-synchroon patroon) aanbeveling, zie § 3.10.
8. Als ruimtelijk steekproefpatroon bevelen we een gestratificeerde aselecte steekproef aan, waarbij gestratificeerd wordt op basis van de bodem- en Gt-kaart, schaal 1 : 50.000, zoals ook in de LSK gebeurt. Dit steekproefpatroon biedt enerzijds de mogelijkheid om voorkennis over de ruimtelijke verdeling van C-voorraden te benutten en daarmee de nauwkeurigheden van schattingen te vergroten, en anderzijds om informatie te leveren over deelgebieden (zie § 3.11).
9. Als er veel waarde wordt gehecht aan een flexibel steekproefontwerp, dat eenvoudig aan nieuwe eisen kan worden aangepast, dan verdient een synchroon patroon aanbeveling, zie § 3.12. Omdat het voordeel van flexibiliteit niet zal opwegen tegen de kosten ten opzichte van een statisch-synchroon patroon, bevelen we een statisch-synchroon patroon aan. Een systematische steekproef volgens een regelmatig grid is uit het oogpunt van flexibiliteit af te raden; we bevelen een (gestratificeerde) aselecte steekproef aan, omdat hierbij eenvoudig alternatieve locaties kunnen worden geselecteerd wanneer locaties onbereikbaar zijn geworden.

5.3 Aanbevolen strategieën voor C-monitoring

Op basis van de analyse van eisen en randvoorwaarden (hoofdstuk 2), en ontwerpkeuzes (hoofdstuk 3) bevelen wij aan een keuze te maken uit drie alternatieven voor een strategie voor C-monitoring of een tussenvorm hiervan (hoofdstuk 4). Deze drie strategieën zijn:

1. monitoring volgens een statisch-synchroon patroon, met de LSK-steekproef en een geharmoniseerde bepalingsmethode (§ 4.2);
2. monitoring volgens een statisch-synchroon patroon, met een ruimtelijke steekproef volgens een regelmatig grid (§ 4.3);
3. monitoring volgens een synchroon patroon, met een gestratificeerde aselecte ruimtelijke steekproef (§ 4.4).

Overwegingen die bij de uiteindelijke keuze uit de drie aanbevolen strategieën een rol spelen zijn:

1. het beschikbare budget;
2. de waarde die wordt gehecht aan het vermijden van beïnvloeding door belanghebbenden;
3. de waarde die wordt gehecht aan de mogelijkheid om de ruimtelijke steekproefopzet na verloop van tijd te kunnen wijzigen, bijvoorbeeld bij gewijzigde budgettaire randvoorwaarden of bij een gewijzigde vraagstelling;
4. de wens om waargenomen veranderingen te kunnen verklaren;
5. de wens om voor deelgebieden veranderingen vast te kunnen stellen;
6. de waarde die wordt gehecht aan een nauwkeurige schatting van veranderingen in de C-voorraad ten opzichte van de eerste rapportage die in 2005 in Nederland is gemaakt (Klein Goldewijk *et al.*, 2005).

Indien beïnvloeding door belanghebbenden beslist moet worden vermeden, komt alleen alternatief 3 in aanmerking. Consequentie is dan wel dat de monitoring ofwel veel kost, ofwel tot onnauwkeurige schattingen van veranderingen zal leiden. Bovendien zal het niet mogelijk zijn om op locaties te zoeken naar verklaringen voor veranderingen in de C-voorraad.
Ook indien het belangrijk is dat de ruimtelijke steekproefopzet in de toekomst kan worden gewijzigd (flexibiliteit), komt uitsluitend alternatief 3 in aanmerking, met de genoemde consequenties.
Als het belangrijk is dat veranderingen in de C-voorraad op locaties kunnen worden verklaard, dan komen alternatief 1 en 2 in aanmerking. Alternatief 1 verdient dan vanwege de geringere kosten de voorkeur.
Indien het wenselijk is om voor deelgebieden C-voorraden en veranderingen daarin vast te kunnen stellen komen alternatief 1 en 3 in aanmerking, waarbij opgemerkt moet worden dat bij alternatief 1 de deelgebieden reeds vastliggen, terwijl deze in alternatief 3 nog gekozen kunnen worden. Een tussenvorm waarbij wordt herbemonsterd op vaste locaties biedt wel vrijheid om nieuwe deelgebieden te kiezen specifiek gericht op veranderingen in de C-voorraad en aansluitend bij verwachte vragen uit bijvoorbeeld de *EU Soil Strategy*. Nadeel is dat minder nauwkeurig of tegen hogere kosten veranderingen ten opzichte van de referentiesituatie kunnen worden vastgesteld.

Als er geen eisen worden gesteld aan vermijden van beïnvloeding en flexibiliteit verdient alternatief 1 vanwege de geringere kosten de voorkeur.
Als het belangrijk is dat de verandering ten opzichte van de rapportage in 2005 door Klein Goldewijk *et al.* (2005) nauwkeurig wordt geschat, en er geen eisen aan vermijden van beïnvloeding en flexibiliteit worden gesteld, dan verdient alternatief 1 de voorkeur.

Bij elke bemonstering dient ook het landgebruik opgenomen te worden zodat correcte en actuele informatie over landgebruik voor de meetlocaties beschikbaar is. Deze informatie is nodig om per landgebruikscategorie veranderingen in de C-voorraad aan te geven.

Wij bevelen de bepalingswijze aan die op EU-niveau is geharmoniseerd (Stolbovoy *et al.*, 2005). Bij de eerste bemonstering dienen voorraden en veranderingen hierin zowel volgens de oude (Klein Goldewijk *et al.*, 2005) als de nieuwe, geharmoniseerde bepalingswijze te worden geschat. Bij latere rapportages kan worden volstaan met bepalingen volgens de nieuwe, geharmoniseerde bepalingswijze.

6 Conclusies

In dit rapport worden alternatieve strategieën voor monitoring van veranderingen in de C-voorraad aanbevolen. Als de doelstellingen, eisen en randvoorwaarden, met name ten aanzien van kosten en nauwkeurigheid, exact zijn gedefinieerd kan een optimale monitoringstrategie worden gekozen, en kan een opzet voor monitoring worden ontwikkeld. Deze opzet omvat onder meer een beschrijving van de statistische verwerkingsprocedures, de locaties en tijdstippen waarop wordt bemonsterd en een veld- en laboratoriumprotocol. Hierbij wordt het principe 'begin aan het eind, en redeneer dan terug' (De Gruijter *et al.*, 2006) gevolgd.

Sommige doelen en randvoorwaarden zijn thans nog onduidelijk of zelfs tegenstrijdig, en vragen daarom om nadere uitwerking of een afweging om tot een optimale monitoringstrategie te komen. Er wordt wel voorgeschreven dat de nauwkeurigheid moet worden aangegeven door middel van een 95%-betrouwbaarheidsinterval, maar er wordt geen eis gesteld aan de breedte van dit interval. Bij het bepalen van het benodigde aantal waarnemingen is deze informatie echter wel vereist. Enerzijds wordt eraan gehecht dat de uitkomsten van de monitoring niet kunnen worden beïnvloed door belanghebbenden zoals landgebruikers, wat pleit voor een patroon met wisselende locaties, terwijl anderzijds het efficiënt schatten van veranderingen in de C-voorraad pleit voor een patroon met vaste locaties.

Het uitwerken van een monitoringstrategie op hoofdlijnen op basis van beschikbare gegevens is mogelijk, en heeft in deze studie in drie alternatieven plaatsgevonden. Een operationeel ontwerp waarin vooraf het aantal meetlocaties voor de gewenste nauwkeurigheid kan worden gekwantificeerd is pas mogelijk als meer gegevens over de temporele variatie en over de verschillen als gevolg van geharmoniseerde bepalingsmethoden beschikbaar zijn. Ook een objectieve schatting van de nauwkeurigheidswinst door een gestratificeerde steekproefopzet is pas mogelijk met schattingen van de C-voorraad op basis van een ongestratificeerde steekproefopzet.

Een operationele monitoring strategie vraagt een definitieve keuze uit de besproken alternatieven. Valt de keuze op een van de aanbevolen alternatieven dan vergt dit een verdere uitwerking op een aantal praktische en logistieke aspecten.

Literatuur

Arrouays, D., W. Deslais en V. Badeau, 2001. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil Use and Management* **17**: 7-11.

Bellamy, P.H., P.J. Loveland, R.I. Bradley, R.M. Lark en G.J.D. Kirk, 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* **437**(8): 245-248.

Brus, D.J. en J.J. de Gruijter, 1997. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). *Geoderma* **80**(1): 1-59.

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.

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

Finke, P.A, J.J. de Gruijter en R. Visschers, 2002. *Status 2001 Landelijke steekproef Kaarteenheden en toepassingen, Gestructureerde bemonstering en karakterisering Nederlandse bodems.* Wageningen, Alterra-rapport 389.

Groot, W.J.M. de, R. Visschers, E. Kiestra, P.J. Kuikman en G.J. Nabuurs, 2005. *Nationaal systeem voor de rapportage van voorraad en veranderingen in bodem-C in relatie tot landgebruik en landgebruikveranderingen in Nederland aan de UNFCCC.* Wageningen, Alterra-rapport 1035.3.

Gruijter, J.J. de, D.J. Brus, M.F.P. Bierkens en M. Knotters, 2006. *Sampling for Natural Resource Monitoring.* Springer, Heidelberg.

IPCC, 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry.* Kanagawa, Japan.

Klein Goldewijk, K., J.G.J. Olivier, J.A.H.W. Peters, P.W.H.G. Coenen en H.H.J. Vreuls, 2005. *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2003: National Inventory Report 2005.* RIVM report 773201009.

Kramer, H. en W. Knol, 2005. *Methodiek en resultaten van landgebruiksveranderingen op basis van de topografische kaart van Nederland, schaal 1: 25 000.* Wageningen, Alterra-rapport 1035-4.

Kuikman, P.J. W.J.M. de Groot, R.F.A. Hendriks, J. Verhagen en F. de Vries, 2003. *Stocks of C in soils and emissions of CO2 from agricultural soils in the Netherlands.* Wageningen, Alterra-report 561.

Kuikman, P.J., L. Kooistra en G.J. Nabuurs, 2004. *Land use, agriculture and greenhouse gas emissions in the Netherlands: omissions in the National Inventory Report and potential under Kyoto Protocol article 3.4*. Wageningen, Alterra-report 903.

Kuikman, P.J., J.J.H van den Akker en F. de Vries, 2005. *Emissie van N_2O en CO_2 uit organische landbouwbodems*. Wageningen, Alterra-rapport 1035.2.

McGrath, S.P. en P.J. Loveland, 1992. *The Soil Geochemical Atlas of England and Wales*. Blackie Academic and Professional, London.

Nabuurs, G.J., I.J. van den Wyngaert, W.D. Daamen, A.T.F. Helmink, W.J.M. de Groot, W.C. Knol, H. Kramer en P. Kuikman, 2005. *National System of Greenhouse Gas Reporting for Forest and Nature Areas under UNFCCC in The Netherlands*. Wageningen, Alterra-report 1035.1.

Oleson, J., 2006 *Effect and cost of implementation of measures in Kyoto Article 3.4 in Denmark*. DIAS, Foulum, Denmark (concept).

Pleijter, M., 2004. *Veengronden en moerige gronden op de Bodemkaart van Nederland anno 2003; Onderzoek naar de afname van het areaal veengronden rondom Schoonebeek*. Wageningen, Alterra-rapport 1029.

Rietra, R.P.J.J., D.J. Brus, J. Kros, W. de Vries en H.F. van Dobben, 2004. *Innovatie meetnet Verzuring Provincie Utrecht*. Utrecht, rapport Provincie Utrecht.

Särndal, C.E., B. Swensson en J. Wretman, 1992. *Model assisted survey sampling*. Springer Verlag, New York.

Steur, G.G.L. en W. Heijink, 1991. *Bodemkaart van Nederland, schaal 1: 50 000. Algemene begrippen en indelingen*. DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Stolbovoy, V., L. Montanarella, N. Filippi, S. Selvaradjou, P. Panagos en J. Gallego, 2005. *Soil Sampling Protocol to Certify the Changes of Organic Carbon Stock in Mineral Soils of European Union*. Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities, EUR 21576 EN.

Vries, F. de, 2003. *Bodemkundige basisinformatie provincies Groningen, Drenthe en Overijssel*. Wageningen, Alterra-rapport 696.