

# **Samenvatting - Geochemische patronen in de bodems van Zeeland, natuurlijke variabiliteit versus antropogene impact**

## **Hoofdstuk 1. Introductie**

De sterke band tussen bodem, gezondheid en algemene duurzaamheid bevestigt dat de bodem een belangrijke rol speelt als grensvlak tussen milieu-compartimenten en dat bodemkwaliteit een belangrijke potentiële indicator is voor het duurzaam beheer van ons milieu.

Dit proefschrift wil een overzicht geven van de algemene (geo)chemische bodemkwaliteit in de provincie Zeeland, binnen het kader van diffuse antropogene vervuiling en duurzaam bodembeheer in Nederland. Het voornaamste doel daarbij is om de natuurlijke variabiliteit in de geochemische bodemsamenstelling te onderscheiden van antropogene beïnvloeding. De totale variabiliteit is geëvalueerd in zowel de geografische ruimte, waar de ruimtelijke interactie tussen de bodem-componenten plaatsvindt, alsook in de eigenschappen- of attribuut-ruimte, waarin die interactie eveneens tot uitdrukking komt. Patronen in beide ruimten kunnen dan gerelateerd worden aan processen die van invloed zijn op de bodemsamenstelling. Gebaseerd op deze patronen en de daaraan gerelateerde processen kan de antropogene invloed worden onderscheiden van de natuurlijke variabiliteit. Dit voorziet in informatie en gereedschappen ten nutte van het in het Nationaal Milieubeleids Plan 3 van de Nederlandse regering beoogde landelijk beeld van de algemene bodemkwaliteit.

De provincie Zeeland heeft een omvangrijk landelijk gebied, bestaand uit jonge Holocene afzettingen, en kent een rijke historie. Hierdoor is dit een bij uitstek geschikt gebied om de hoofdhypothese bij dit onderzoek te testen: dat menselijke invloed leidt tot onderscheidbare en kwantificeerbare patronen in bodemsamenstelling, in termen van ruimtelijke variabiliteit en onderlinge samenhang tussen bodem-componenten.

## **Hoofdstuk 2. Geologie en pedologie van Zeeland**

Zeeland is gesitueerd in de mariene delta van de rivieren Rijn, Maas en Schelde. Door de zeespiegelstijging aan het einde van de laatste grote ijstijd, het Weichsel, kwam Zeeland

in de greep van de zee. De bodems van Zeeland kunnen worden beschouwd als relatief homogeen en jong. Zij zijn gevormd in een continue interactie van natuurlijke processen en menselijke ambities.

De bodems van Zeeland zijn in het algemeen ontwikkeld in mariene klei-afzettingen. Het ligt daarom in de verwachting dat variatie in het kleigehalte de belangrijkste omstandigheid is die de geochemische variatie bepaalt. Het natuurlijke patroon van kreekruggen en poelgronden creëert hierin al relatief abrupte overgangen. Homogeniteit of graduele variatie binnen dergelijke eenheden kan verder fysiek zijn verstoord door menselijke activiteiten. Waarschijnlijk is de variabiliteit in de bodemsamenstelling daarom hoger dan direct blijkt uit de bodemkaart. Elk bedijkt gebied heeft zijn eigen geschiedenis, zowel menselijk als sedimentair, en daarmee een eigen, uniek patroon van bodemvariatie. Daarnaast kan verwacht worden, gezien het feit dat 80% van het Zeeuwse landoppervlak in gebruik is voor de landbouw, waarvan 70% voor akkerbouw, dat gebruik van bemestings- en bestrijdingsmiddelen de variabiliteit in de bodem verder hebben beïnvloed. Hierbij zullen met name verhoogde concentraties van zogenaamde “zware metalen” (Cd, Cu, Pb en Zn) en restanten van persistente organochloor bestrijdingsmiddelen optreden. Als laatste moet ook atmosferische toevoer worden beschouwd als bijdrage aan de bodemgeochemie.

### **Hoofdstuk 3. Natuurlijke en antropogene covariantie patronen en ruimtelijke variabiliteit van sporenelementen in de bovenlaag van landbouwgronden**

Het doel van dit hoofdstuk is om de mate van geochemische variabiliteit in de bodemsamenstelling te analyseren als functie van de ruimtelijke schaal en de bemonsteringsprocedure (wel of geen mengmonsters). Het onderzoek was ingegeven door vragen uit de praktijk aangaande bemonsteringsstrategieën voor regionale bodemonderzoeken. Een zogenaamde ongebalanceerde geneste bemonsteringsstrategie, met enkelvoudige monsters, is uitgevoerd op Walcheren en Zuid-Beveland. Hierbij worden series van monster-paren op (exponentieel) oplopende afstand (schaal) gecreëerd. De toename in ruis-variantie door gebruik van enkelvoudige monsters is onderzocht door vergelijking met de resultaten van een eerdere studie in het gebied op basis van mengmonsters.

De monsters zijn opgelost in koningswater en geanalyseerd met ICP-MS. De resulterende data (40 elementen) zijn onderzocht met behulp van principaal component analyse in combinatie met een varimax rotatie (PCA-V), ongebalanceerde variantie-analyse (UANOVA) en fuzzy c-means clusteranalyse op de UANOVA resultaten. De drie factoren van de PCA-V representeren variabiliteit ten gevolge van respectievelijk natuurlijke, menselijke en geohydrologische processen. De UANOVA analyse onderscheidt drie patronen van ruimtelijke variantie. Twee groepen laten een graduele toename zien van de variantie met de afstand. De ene groep bevat klei/veldspaat gerelateerde elementen inclusief de lichtere lantaniden of zeldzame aarden, de andere groep bevat de zwaardere zeldzame aarden. De derde groep bevat alle antropogene en geohydrologisch beïnvloede elementen. Voor deze

laatste groep treedt een groter deel van de variatie al op lokale schaal op.

In het algemeen domineert de regionale variantie over de lokale variantie en de extra inspanning die het nemen van mengmonsters vraagt blijkt van beperkte waarde voor een regionaal onderzoek. Echter, prioritaire metalen zoals Cd, Cu, Pb, Sb, Sn en Zn, hebben een relatief grotere lokale variantie-component. Voor deze elementen is het nemen van mengmonsters relatief gezien gunstiger.

## **Hoofdstuk 4. Bemonstering en analyse voor een regionale milieukundig geochemisch bodemonderzoek**

Het onderkennen van antropogene effecten (aanrijking) ten opzichte van mogelijke natuurlijke variabiliteit op basis van waargenomen concentraties van individuele elementen is uiterst moeilijk. Het vaststellen van een bi-variate of multi-variate geochemische referentie (baseline) is daarom een algemeen geaccepteerde methode om achtergrondwaarden vast te stellen. Hierbij wordt een eventuele aanrijking relatief beschouwd ten opzichte van andere bodemchemische kenmerken die een groot deel van de natuurlijke variabiliteit beschrijven. Een afwijking ten opzichte van de aldus bepaalde achtergrond is dan te interpreteren als mogelijk veroorzaakt door menselijke verstoring. Om op die manier kwantitatief te onderzoeken welke componenten zijn beïnvloed door menselijke activiteiten is dan wel een consistente regionale multivariate dataset nodig, die ook aan hoge eisen betreffende betrouwbaarheid en juistheid moet voldoen. Dit hoofdstuk documenteert de constructie van zo'n dataset voor de provincie Zeeland.

De bemonsteringsstrategie was gericht op het bemonsteren van zowel hedendaagse als oorspronkelijke, onbeïnvloede bodemconcentraties. De bemonsteringsdichtheid bedroeg 1 locatie per 1-10 km<sup>2</sup> en zowel de beïnvloede bovenlaag van de bodem als een dieper gelegen, verondersteld pre-antropogene, laag werden bemonsterd. De gebruikte analyse-technieken (ICP-MS met koningswater-ontsluiting en XRF met tabletten) en de brede groep gemeten elementen (hoofdelementen zoals Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, antropogene beïnvloede elementen zoals Cd, Pb, Sb, sporenelementen zoals de lantaniden) resulteerde in een dataset van 87, gedeeltelijk overlappende, parameters. Van elke groep elementen, alsook van de vergelijking tussen de bovenlaag en diepere bodem, wordt verwacht dat zij specifieke informatie kunnen leveren over natuurlijke variatie, menselijke invloed of hun interactie.

De betrouwbaarheid (precisie, reproduceerbaarheid) van de bepalingen is geschat door 15% van de ICP-MS monsters en circa 4% van de XRF monsters in duplo te analyseren. De reproduceerbaarheid is in het algemeen beter voor de XRF (0.5-10% relatief) dan voor de ICP-MS (5-13% relatief). Deze analytische variabiliteit is in het algemeen kleiner dan de lokale veld-variantie zoals gevonden in hoofdstuk 3 en daarmee adequaat voor de gewenste regionale evaluatie van de bodemconcentraties. De dataset bleek slechts een beperkt aantal onverklaarde uitbijters te bevatten, wat eveneens als zeer acceptabel is beoordeeld.

In deze studie is het corrigeren van de data, gebaseerd op "Between Survey Duplicates" (BSD) een goede methode gebleken om systematische afwijkingen tussen de verschil-

lende meetrondes in het totale bodemonderzoek te elimineren. De BSD methode maakt gebruik van een deelverzameling van de monsters die de volledige bandbreedte in elementconcentraties beslaat, en dus representatief is voor het onderzoek. De BSD methode verdient daarmee de sterke voorkeur boven correctie-methoden gebaseerd op alleen analytische standaarden.

Op basis van de geraamde precisie en juistheid van analyse is uit het totaal aan parameters een selectie gemaakt van 31 parameters, die bovendien zijn bepaald in elke meetronde en dus voor alle locaties en bodemlagen. Door het op deze manier maximaliseren van de kwaliteit van de data en het minimaliseren van het aantal ontbrekende waarden is deze selectie optimaal voor multivariate statistische analyse. Deze optimale dataset bevat nog steeds voldoende diversiteit in hoofd- en sporenelementen voor de gewenste milieukundige beoordeling van de bodems van Zeeland. Hij vormt derhalve de gewaarborgde kern voor alle data-analyses, waarbij echter nog steeds gerefereerd kan worden aan de totale dataset.

Statistische kengetallen laten zien dat de meeste parameters niet de standaard normale of lognormale verdeling volgen. Hoewel de meeste hoofdelementen neigen naar een min of meer normale distributie, en de meeste sporenelementen scheef verdeeld zijn naar de hogere concentraties, zijn afwijkingen van de standaardverdeling overduidelijk. Mogelijke contaminanten zoals Cd, Sb, As, Pb en Zn zijn meer scheef verdeeld dan andere sporenelementen.

## **Hoofdstuk 5. Aanrijking en natuurlijke variabiliteit versus antropogene impact**

Voor het bepalen en kwantificeren van antropogene beïnvloeding wordt een gestructureerde aanpak gevolgd, gebruik makend van diverse statistische technieken die toenemen in complexiteit en het gebruik van extra data. Deze aanpak verschaft gedetailleerd inzicht in de bodemgeochemie van Zeeland. Hij laat ten eerste zien welke componenten zeer waarschijnlijk zijn beïnvloed door menselijke activiteit. Vervolgens blijkt deze antropogene invloed gekwantificeerd te kunnen worden, gebaseerd op een relatie met niet beïnvloede bodem-componenten.

Cumulatieve frequentie grafieken zijn een goede hulp om in één oogopslag te zien welke elementen voor een deel van de monsters een afwijkende concentratie hebben. Uit deze grafieken kunnen in principe percentielen in de frequentieverdeling worden afgeleid die de grens vormen tussen achtergrond en afwijkende data. Een veel gebruikte standaard bij Nederlands bodemonderzoek is om de waarde corresponderend met de  $P_{90}$  te kiezen als referentie- of drempelwaarde voor potentieel beïnvloede elementen. Dit is echter alleen verantwoord als ook de bijbehorende cumulatieve frequentie grafieken worden bestudeerd. In deze studie zijn de meeste (sporen) elementen voornamelijk geassocieerd met natuurlijke processen en de  $P_{90}$  is een overduidelijke onderschatting, de  $P_{99}$  is meer geschikt. Ook voor Pb is de  $P_{90}$  een onderschatting, terwijl voor sommige andere waarschijnlijk antropogeen beïnvloede elementen (Cd, Cu en Sb) de  $P_{90}$  een overschatting van de drempelwaarde

is. Dit suggereert dat de arbitraire keuze voor de  $P_{90}$  in veel Nederlandse bodemonderzoeken in heroverweging genomen moet worden. De cumulatieve frequentie methode heeft het voordeel van haar eenvoud, maar laat alleen zien of de statistische frequentie verdeling van een bodemcomponent al of niet afwijkt van normaliteit met een duidelijk neiging naar hogere waarden. De methode geeft geen aanwijzing voor de aard van de afwijking, natuurlijk of antropogeen. Ook wordt geen duidelijk beeld voorzien van de mate van aanrijking door de subjectiviteit en soms ambivalentie in de keuze van de drempelwaarde. Echter in een verkennende fase kan deze methode zeer bruikbaar zijn.

De ruimtelijke verdeling van de elementen met lage drempelwaarden ( $P_{80}$  tot  $P_{90}$ ), en waarschijnlijk beïnvloed door de mens, laat een variabiliteit zien die duidelijk afwijkt van de min of meer overeenkomende ruimtelijke patronen die de elementen laten zien die gerelateerd zijn aan natuurlijke processen, zoals de variabiliteit in klei-gehalte. Dit duidt erop dat voor deze mogelijk beïnvloede elementen een uniek proces ten grondslag ligt aan de regionale variabiliteit.

Berekening van mediane ratio's met de standaardwaarden voor de buitenste continentale korst (upper continental crust, UCC), met de mediane waarden zoals bepaald voor de diepere Zeeuwse bodem, en met de wettelijke Streefwaarden, is een eenvoudige methode om te bepalen welke elementen aangerijkt zijn in vergelijking tot de gebruikte referentie. Ratio's met de UCC duiden erop dat As, Cd, Cr, Pb en Zr relatief aangerijkt zijn. Voor As wordt aangenomen dat deze aanrijking deels wordt veroorzaakt door de laag gelegen deltaïsche positie van Zeeland. Cr en Zr kunnen gerelateerd worden aan concentraties van zware mineralen, terwijl de andere elementen mogelijk zijn aangerijkt door kunstmestgebruik en/of uitstoot van verkeer. Relatief verarmde elementen zijn Ba, Ca, K, Mg, Mn, Na en Sr, waarvan wordt aangenomen dat dit een natuurlijke regionale eigenschap is voor Zeeland. Gemiddeld lijkt het dat de Zeeuwse bodems iets armer in Al en Fe is dan de UCC. De ratio's gebaseerd op de diepere bodem laten zien dat de elementen As, Cd, Cu, P, Pb, S, Sb, Sn en Zn aangerijkt zijn. Dit zijn allemaal elementen waarvoor aanrijking in het algemeen gerelateerd kan worden aan antropogene activiteiten. De ratio's met de Streefwaarden, vaak gebruikt als referentiewaarde voor de mate van verontreiniging, laten waarden zien tussen de 0.5-0.8. Hierbij worden de hogere ratio's (Cr, Ni) waarschijnlijk veroorzaakt door de hogere analytische opbrengst van de XRF totaal-methode in vergelijking met de koningswater extractie. Zelfs de  $P_{99}$  van de ratio's gebaseerd op Streefwaarden voor het mediane klei-gehalte in Zeeland, zijn lager dan 1 voor alle elementen.

De implicaties van de ratio-resultaten zijn tweeledig: 1) het landelijk gebied in Zeeland zoals beschouwd in deze studie is schoon volgens wettelijke maatstaven en 2) de Streefwaarden, die duidelijk een zekere algemene(lichte) mate van antropogene aanrijkingen al incorporeren, zijn een overschatting van de natuurlijke achtergrondwaarden in de bodem. Zij zijn dus minder geschikt als referentiewaarden in een studie naar natuurlijke en antropogene geochemische patronen. De ratio's met de lokale referentie (data van de diepere bodem) hebben de voorkeur bij de identificatie van de beïnvloede elementen en het vaststellen van de mate van aanrijking.

De correlatie met  $Al_2O_3$  is eenvoudig te berekenen en is zeer bruikbaar gebleken om elementen te duiden die mogelijk zijn beïnvloed door menselijk processen. De componenten

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cd, Cu, Pb, S, Sben Sn laten, vergeleken met andere elementen, een relatief lagere correlatie zien met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in de bovenlaag van de bodem en zijn ook aangerijkt ten opzichte van de diepere bodem. CaO, MnO, Na<sub>2</sub>O en Sr laten een relatief lage, of negatieve correlatie zien met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> maar zijn niet aangerijkt in de bovenlaag. De correlaties bevestigen de overeenkomsten zoals waargenomen in de ruimtelijke patronen van de elementen.

De in het algemeen hogere correlaties met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in de diepere bodem bevestigen de hypothese dat de laatste kan worden beschouwd als een oorspronkelijke, niet beïnvloede, referentie. Een grafische weergave van de relatie tussen de verschillende elementen en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> voor zowel de bovenlaag als de diepere bodem laat duidelijk de relatieve aanrijking van de bovenlaag zien. Door gebruik te maken van een lineair regressiemodel gebaseerd op alle data van de diepere bodem, kan de mate van aanrijking in de bovenlaag voor iedere afzonderlijke locatie gekwantificeerd worden. De elementen in volgorde van afnemende aanrijking, uitgedrukt als de gemiddelde of mediane ratio tussen de werkelijk gemeten waarde en de uit de regressievergelijking berekende referentiewaarde, is Cd > Cu ≫ Sn ≈ Sb > Pb > Zn > As. Deze mate van aanrijking komt overeen met data uit een vergelijkbaar gebied in het noorden van Frankrijk, behalve voor Cu dat in Zeeland relatief meer is aangerijkt. Ruimtelijke verdelingspatronen van de aanrijgings-ratio's laten zien dat voor de meeste beïnvloede elementen de regionale variabiliteit groot is en dat nauwelijks enige ruimtelijke of onderlinge relaties voorkomen. Het algemene regionale beeld zoals blijkend uit de gesommeerde contaminatie-index laat zien dat sommige gebieden in het noord-oosten en midden van Zeeland relatief meer zijn aangerijkt.

De regressie met de diepere bodem als referentie biedt veel voordelen ten opzichte van de huidige Nederlandse praktijk van het vergelijken met de vaste Streefwaarden, ofschoon gecorrigeerd voor klei en organisch stof gehalte. De natuurlijke willekeurige variabiliteit in de referentie-concentratie, uitgedrukt als de standaardfout van de regressie, is een via het regressiemodel bepaald kenmerk. Dit contrasteert met de wettelijke Streefwaarde, die slechts n getal zonder bandbreedte geeft. Tevens voorziet het regressiemodel in een lokale referentie, specifiek voor het natuurlijke bodemmateriaal van Zeeland, hetgeen zeker de voorkeur verdient boven een algemeen model dat probeert alle mogelijke bodemtypen te omvatten. Vergeleken met de andere technieken, geeft de regressie met de diepere bodem als referentie het meest diepgaand inzicht in 1) de geologische/pedologische patronen in geochemische variabiliteit, 2) de willekeurige natuurlijke variatie en 3) de antropogene aanrijking van de Zeeuwse bodem. De nadelen van de grotere complexiteit wegen niet op tegen bovengenoemde voordelen van deze methode.

## **Hoofdstuk 6. Regionale diffuse geochemische patronen en processen**

In dit hoofdstuk concentreer ik me op de mate waarin de menselijke bijdrage werkelijk de regionale bodemsamenstelling beïnvloedt in vergelijking met de natuurlijk variabiliteit. Gebruik makend van dezelfde data als in hoofdstuk 5 worden de processen en factoren, die

de regionale variabiliteit in de geografische en attribuut ruimte bepalen, onderzocht. De regionale expressie van de interactie van menselijke en natuurlijke processen wordt nader bekeken om te zien of er regio's te onderscheiden zijn waar specifieke menselijke processen effect hebben gehad op de bodemsamenstelling.

De algemene covariantiestructuur van de data wordt bestudeerd met behulp van principaal component analyse (PCA) om zo processen in de attribuut-ruimte te laten zien. De groepering van onderling covariërende geochemische componenten vormt aanwijzingen voor de aard van deze processen. Een clustering-techniek is gebruikt om groepen van monsterpunten met gelijke eigenschappen te identificeren, om zo de relatie tussen de geïdentificeerde processen en locatie in de geografische ruimte te leggen. Een fuzzy clustering (FCMC) werd gekozen omdat verwacht werd dat het uiteindelijke totale patroon een combinatie of overlap is van verschillende processen.

Het achtereenvolgende gebruik van PCA en FCMC leverde een duidelijk inzicht in de processen die van invloed zijn op de regionale geochemische bodemsamenstelling in Zeeland en in de mate van de variabiliteit veroorzaakt door de mens.

De PCA onthult 4 factoren die 76.6% van de variantie verklaren. Deze factoren zijn voor het gemak "klei", "calciet", "antropogeen" en "silt" genoemd. Het grootste gedeelte van de variabiliteit (68%) is gerelateerd aan de geogene klei, calciet en silt gerelateerde processen terwijl 8.9% verklaard kan worden met antropogene processen. De elementen die gerelateerd zijn aan het laatste zijn de zogenaamde "zware metalen" Cd, Cu, Sb, Sn en in mindere mate Pb, Zn en As. De regionale variabiliteit van de klei, calciet en silt factoren komt overeen met de regionale variabiliteit van de specifieke elementen die aan deze respectieve factoren geassocieerd zijn. De regionale variabiliteit van de antropogene factor kan grotendeels worden vergeleken met die van de contaminatie index zoals verkregen in hoofdstuk 5. Wanneer de elementen op de antropogene factor nader worden bekeken kunnen geen aparte subprocessen onderscheiden worden, anders dan uniek gedrag van elk element.

Gegeven de al eerder aangetoonde aanrijking van de bovenlaag van de Zeeuwse bodems met sommige elementen, is het te verwachten dat dit ook naar voren komt bij het bekijken van proces-gerelateerde patronen in de attribuut-ruimte. De PCA bevestigde dit inderdaad, maar de klei en calciet gerelateerde processen bepalen nog steeds het grootste gedeelte van de variabiliteit in bodemsamenstelling. De antropogene invloed op de bodemsamenstelling verklaart slechts een klein deel van de totale variabiliteit. Dit benadrukt dat deze antropogene processen slechts een klein aantal anorganische elementen beïnvloeden en maar in beperkte mate de al aanwezige, natuurlijke variabiliteit vergroten.

Het groeperen van de locaties met behulp van FCMC, gebruik makend van die elementen die door de PCA werden geïdentificeerd als meest karakteristiek voor de verschillende processen, resulteerde in een optimaal 4-cluster model. Hiermee werd het gebied hoofdzakelijk opgedeeld in kalkrijke klei, kalkarme klei, matig kalkhoudende siltige klei en kalkarme silt. Er zijn geen clusters van monsters gevonden die kunnen worden onderscheiden op specifiek antropogene aanrijking. Dit suggereert dat deze menselijke processen, waarvan de invloed duidelijk aanwezig is in de Zeeuwse bodems, niet gerelateerd zijn aan specifieke

regio's maar eerder diffuus verspreid zijn over de provincie.

## Hoofdstuk 7. Beoordeling van de regionale DDT concentraties in de bodems van Zeeland

Dit hoofdstuk tracht te voorzien in een regionale beoordeling van de DDT-problematiek in de Provincie Zeeland betreffende huidige resterende DDT concentraties, variabiliteit en afbraak. De data zijn samengevoegd uit een aantal verschillende bodem informatie systemen (soil information systems, SIS). Vergelijking van de concentraties met wettelijke normen en gegevens uit andere gebieden maken het mogelijk de mate van vervuiling te beoordelen. Dit laatste geeft inzicht of de concentraties slechts een onderdeel zijn van de alomtegenwoordige achtergrond of deze overstijgen. Ook de geografische verdeling van de restant DDT waarden laat mogelijk patronen zien die kunnen duiden op bepaalde processen. Daarnaast kan het integreren van de DDT data helpen om de waarde van de gecombineerde SIS voor regionaal milieukundig beleid te bepalen, mogelijk leidend tot aanbevelingen voor de (lokale) autoriteiten voor toekomstig onderzoek en monitoring.

De combinatie van de uit de diverse SIS betrokken sub-datasets resulteerde in een database die kon worden gebruikt voor een regionale beoordeling. De verschillen tussen de afzonderlijke datasets zijn echter overduidelijk, ondanks dat ze in het algemeen allemaal gebaseerd zijn op dezelfde bemonsterings- en analyse-voorschriften. Het is moeilijk te bepalen of deze verschillen duiden op reële verschillen in DDT concentraties of dat zijn grotendeels worden veroorzaakt door de te verwachten kleine variaties in bemonsterings- en laboratorium-methoden.

De  $\sum DDx$  concentratie (som van de concentraties van alle DDT isomeren en metaboolieten) zoals gevonden in Zeeland zijn vergelijkbaar met die in overeenkomstige agrarische gebieden. Er is daarom geen reden om aan te nemen dat het huidige niveau van DDT contaminatie ernstiger is dan wat verwacht mag worden voor een agrarisch gebied. Vergeleken met niet beïnvloede gebieden is het niveau in Zeeland een factor 2-10 hoger wat erop duidt dat Zeeland beschouwd kan worden als aangerijkt ten opzichte van de wereldwijd aanwezige achtergrond. Alhoewel de waarden dus binnen een normale bandbreedte vallen voor agrarische gebieden, wordt de ongecorrigeerde streefwaarde  $S$  in de helft van de gevallen overschreden en de (voor lutum en organisch stof) gecorrigeerde streefwaarde  $s$  in nog meer gevallen, wat kan leiden tot wettelijke problemen.

De relatief grote bijdrage van de variabiliteit op lokale schaal aan de totale variabiliteit van de  $\sum DDx$  concentraties houdt in dat een ruimtelijk regionaal beeld van beperkte waarde is aangezien het grootste gedeelte van de waargenomen regionale variantie beschouwd kan worden als ruis, veroorzaakt door kleinschalige processen of factoren. Dit volgt zowel uit de variantie-analyse op herhaald uitgevoerde bemonsteringen, als uit het grote "nugget effect" in de berekende semivariantie.

Gegeven de kleinschalige variabiliteit en de afwijkingen tussen de verschillende datasets, zal het uiteindelijke ruimtelijke beeld grote onzekerheden bevatten. Ondanks dat grootscha-

lige kenmerken zichtbaar lijken te zijn, zoals hogere concentraties in het zuiden van Zuid-Beveland die waarschijnlijk worden veroorzaakt door de aanwezigheid van boomgaarden, zullen deze met voorzichtigheid moeten worden beoordeeld. Extreme voorzichtigheid is nodig als de waarden worden vergeleken met de (gecorrigeerde) streefwaarde. Door de grote onnauwkeurigheid veroorzaakt door de diverse foutbronnen heeft zo'n toetsing zeer beperkte waarde.

Het lage niveau van afbraak van DDT, zoals blijkend uit de verhouding tussen metaboliëten en restant-DDT, duiden erop dat de Zeeuwse bodems een bron blijven voor  $\sum DDT_x$  voor een langere tijd dan mogelijk verwacht. Aangezien niet wordt aangenomen dat nu nog toepassing van DDT plaatsvindt zal het monitoren van het DDT niveau vooral een inzicht verschaffend karakter kunnen hebben. Het belangrijkste punt dat aandacht behoeft is het terugdringen van de ruis-variabiliteit. Waarschijnlijk kan de grootste reductie behaald worden door het verder standaardiseren van de bemonstering, wat de systematische verschillen tussen de individuele onderzoeken vermindert. De invloed van de kleinschalige variabiliteit kan aangepakt worden door het vergroten van het aantal submonsters of het verhogen van de mosnterdichtheid, maar dit is wellicht minder kosten-effectief. Van belang is dat het beleid, gebaseerd op de huidige of betere data, altijd rekening zal moeten houden met de gegeven onzekerheden als gevolg van de resterende variabiliteit.

## Hoofdstuk 8, Synthese

Deze studie heeft laten zien dat door het gebruik van state-of-the-art analytische technieken en bewezen methoden uit de geochemie, veel inzicht verkregen kan worden in onderzoek naar de natuurlijke bodemsamenstelling en hoe deze wordt beïnvloed door menselijke processen. De aanpak voorziet in zowel een methode om een referentie voor natuurlijke bodemwaarden te krijgen als om de menselijke invloed te kwantificeren. Het raamwerk van wettelijke normen voorziet niet in een dergelijke referentie, en is niet in staat om subtiele antropogene invloeden te onderscheiden. Dit raamwerk voldoet voor zover toegepast in het kader van de bodemsanering, maar het gebruik van de Streefwaarde als basisnorm voor het bouwstoffenbesluit en gerelateerde bodemkwaliteitskaarten die het verspreiden van contaminanten tegen moet gaan, ligt minder voor de hand. Daarom suggereer ik dat in dat geval de referentie voor "schone" bodem zou moeten worden afgeleid van een lokale referentie en niet van wettelijke normen. Bij het verkrijgen van zo'n referentie zijn het kwantificeren van de variabiliteit ten gevolge van bemonstering en analytische procedures, en methoden om afwijkingen tussen separate onderzoeken te reduceren of te compenseren, net zo belangrijk als de referentie zelf. Indien multi-element technieken worden gebruikt, zoals de meeste laboratoria al doen, dan zal er niet alleen aandacht moeten worden geschonken aan de prioritaire componenten maar ook aan componenten die mogelijk informatie verschaffen over de natuurlijk geochemische samenstelling en variabiliteit.

Bodemkwaliteit (of beter vervuilingsrisico) in Zeeland lijkt, volgens de Nederlandse wettelijke normen, voornamelijk bepaald te worden door restanten DDT. Helaas resulteert de gemiddeld lage concentratie, grote kleinschalige variabiliteit en complexe analytische me-

thode in een hoge bepalings-onzekerheid met betrekking tot deze component. Voor het verkrijgen van een meer betrouwbaar “georeferenced” beeld van de DDT niveaus zal meer inspanning gericht moeten worden op het verminderen van variantie en afwijking tussen onderzoeken.

De vraag blijft wat “bodemkwaliteit” betekent voor de Nederlandse situatie en welke indicatoren daarvoor gebruikt moeten worden. In dit hoofdstuk is beargumenteerd dat één van de doelen om duurzaam bodembeleid te bereiken een heroverweging en verbreding van het begrip “bodemkwaliteit” zou moeten zijn. Alleen dan is het mogelijk om te bepalen welke, probleem-specifieke, bodemkwaliteitsindicatoren moeten worden beoordeeld. De referentie-data en methoden uit deze studie kunnen een startpunt vormen voor het verkrijgen van zulke indicatoren, uiteindelijk leidend tot duurzaam beheer van de bodem.