



Kartering van fosfaatbeschikbaarheid in de bodem met behulp van natuurlijke radioactiviteit

R.H. Kemmers
F.M. van Egmond
E.H. Loonstra



Kartering van fosfaatbeschikbaarheid in de bodem met behulp van natuurlijke radioactiviteit

Kartering van fosfaatbeschikbaarheid in de bodem met behulp van natuurlijke radioactiviteit

R.H. Kemmers
F.M. van Egmond
E.H. Loonstra

Alterra-rapport 1728

Alterra, Wageningen, 2008

REFERAAT

Kemmers, R.H., F.M. van Egmond & E.H. Loonstra, 2008. *Kartering van fosfaatbeschikbaarheid in de bodem met behulp van natuurlijke radioactiviteit*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1728. 31 blz.; 11 fig.; 3 tab.; 18 ref.

De mogelijkheden voor natuurontwikkeling op voormalige landbouwgronden worden sterk bepaald door de fosfaatbeschikbaarheid. In een case study is de zogeheten GM Soil Meter gebruikt om de bodem vlakdekkend te scannen op de fosfaatbeschikbaarheid. Deze Soil Meter bevat een sensor waarmee natuurlijke radioactiviteit uit de bodem in de vorm van gammastraling wordt gemeten. Gammaspectra worden gekalibreerd aan chemische bodemeigenschappen. Door proceskennis over P-adsorptie- en -desorptie te koppelen aan verzamelde ruimtelijke informatie kon vlakdekkende informatie met een hoge resolutie worden verkregen over gebiedsdelen waar een te hoge fosfaatbeschikbaarheid is te verwachten. De verkregen kaartinformatie is veelbelovend: de patronen zijn met gebiedskennis te interpreteren. Een validatiestudie verdient aanbeveling om de betrouwbaarheid te kwantificeren.

Trefwoorden: GM Soil Meter, ruimtelijke informatie, fosfaatbeschikbaarheid, natuurontwikkeling.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is digitaal beschikbaar via www.alterra.wur.nl. Een gedrukte versie van dit rapport, evenals van alle andere Alterra-rapporten, kunt u verkrijgen bij Uitgeverij Cereales te Wageningen (0317 46 66 66). Voor informatie over voorwaarden, prijzen en snelste bestelwijze zie www.boomblad.nl/rapportenservice

© 2008 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 veelevoudigd 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.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Materiaal en methoden	13
2.1 Onderzoeksopzet	13
2.2 Bodemchemisch onderzoek	13
2.3 Ruimtelijke patroonanalyse	16
3 Resultaten en discussie	19
3.1 Bodemchemie en fosfaatgedrag	19
3.2 Ruimtelijke analyse	21
3.2.1 Kalibratie	21
3.2.2 Ruimtelijke patronen	23
3.2.3 Wel of niet afgraven	26
3.3 Discussie	26
Literatuur	29
Bijlage 1 Analyseresultaten bodemmonsters	31

Woord vooraf

Alterra wordt vaak benaderd om te adviseren over geschiktheid van voormalige landbouwgronden voor de ontwikkeling van schrale natuur. Patrooninformatie over nutriëntvoorraden in de bodem is daarbij belangrijk. Hoe nauwkeuriger deze informatie, hoe preciezer inrichtingsmaatregelen kunnen worden uitgevoerd. Het verkrijgen van vlakdekkende patrooninformatie is vaak kosten- en arbeidsintensief. Daarom is Alterra op zoek naar kostenbesparende methoden die toch betrouwbaar zijn.

The Soil Company is een klein innovatief bedrijf dat eind jaren negentig samen met de Rijksuniversiteit Groningen en Medusa Explorations de GM Soil Meter heeft ontwikkeld, waarmee bodemeigenschappen met een hoge resolutie in kaart kunnen worden gebracht. Tot nu toe waren toepassingen gericht op precisielandbouw en bespeelbaarheid van sportvelden. Om de nieuwe techniek verder te ontwikkelen zocht The Soil Company naar nieuwe toepassingsmogelijkheden.

Uit samenwerking tussen Alterra en The Soil Company is gebleken dat er veelbelovende toepassingsmogelijkheden zijn bij natuurontwikkelingsprojecten.

Samenvatting

Bij de beoordeling van de fosfaattoestand van de bodem is de informatie over de ruimtelijke variatie van fosfaatgehalten een probleem. Naarmate meer inzicht bestaat in deze variatie kan gericht te werk worden gegaan bij de inrichting en kan het areaal van eventueel af te graven gronden worden beperkt. Om inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie van de bodem zijn verschillende methoden gangbaar die meer of minder kostbaar zijn en meer of minder betrouwbaar zijn.

Deze rapportage presenteert de resultaten van een case study die tot doel had de toepassingsmogelijkheid van een innovatieve methode te beoordelen waarmee de bodem wordt gescand met de zogeheten GM Soil Meter. Deze methode leidt tot vlakdekkende informatie met een zeer hoge resolutie over bv. de fosfaattoestand van de bodem.

De nieuwe methode werd uitgetoetst bij een natuurontwikkelingsproject in het gebied Tusschenwater in de benedenloop van het Hunzedal. Scanning van het gebied richtte zich op verkrijgen van ruimtelijke informatie over de fosfaattoestand, met als doel beantwoording van de vraag of en zo ja waar afgraving voor de ontwikkeling van schrale natuur noodzakelijk was.

De GM-soil meter is een ontvanger die op een voertuig wordt gemonteerd en waarmee natuurlijke radioactiviteit uit de bodemlaag 0-30 cm in de vorm van gammastraling wordt gedetecteerd tijdens het rijden. De sensor is gekoppeld aan een GPS. Het principe is gebaseerd op de wisselende samenstelling van de radioactieve elementen ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U en ^{137}Cs in het moedermateriaal van de bodem en de mate waarin deze nucliden worden gebonden en onderdeel uitmaken van klei-, silt- en zanddeeltjes. Deze vier nucliden worden op verschillende manieren gebonden in de bodem en kunnen zo als *proxy* worden gebruikt om fysische en chemische eigenschappen van de bodem in kaart te brengen. Tijdens een waarneming wordt het volledige gammaspectrum van de vier nucliden bepaald.

Op een aantal punten in het gebied werden tevens bodemmonsters verzameld en geanalyseerd op fysische en chemische parameters. Vervolgens werden regressiemodellen gekalibreerd die de relaties beschrijven tussen bodemeigenschappen en de verzamelde gammaspectra.

Uitgangspunt bij het procesonderzoek is geweest dat fosfaat wordt geadsorbeerd door Fe- en Al-oxiden en dat zich een evenwicht instelt tussen geadsorbeerd en opgelost fosfaat. Dit evenwicht kan door een adsorptie-isotherm worden beschreven. Voor drie organische stofklassen werd een adsorptie-isotherm met bijbehorende adsorptieparameters afgeleid. Het adsorptiemaximum en de bindingssterkte van de onderzochte gronden nemen af naarmate het organisch stofgehalte toeneemt.

Door de proceskennis over P-adsorptie- en -desorptie te koppelen aan verzamelde ruimtelijke informatie kon vlakdekkende informatie worden verkregen over gebiedsdelen waar ongewenste desorptie van fosfaat te verwachten is bij inundatie. De bodemchemische parameters (Fe, Al, P, Org. stof) bleken voor 54 tot 91 % uit de gammaspectra te kunnen worden verklaard. Deze ruimtelijke informatie werd op basis van een criterium voor de gewenste P-toestand voor natuurontwikkeling omgezet in een kaart met deelgebieden waar afgraven, niet afgraven of niet afgraven in combinatie met uitmijnen werd aanbevolen.

Uit de ruimtelijke informatie over de fosfaattoestand ontstaat een sterk gefragmenteerd kaartbeeld van zones waar geen of juist wel afgraving nodig zou zijn voor natuurontwikkeling. De ruimtelijke informatie is gedetailleerder dan een kraanmachinist wellicht lief is. De verkregen kaartinformatie is veelbelovend en lijkt logische patronen op te leveren, maar is nog niet gevalideerd zodat over de betrouwbaarheid nog aanvullend onderzoek gewenst is.

1 Inleiding

Aanleiding

Bij natuurontwikkeling op voormalige landbouwgrond kan de opgehoopte voorraad voedingsstoffen in de bovengrond een belangrijke belemmering vormen voor de ontwikkeling van gewenste schrale natuurdoeltypen. Daarbij spitst de problematiek zich met name toe op gehalten en voorraden fosfaat. Bij de inrichtingsfase kan afhankelijk van de te kiezen criteria en normen worden besloten de bovengrond wel of niet af te graven. Aan afgraven kleven een aantal belangrijke bezwaren (Chardon *et al.*, in prep), terwijl bij niet afgraven de vrees bestaat dat de termijn waarop door natuurlijke afvoer voldoende lage fosfaatgehalten kunnen worden gerealiseerd erg lang is. In veel gevallen moet bodemonderzoek uitsluitsel geven over de wenselijkheid al dan niet af te graven.

Probleem

Bij de beoordeling van de fosfaattoestand van de bodem is informatie over de ruimtelijke variatie van fosfaatgehalten een probleem. Naarmate meer inzicht bestaat in deze variatie kan gericht te werk worden gegaan bij de inrichting en het areaal eventueel af te graven gronden worden beperkt. Om inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie zijn verschillende methoden gangbaar die meer of minder kostbaar zijn en meer of minder betrouwbaar zijn.

Achtergrond

Om redenen van kosteneffectiviteit wordt bij ruimtelijke patroonanalyse vaak gewerkt met geavanceerde steekproeftechnieken en geostatistische methoden (Brus en te Riele, 2001; Brus en Heuvelink, 2007), waarbij het gebied op basis van voorinformatie wordt onderverdeeld in homogene deelgebieden die vervolgens via een kanssteekproef of een gerichte steekproef worden bemonsterd. Afhankelijk van de gewenste betrouwbaarheid zijn per deelgebied (percelen of bodemeenheden) meer of minder monsters nodig, zodat het aantal monsters tot een minimum kan worden gereduceerd. Met vlakdekkende hulpinformatie (bv. Digitale Hoogtebestanden) kan vaak vlakdekkend worden geïnterpoleerd tussen steekproefpunten. Om de standaardfout binnen de steekproef van een subgebied te verkleinen kan bovendien per geloot steekproefpunt een mengmonster worden samengesteld uit een aantal submonsters volgens een te kiezen bemonsteringsprotocol.

Een alternatief is om zoveel mogelijk, zonder voorkennis (non biased) en in den blinde monsters te verzamelen, waardoor per oppervlakte-eenheid een groot aantal gegevens wordt verzameld en eventueel kunnen worden gemiddeld. Doorgaans leidt dit tot gemiddelden per oppervlakte-eenheid met een grote standaardfout.

Doel

De doelstelling van deze rapportage is de resultaten van een case study te presenteren waarbij van een innovatieve methode gebruik is gemaakt om de bodem te scannen op fosfaat- en andere parameters (organische stof, pH, Fe, Al etc) met een zgn. GM Soil Meter. De GM soil meter is voorzien van een sensor waarmee natuurlijke

radioactiviteit (Gammastraling) van de bodem kan worden gemeten. De gammaspectra worden gekalibreerd aan bodem(chemische)eigenschappen. Deze methode leidt tot vlakdekkende informatie over bv. de fosfaattoestand van de bodem (o.a. potentieel beschikbaar P, fosfaatverzadigingsindex) met een zeer hoge resolutie.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt besproken in welk gebied de case study is uitgevoerd, welke werkwijze is gevolgd om resultaten van laboratoriumexperimenten, waarmee proceskennis over het adsorptiegedrag van fosfaat werd verkregen, op te schalen naar ruimtelijke informatie. Vervolgens wordt in dit hoofdstuk het theoretisch concept van het adsorptiegedrag van fosfaat uiteengezet, aangegeven welke bodemchemische parameters zijn verzameld en besproken welke fosfaatcriteria voor natuurontwikkeling zijn gehanteerd. Tenslotte worden achtergronden en methodische aspecten besproken van de scantechniek om hoog resolute ruimtelijke informatie te verzamelen van bodemparameters.

In hoofdstuk 3 worden de resultaten gepresenteerd van de laboratoriumexperimenten en van de toepassing van de scantechniek om ruimtelijke informatie over de fosfaattoestand in een pilotgebied vast te leggen. Tenslotte krijgen enkele discussiepunten de aandacht.

2 Materiaal en methoden

2.1 Onderzoeksopzet

Gebied

De case study is uitgevoerd in het gebied Tusschenwater in de benedenloop van het Hunzedal. In dit voormalige landbouwgebied zijn twee moerasgebieden aangelegd waar Hunzewater kan worden ingelaten en inundatie van het maaiveld mogelijk is. Een van de moerasgebieden (ca. 1,5 ha) fungeert als zuiveringsmoeras voor het Hunzewater. In dit gebiedje is eerder nutriëntenonderzoek (Plan van Aanpak, 2005) uitgevoerd en grond verzameld voor fosfaatadsorptie en -desorptieonderzoek in relatie tot vernatting (Kemmers, 2007)

Op verzoek van de Provincie Drenthe en in overleg met het waterschap Hunze en Aa is een onderzoekplan (Plan van aanpak, 2005) ontwikkeld om de resultaten van het nutriëntenonderzoek op te schalen naar het niveau van het natuurontwikkelingsplan Tusschenwater (190 ha).

Werkwijze

Voor de opschaling van het nutriëntenonderzoek is gebruik gemaakt van een innovatieve techniek om ruimtelijke bodemkundige informatie over de fosfaattoestand te verzamelen door de bodem te scannen op natuurlijke gammastraling met een GM Soil Meter (de Wit *et al.*, 2007). De scan richtte zich op verkrijgen van ruimtelijke informatie over de fosfaattoestand met als doel beantwoording van de vraag of en zo ja waar afgraving voor de ontwikkeling van schrale natuurontwikkeling noodzakelijk was. Gammaspectra werden gecalibreerd aan bodemchemische eigenschappen

Door proceskennis over P-adsorptie- en -desorptie in verband te brengen met de verzamelde ruimtelijke patronen kon vlakdekkende informatie worden verkregen over gebiedsdelen waar ongewenste desorptie van fosfaat te verwachten is bij inundatie. Deze ruimtelijke informatie werd op basis van een criterium voor de gewenste P-toestand voor natuurontwikkeling omgezet in een kaart met deelgebieden waar afgraven, niet afgraven of niet afgraven in combinatie met uitmijnen werd aanbevolen.

2.2 Bodemchemisch onderzoek

Bodemmonsters werden geanalyseerd op een aantal bodemeigenschappen die bepalend zijn voor het fosfaatgedrag in de bodem

Concept fosfaatgedrag

Voor de analyse van het fosfaatgedrag in de bodem zijn wij uitgegaan van een concept waarbij een evenwichtsrelatie aanwezig is tussen opgelost (P_{CaCl_2}) en geadsorbeerd fosfaat (P_{ox}). Dit evenwicht kan worden weergegeven in een

evenwichtsvergelijking, waarvan een adsorptie-isotherm de visuele weergave is. Het adsorptiemaximum en de bindingssterkte zijn de belangrijkste parameters die de aard van de adsorptie-isotherm beschrijven (Van der Zee en Van Riemsdijk, 1986). Het gehalte ijzer- en aluminiumoxiden is bepalend voor de fosfaatadsorptiecapaciteit.

Anorganische fosfaat in een bodemvochttoplossing (P) wordt verondersteld te worden geadsorbeerd aan ijzer- en aluminiumoxiden (S), waarna zich een evenwichtsreactie met een evenwichtsconstante K (bindingssterkte) instelt volgens :



waarbij als reactievergelijking geldt:

$$[SP]/([S] \cdot [P]) = K$$

De totale adsorptiecapaciteit (St), gevormd door ijzer- en aluminiumoxiden, kan worden geschreven als:

$$St = [SP] + [S]$$

Eliminatie van S levert:

$$\begin{aligned} [SP]/[St-SP] \cdot [P] &= K \\ [SP] &= K \cdot \{ [St-SP] \cdot [P] \} \\ [SP] &= K \cdot [St] \cdot [P] - K \cdot [SP] \cdot [P] \\ [SP] + K \cdot [SP] \cdot [P] &= K \cdot [St] \cdot [P] \\ [SP](1+K \cdot [P]) &= K \cdot [St] \cdot [P] \\ [SP] &= [St] \cdot K \cdot [P] / (1+K \cdot [P]) \\ [SP]/[St] &= K \cdot [P] / (1+K \cdot [P]) \end{aligned} \quad (2)$$

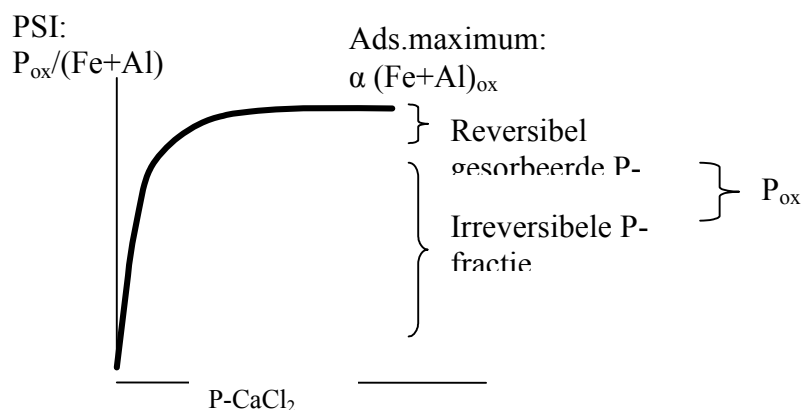
Vergelijking (2) is een Langmuir-isotherm, die het evenwicht beschrijft tussen de fractie geadsorbeerd (linker term) en opgelost fosfaat (rechter term). De linkerterm van de vergelijking kan worden herschreven als $P_{ox}/(Al+Fe)_{ox}$ en wordt ook wel de fosfaatverzadigingsindex (PSI) genoemd (Koopmans, 2004). Het suffix *ox* heeft betrekking op de extractie van fosfaat, aluminium- en ijzeroxiden met ammoniumoxalaat. Deze extractiemethode ontsluit de reactieve, ook wel amorfe genoemd, ijzer- en aluminiumoxiden waaraan fosfaat kan worden geadsorbeerd.

De PSI kan in arme kalkloze zandgronden een maximale waarde van 0,4 à 0,45 (α) bereiken. Er is dan sprake van een adsorptiemaximum (Q_{max}) volgens:

$$Q_{max} = \alpha (Al+Fe)_{ox}$$

De Langmuir-isotherm geeft het verband weer tussen de geadsorbeerde fosfaatfractie (PSI) en oplosbaar fosfaat (P_{opl}), waarvoor wij P_{CaCl2} als maat gebruikt hebben. Dit verband verloopt niet lineair (Figuur 1). Het horizontale deel van de isotherm wijst op fosfaatverzadigde omstandigheden, waarbij fosfaat vooral vanuit de gesorbeerde (i.e. reversibel gebonden) fase in oplossing komt en makkelijk beschikbaar is. In het verticale deel van de curve is het evenwicht sterk naar de geadsorbeerde fase verschoven en wordt de fosfaatconcentratie veel sterker gebufferd en verandert de concentratie nog maar langzaam: in dit deel van de curve is een langzame diffusiereactie verantwoordelijk voor het slechts moeizaam in oplossing komen van de gefixeerde (quasi-irreversibele) fosfaatfractie (Koopmans *et al.*, 2004). Deze diffusiereactie kan zo gering worden dat er een momentaan te kort optreedt voor de vegetatie. In dit deel van de curve is de fosfaatbeschikbaarheid gering. De helling van

het verticale deel van de isotherm geeft informatie over de bindingssterkte (K) van het evenwicht tussen geadsorbeerd en opgelost fosfaat. Naarmate de helling kleiner is neemt de bindingssterkte af. Uit dit concept kan worden geconcludeerd dat de fosfaatproblematiek een relatief karakter heeft. Niet het absolute fosfaatgehalte maar het gehalte P ten opzicht van Al en Fe is maatgevend.



Figuur 1 Langmuir-isotherm die het evenwicht beschrijft tussen de fractie geadsorbeerd (PSI) en opgelost fosfaat (P_{CaCl2}) in aanwezigheid van ijzer- en aluminiumoxiden.

Het adsorptiemaximum (Q_{max}) en de bindingssterkte (K) zijn de belangrijkste parameters die de aard van de isotherm beschrijven. De isotherm wordt dus deels bepaald door het gehalte aan amorfe ijzer- en aluminiumoxiden. Vooral het organische stofgehalte en de bodemvochtcondities blijken medebepalend te zijn voor de adsorptieparameters (Kemmers en Nelemans, 2007).

Bodembemonstering

Voor de kalibratieprocedure van de bodemscan werden ca. 3 monsters per 10 hectare gebruikt, zodat in totaal 50 plekken werden bemonsterd. De locaties werden zodanig gekozen dat de gemeten variatie in sensorwaarden zo goed mogelijk gebiedsdekkend werd bestreken. Monsters werden met een grondboor verzameld over een diepte van 0-30 cm. Per monster zijn 5 tot 7 boringen gedaan in een straal van 3 meter rond de sensor, waarna deze zijn gemengd tot één monster voor labanalyse.

Chemische analyses

De monsters werden na bemonstering overgebracht naar het laboratorium en geanalyseerd op oxalaatextraheerbaar Fe, Al en P (maat voor geadsorbeerd P, (Schwertmann, 1964), op organisch stofgehalte (LOI) en op CaCl₂-extraheerbaar P (maat voor makkelijk beschikbaar i.e. oplosbaar P).

Uit de analyseresultaten werd de fosfaatverzadigingsindex (PSI) berekend volgens $PSI = P_{ox}/(Al+Fe)_{ox}$ op molaire basis.

Adsorptie-eigenschappen

Omdat naar verwachting het organisch stofgehalte van invloed is op het adsorptiegedrag zijn de monsters gerangschikt naar oplopend organisch stofgehalte en vervolgens in drie groepen verdeeld volgens organische stofklassen die in het Ned. Bodemclassificatie Systeem (De Bakker & Schelling, 1989) worden gebruikt:

1. Uiterst humusarme tot zeer humeuze minerale grond (0-8% organische stof)
2. Humusrijk en venig zand (8-22,5% organische stof)
3. Veen (>22,5 organische stof).

Voor elk van deze drie klassen werd een adsorptie-isotherm afgeleid via niet-lineaire regressie op basis van de empirische resultaten (zie vgl. 2). Via een iteratief proces worden de adsorptieparameters ($Q=PSI$ en k =bindingssterkte) gefit.

Fosfaatcriteria voor natuurontwikkeling

De fosfaatverzadigingsindex (Tabel 1) is door ons gebruikt als criterium voor grenswaarden van de fosfaattoestand waarbij wordt geadviseerd i) af te graven, ii) niet af te graven met uitmijnen of iii) niet af te graven en normaal hooiland beheer (Van Delft *et al.*, 2007). Op basis van laboratoriumexperimenten om het fosfaatgedrag te onderzoeken op het adsorptie- en desorptiegedrag in klei-, zand- en veengronden zijn de criteria gestratificeerd naar organisch stofklasse (Kemmers en Nelemans, 2007). Deze criteria zijn gebaseerd op onderzoek in een scala van natuur(ontwikkelings)gebieden (Hommel *et al.*, 2006; Kemmers en van Delft, 2007, Van Delft *et al.*, 2004, 2007, 2008).

Tabel 1 Geschiktheid van standplaatsen voor natuurontwikkeling, op basis van organisch stofgehalte en fosfaatverzadigingsindex (PSI) van de bovengrond.

PSI	Organische stofklassen (%)		
	0-8	9-22,5	>22,5
> 0,2	Ongeschikt/afgraven	Ongeschikt/afgraven	Ongeschikt/afgraven
0,1-0,2	Kansrijk na uitmijnen	Kansrijk na uitmijnen	Ongeschikt/afgraven
< 0,1	geschikt	geschikt	Kansrijk na uitmijnen
< 0,05	geschikt	geschikt	geschikt

2.3 Ruimtelijke patroonanalyse

De GM Soil meter

Eind jaren negentig is door de Rijksuniversiteit Groningen, Medusa Explorations en The Soil Company de GM Soil Meter ontwikkeld. De GM-soil meter is een ontvanger waarmee natuurlijke radioactiviteit uit de bodemlaag 0-30 cm in de vorm van gammastraling wordt gedetecteerd. Door dit apparaat op een voertuig te

monteren en gelijkmatig over het veld te rijden kan vlakdekkend informatie worden verzameld. De sensor is gekoppeld aan een GPS, rijdt met een snelheid van 6 km/uur en logt één waarneming per seconde. Op een aantal punten worden tevens bodemmonsters verzameld en geanalyseerd op fysische en chemische parameters (e.g. lutum, M50, P, organische stof, Fe). Deze passieve, non-destructieve sensor meet gammastraling, een onderdeel van de natuurlijke radioactiviteit van de bodem en wordt gekalibreerd met behulp van bodemmonsters. Met deze methode kunnen ruimtelijke patronen met een hoge resolutie in kaart worden gebracht

Het gebruik van gammastraling als indicator van de eigenschappen van gesteenten en sedimenten is niet nieuw. In de mijnbouw en de geologie worden detectoren voor gammastraling al enige tientallen jaren ingezet om verschillende gesteenten en geologische eenheden te kunnen herkennen en onderscheiden. Het principe is dan ook gebaseerd op de wisselende samenstelling van de radioactieve elementen ^{232}Th , ^{40}K en ^{238}U in het moedermateriaal van de bodem en de mate waarin deze nucliden worden gebonden en onderdeel uitmaken van klei, silt en zanddeeltjes. Naast deze drie natuurlijke radioactieve elementen meet de GM Soil Meter ook ^{137}Cs , dat wereldwijd meetbaar is als gevolg van de kernramp in Tsjernobyl en kernproeven. Het blijkt dat deze vier nucliden op verschillende manieren worden gebonden in de bodem en zo als proxy kunnen worden gebruikt om de fysische en chemische eigenschappen van de bodem in kaart te brengen. Gammastraling wordt geabsorbeerd door vaste stoffen, hierdoor zal alleen straling afkomstig uit de bovenste halve meter van de bodem het oppervlak bereiken. Ongeveer 90 % van de gemeten straling is afkomstig uit de bovenste 30 cm van de bodem. Omdat gammastraling en chemische bodemeigenschappen worden beïnvloed door moedermateriaal, leeftijd en landgebruikshistorie worden de sensordata met behulp van bodemmonsters lokaal of regionaal gekalibreerd.

Sensormeting en bodembemonstering

Tijdens een meting met de GM Soil Meter wordt deze op 30 cm hoogte bevestigd aan een tractor en gekoppeld aan een GPS en een laptop voor het loggen van de data. Het perceel wordt in kaart gebracht met een rijsnelheid van 6 km/u en rijpaden van 6 m. De data wordt elke seconde gelogd op de laptop. Een meetpunt van de sensor beslaat 5 à 6 m². Monsterlocaties worden bepaald aan de hand van de gemeten gamma data zodat de monsters de gemeten variatie goed beschrijven en een goede ruimtelijke spreiding hebben. Op de monsternamen locaties wordt 5 minuten gemeten met de GM Soil Meter zodat een precies spectrum wordt verkregen dat wordt gebruikt bij de kalibratie.

Kalibratie en cartografie

Na het inmeten van het perceel worden de gamma data geanalyseerd door middel van een *full spectrum analysis* (Hendriks *et al.*, 2001) en gesplitst naar concentraties van de verschillende nucliden in Bq/kg. Per nuclide worden de meetdata gebiedsdekkend geïnterpoleerd met behulp van Inversed Distance Weighing. De gammadata op de monsternamen locaties en de labuitslagen worden geanalyseerd met (meervoudige) lineaire regressie. Veelal zijn de combinaties en trends van bodemeigenschappen met de nucliden reeds bekend en dient de analyse ter verdere kalibratie. De vergelijkingen

die hier uit komen worden gebruikt om de geïnterpoleerde kaarten om te rekenen naar kaarten van bodemeigenschappen. Ter controle worden berekende waarden vergeleken met de gemeten waarden en beschikbaar ander kaartmateriaal zoals de 1:50.000 bodemkaart. Validatie van deze methode in een ander gebied levert goede resultaten op. (van Egmond *et al.*, in prep.)

3 Resultaten en discussie

3.1 Bodemchemie en fosfaatgedrag

Bodemchemie

De resultaten van de chemische analyses voor de kalibratie van de gammadata zijn opgenomen in bijlage 1. Omdat naar verwachting het organische-stofgehalte van invloed is op het adsorptiegedrag zijn de monsters gerangschikt naar oplopend organisch stofgehalte en vervolgens in drie groepen verdeeld. Tabel 2 geeft de gemiddelde waarden en standaard deviaties van de analyseresultaten per organisch stofklasse.

Tabel 2 Gemiddelde waarden en standaard deviaties van enkele bodemeigenschappen per organisch stofklasse

Org. st	Org.stof	P-PO4	Al	Fe	P	PSI
	%	mg/kg	mmol/kg			-
Gemiddelden						
0-8	4.8	2.03	29.4	44.0	11.4	0.17
8-22.5	13.5	1.41	33.2	287.6	31.2	0.11
>22.5	43.2	1.30	52.5	512.4	55.2	0.09
Overall	24.4	1.50	40.7	330.0	37.1	0.12
Standaarddeviaties						
0-8	1.4	1.9	13.6	27.7	3.8	0.07
8-22.5	3.9	1.5	8.8	281.7	23.5	0.03
>22.5	1.7	1.8	13.1	27.8	4.0	0.03
Overall	18.9	1.90	15.4	334.5	43.3	0.06

Naarmate het organisch stofgehalte toeneemt nemen Al-, Fe- en P-oxalaatgehalten toe, maar nemen P-PO4 en PSI af.

Adsorptiegedrag

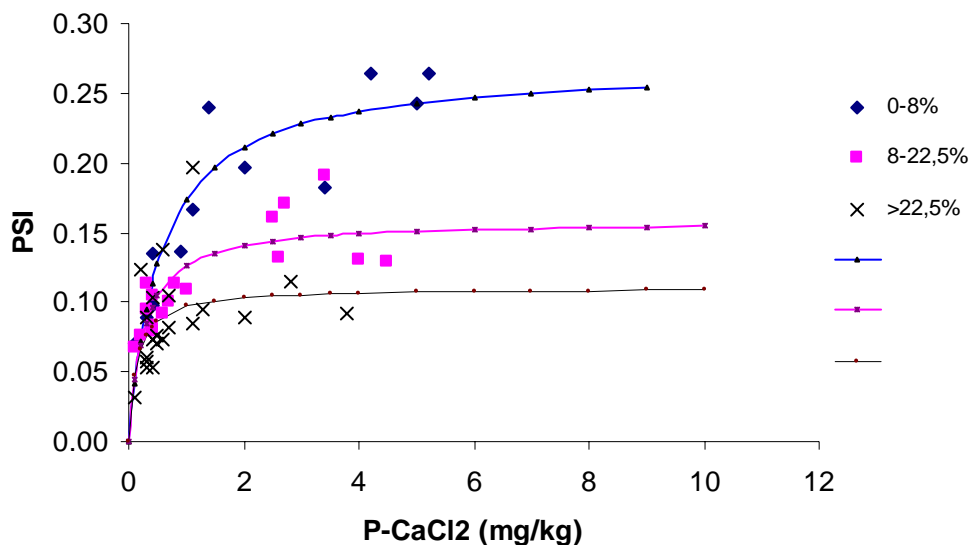
Voor elk van de drie organische stofklassen werd een adsorptie-isotherm afgeleid via niet-lineaire regressie op basis van de empirische resultaten (zie vgl. 2). Via een iteratief proces worden de adsorptieparameters ($Q=PSI$ en $k=$ bindingssterkte) gefit (Payne en Ainsley, 2000). Tabel 3 geeft de gefitte adsorptieparameters.

Tabel 3 Bindingssterkte (K) en adsorptiemaximum (Q_{max}) per organische stofklasse behorende bij de adsorptie-isothermen die via een fitcurve procedure werden gefit aan de empirische gegevens.

Org. stofklasse	K	Q_{max}	R^2	Fprob
	kg grond/kgF	Mol/Mol		
<8	1.794	0.2698	81.8	<0.001
8-22,5	3.85	0.1584	63.5	<0.001
>22,5	7.45	0.1101	14.9	<0.001

Het blijkt dat de gefitte isotherm 81,8 resp 63,5 % van de variatie in de empirische gegevens verklaren. Alleen voor organisch stofrijke monsters is de verklaarde variantie gering, maar wel significant. Figuur 2 geeft de basisgegevens en de gefitte isothermen per organische stofklasse. De resultaten zijn in overeenstemming met resultaten van adsorptie en desorptie-experimenten (Kemmers en Nelemans, 2007),

waaruit bleek dat het organisch stofgehalte een belangrijke invloed heeft op het adsorptiegedrag. Naarmate het organisch stofgehalte toeneemt, neemt de bindingssterkte af (wordt P minder sterk geadsorbeerd) en neemt de adsorptiecapaciteit (PSI) af. De lage verklaarde variantie bij voorspelling van de PSI door P-CaCl₂ in organische gronden moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan een hoge concentratie DOC (opgelost organische stof) in veengronden. DOC kan in competitie om bindingsplaatsen op de Fe- en Al-oxiden het fosfaat verdringen, waardoor relatief hoge concentraties beschikbaar P (P-CaCl₂) bij relatief lage PSI waarden worden gemeten. De monsters met meer dan 22,5 % org. stof zijn minder betrouwbaar (zie ook de ligging van de punten t.o.v. de isotherm).



Figuur 2 Adsorptie-isothermen per organische stofklasse die de theoretisch relatie aangeven tussen de geadsorbeerde fosfaatfractie (PSI) en beschikbaar fosfaat (P-CaCl₂). Symbolen geven de empirisch data weer waaraan de isothermen zijn gefit.

Conclusie

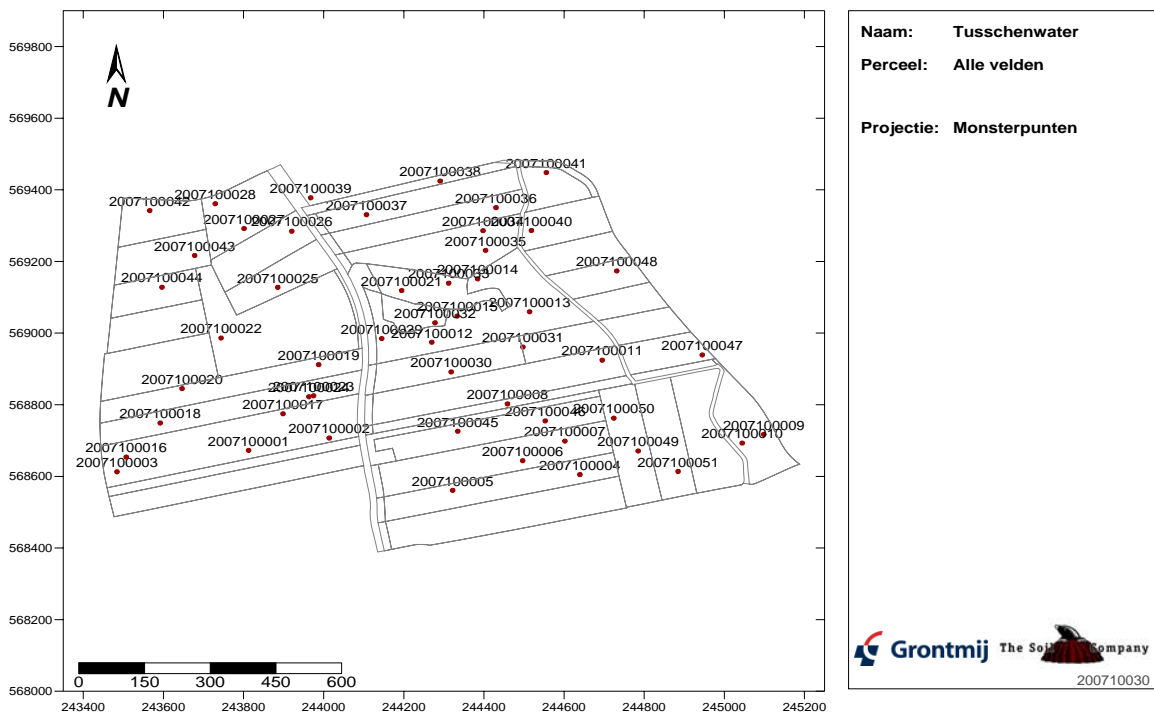
- De empirische verbanden tussen de geadsorbeerde en de beschikbare fosfaatfractie gedragen zich conform de theoretische verwachting. Dit impliceert dat het fosfaatgedrag in de bodem begrepen kan worden door adsorptie en desorptie van fosfaat, waarbij ijzer- en aluminiumoxiden de belangrijkste adsorptiecapaciteit leveren.
- Het adsorptiemaximum en de bindingssterkte van een grond nemen af naarmate het organisch stofgehalte toeneemt.
- Op basis van de adsorptie-isothermen moet geconcludeerd worden dat de gronden in Tussenwater plaatselijk fosfaatverzadigd zijn (horizontale trajecten isothermen)
- Ook bevestigen de resultaten dat adsorptie een niet lineair proces is: bij toename van de fosfaatverzadigingsindex wordt de bindingssterkte geringer waardoor het evenwicht tussen geadsorbeerd en opgelost fosfaat verschuift naar de opgeloste fase.

- In gronden met veel organische stof kan een deel van de adsorptiecapaciteit niet worden benut, waarschijnlijk omdat ijzeroxiden worden afgedekt door coatings van organische stof. Dit leidt ertoe dat bij een gelijke fosfaatverzadigingsindex in gronden met veel organische stof meer fosfaat in bodemvocht oplossing aanwezig is dan in organisch stofarme gronden.

3.2 Ruimtelijke analyse

3.2.1 Kalibratie

De ligging van de punten waar monsters zijn verzameld voor kalibratie is weergegeven in figuur 3.

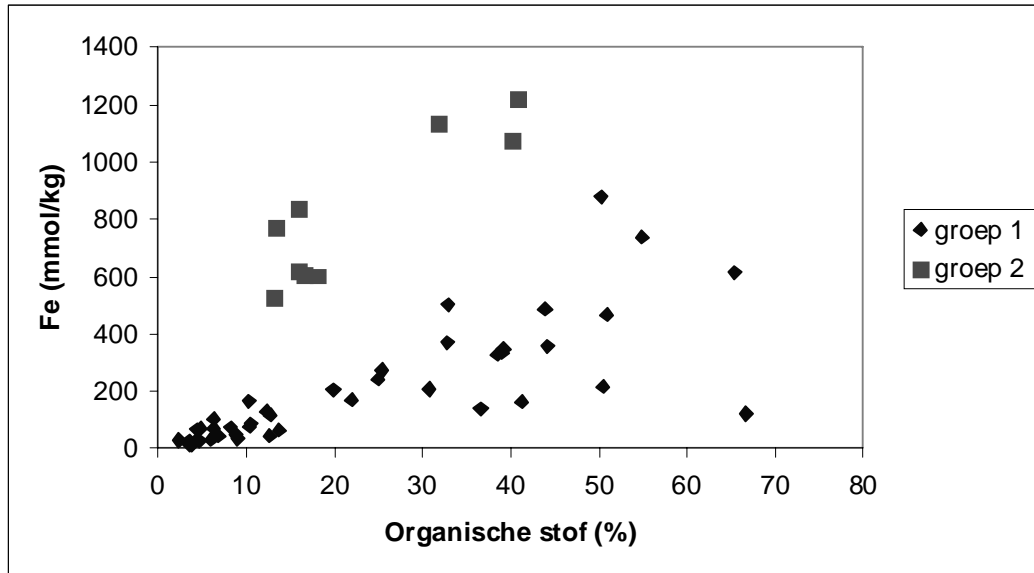


Figuur 3 Positie van de punten in het pilotgebied die voor de kalibratie werden bemonsterd.

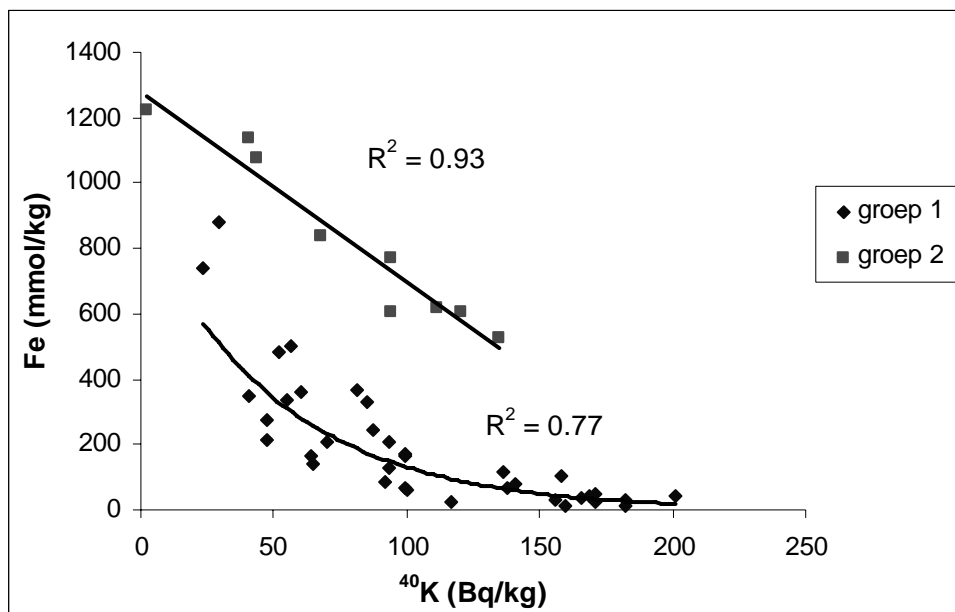
De labuitslagen van de monsters en de bijbehorende concentraties per nuclide in Bq/kg zijn tegen elkaar uitgezet. Hierbij bleek dat in de relaties tussen Fe, P en de verschillende nucliden twee niveaus zichtbaar waren. Deze zorgden ervoor dat er geen eenduidige regressievergelijkingen op te stellen waren waarmee betrouwbare bodemkaarten konden worden gemaakt: R^2 van 0.44 en 0.32. Omdat deze niveaus ook terugkwamen in de relaties van Fe en P met organische stof (Figuur 4) en vocht, is de dataset voor de regressie analyse van Fe en P gestratificeerd naar organische stof, hoogte en bodemsoort. Hierna leverde de regressie van Fe en P met de nucliden een hogere R^2 op, respectievelijk 0.77 en 0.93 voor Fe en 0.54 en 0.91 voor P (Figuur 5). Mogelijk ligt het voorkomen van ijzerrijke kwel in een gedeelte van het gebied aan

deze tweedeling ten grondslag. Binnen dit onderzoek was echter niet voldoende informatie aanwezig om dit te mogen concluderen.

De regressie van organische stof met de nucliden leverde een R^2 van 0.75 op.



Figuur 4 Uit het verband tussen organische stof en ijzergehalte van de bodem kan worden afgeleid dat er sprake lijkt te zijn van een tweedeling die mogelijk te maken heeft met het voorkomen van ijzerrijke kwel.

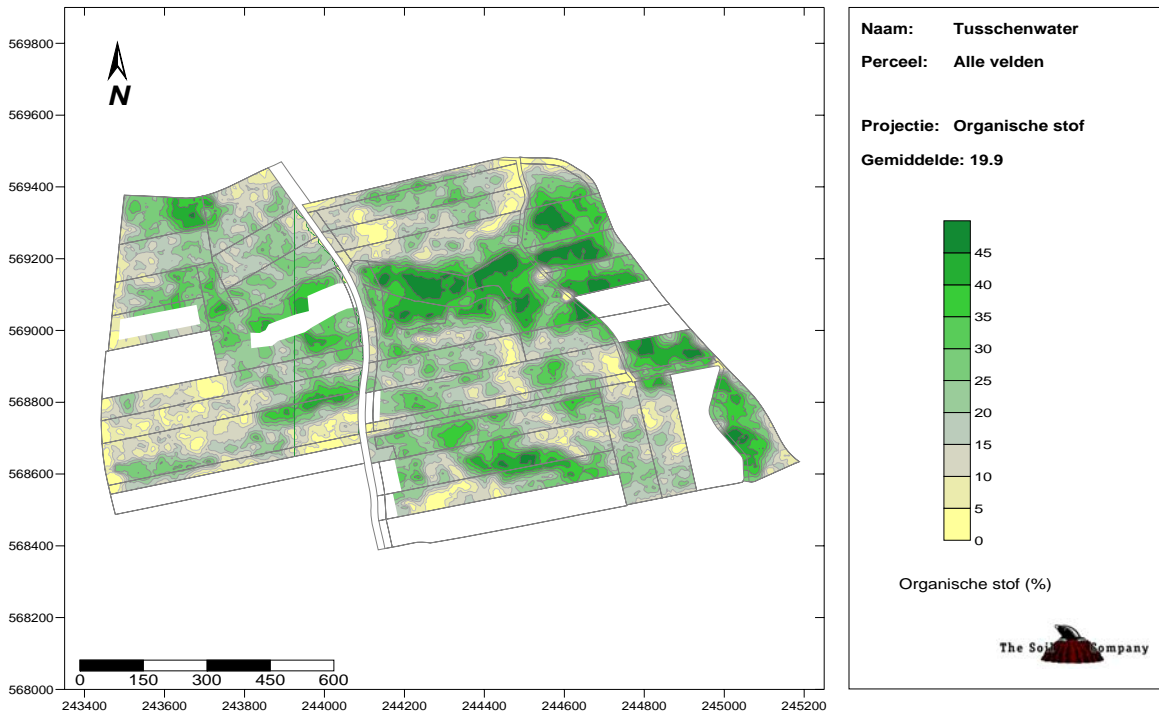


Figuur 5 De relatie tussen ijzer (Fe) en een van de nucliden (^{40}K), waarbij de stratificatie naar organische stof, bodemsoort en hoogte leidt tot een betere correlatie.

3.2.2 Ruimtelijke patronen

Organische stof

Opvallend in het resulterende kaartbeeld van organische stof (Figuur 6) is dat in een groot gedeelte van het gebied de scheiding tussen hoge en lage organische stof waarden precies op de perceelsgrenzen of halverwege een perceel liggen.



Figuur 6 Ruimtelijke patronen van organisch stofklassen (0-30 cm) op basis van scanning met de GM soil meter

Aluminium

Zones met hoge organische stofgehalten (Figuur 7) corresponderen met zones waar hoge gehalten Aluminium voorkomen. In zones waar hoge gehalten Aluminium worden aangetroffen is mogelijke een sterkere bijmenging van slib aanwezig dat (in het verleden?) is afgezet na inundatie vanuit de Hunze.

Ijzer

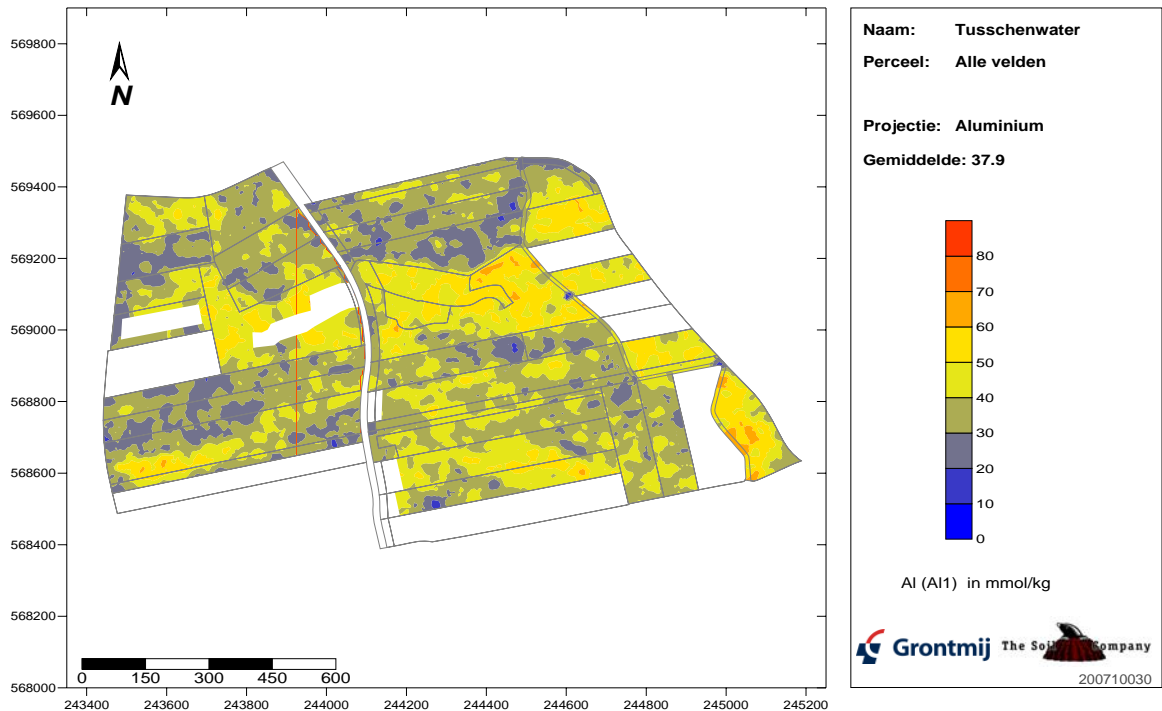
Zones met hoge ijzergehalten corresponderen met zones waar hoge organische stof gehalten voorkomen (Figuur 8). Dit hangt mogelijk samen met de binding van ijzer door organische stof (ijzerchelaten)

Fosfor

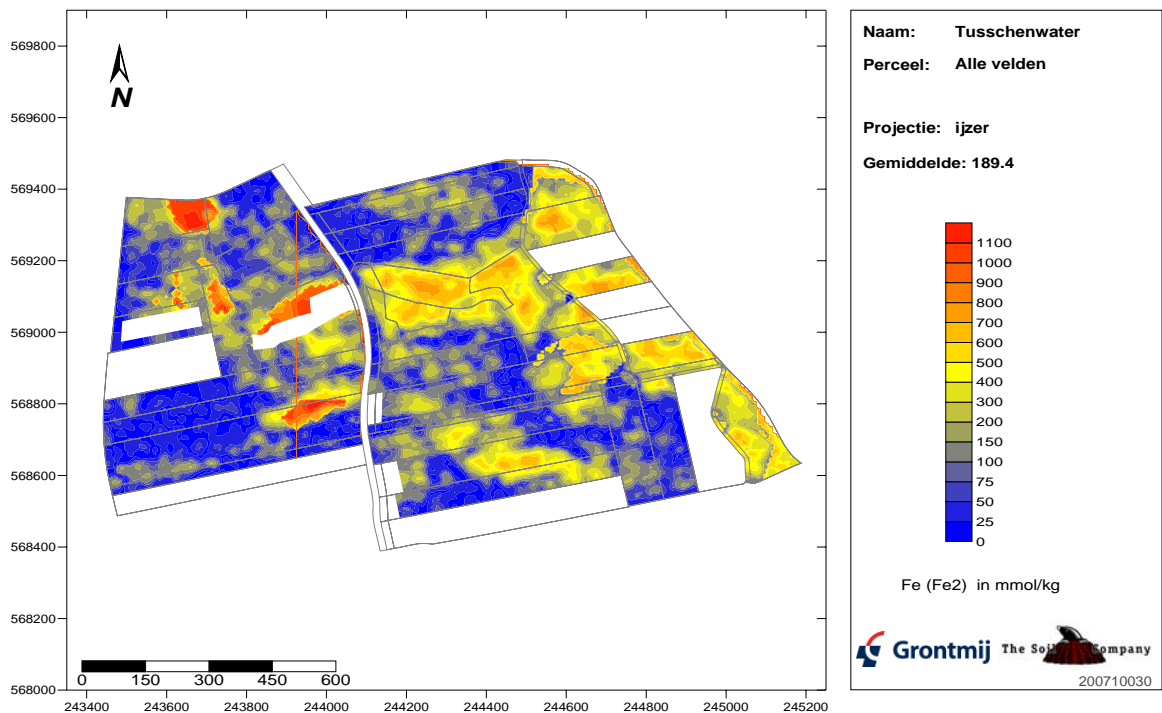
Hoge fosforgehalten (Figuur 9) komen vooral voor op plaatsen met veel ijzer, maar deze correspondentie is niet eenduidig aanwezig.

De fosfaatverzadigingsindex (PSI)

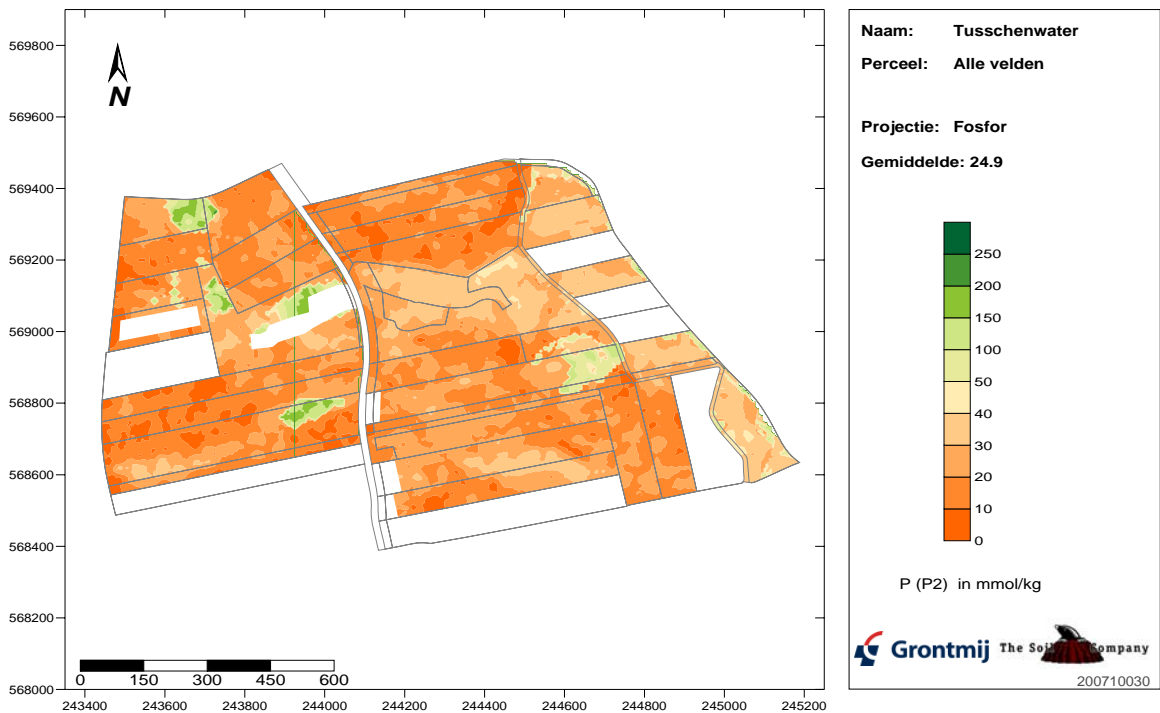
Op basis van de kaarten van Al, Fe en P is de PSI kaart berekend (Figuur 10) volgens de formule in paragraaf 2.2. Op de PSI kaart komen de patronen uit de organische stof kaart terug, maar omdat Fe en P beide zijn gestratificeerd zijn deze stratificatiepatronen niet terug te zien op de PSI-kaart.



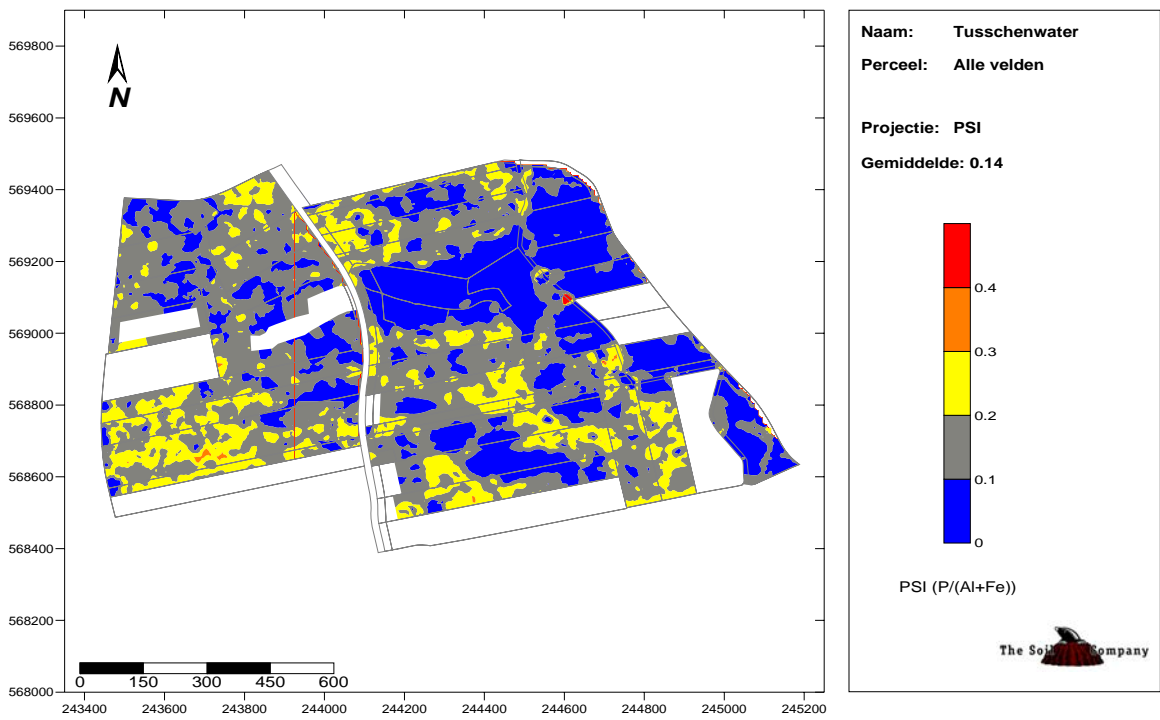
Figuur 7 Ruimtelijke patronen van Aluminiumgehalten van de bodem (0-30 cm) op basis van scanning met de GM soil meter



Figuur 8 Ruimtelijke patronen van IJzergehalten van de bodem (0-30 cm) op basis van scanning met de GM soil meter



Figuur 9 Ruimtelijke patronen van Fosfaatgehalten van de bodem (0-30 cm) op basis van scanning met de GM soil meter



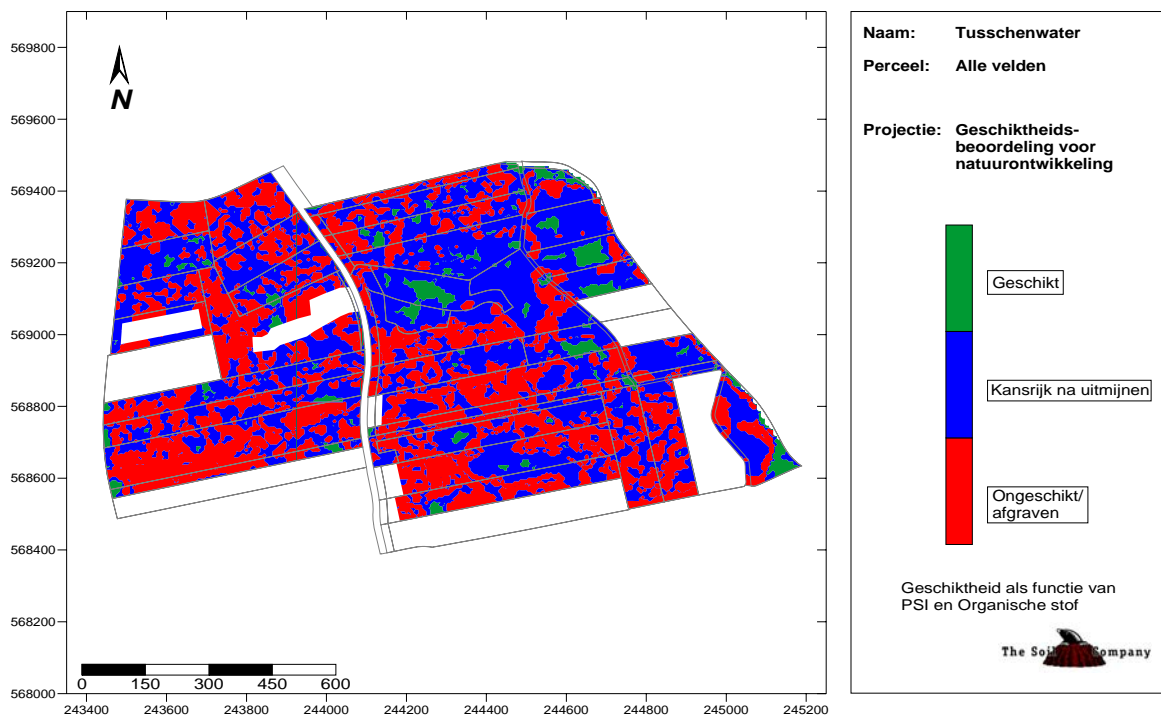
Figuur 10 Ruimtelijke patronen van de fosfaatverzadigingsindex van de bodem (0-30 cm) op basis van berekening uit P, Fe en Al gehalten die met de GM soil meter werden gemeten.

3.2.3 Wel of niet afgraven

Geschiktheid voor natuurontwikkeling

Met de basiskaarten van organische-stofgehalten en de fosfaatverzadigingsindex is beoordeeld welke gebiedsdelen geschikt zijn voor de ontwikkeling van schrale natuur en waar aanvullende maatregelen nodig zijn.

Uit de beeldanalyse blijkt dat ca. 43 % van het hele areaal alleen geschikt te maken is voor de ontwikkeling van schrale natuur als de bovengrond wordt afgegraven. Op grofweg een even groot areaal zou de ontwikkeling van schrale natuur mogelijk zijn na een aantal jaren uitmijnen. Slechts op 4 % van het areaal is de fosfaatbeschikbaarheid zo laag dat geen extra inrichtingsmaatregelen nodig zijn voor de ontwikkeling van schrale natuur.



Figuur 11 Geschiktheid van gronden voor de ontwikkeling van natuur

3.3 Discussie

- Met de methode waarbij de GM Soil Meter wordt ingezet is het mogelijk een inrichtingsadvies voor natuurontwikkeling te geven op basis van patrooninformatie over de fosfaattoestand met een zeer hoge resolutie. Het advies bestaat echter uit een zeer fijnkorrelig kaartpatroon met plekken waar wel of niet zou moeten worden afgegraven. Dit maakt uitvoering van maatregelen in de praktijk lastig, tenzij methoden kunnen worden ingezet die bij precisielandbouw worden gehanteerd, waarbij apparatuur wordt aangestuurd door GPS. Een alternatief is om de kaarten naar perceelsniveau op te schalen, wat een extra vertaalslag betekent.

- Gezien de **fragmentatie** van de geschiktheid voor het gekozen natuurdoeltype kan ook gekozen worden voor het ontwikkelen van niet één maar meerdere natuurdoeltypen naast elkaar, wat mogelijk tot een zeer gevarieerd landschap kan leiden: meer en minder voedselarme natuur.
- De **betrouwbaarheid** van de ruimtelijke informatie zal nader onderzocht moeten worden. De ruimtelijke patronen zijn gebaseerd op regressievergelijkingen tussen bodemparameters en nucliden waarbij de verklaarde variantie van de responsvariabelen (Fe en P-gehalten) varieerde tussen 54 en 91%. De betrouwbaarheid van de samengestelde parameter PSI is waarschijnlijk geringer dan die van de samenstellende parameters. Om de betrouwbaarheid van de kaarten te vergroten zou het interessant zijn de patroonanalyse uit te breiden door Universal Kriging toe te passen op de residuen van de voorspelde waarden op de waarnemingspunten die voor de kalibratieprocedure zijn gebruikt. Ook kan gedacht worden aan het gebruiken van extra informatie, bijvoorbeeld over het voorkomen van (ijzerrijke) kwel of historisch landgebruik, ter verbetering van de stratificatie.
- Een **validatie** van de kaartbeelden via een onafhankelijke steekproef is nog niet uitgevoerd.
- Het zou interessant zijn de met de innovatieve methode verkregen kaartbeelden te vergelijken met kaartbeelden die bijvoorbeeld via klassieke geostatistische methoden of interpolatietechnieken zijn verkregen.
- De relatie van de gemeten en in kaart gebrachte elementen P, Fe en Al met organische stof doet vermoeden dat deze relatie met meer bodemeigenschappen bestaat. Gekeken zou kunnen worden of de aanwezigheid en beschikbaarheid van **andere voedingsstoffen** zoals K en N ook een dergelijke ruimtelijke patronen laat zien en of deze van invloed zijn op de ontwikkeling van de beoogde natuurdoeltypen.

Literatuur

Bakker, H. de & J. Schelling, 1989. Systeem van bodemclassificatie voor Nederland; de hogere niveaus. Wageningen. Pudoc.

Brus, D.J.; Riele, W.J.M. te, 2001. Design-based regression estimators for spatial means of soil properties: the use of the two-phase sampling when the means of the auxiliary variables are unknown. *Geoderma* 104 (2001), 3/4: 257-279

Brus, D.J.; Heuvelink, G.B.M., 2007. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma* 138 (1-2). - p. 86 - 95.

Chardon Wim, Francisca Sival, Rolf Kemmers, Bas van Delft. & Gerwin Koopmans, 2008. Is het mogelijk met uitmijnen in plaats van ontgronden voldoende fosfaat kwijt te raken? *De Levende Natuur* (in prep).

Delft, S.P.J. van, en P.C. Jansen. 2004. Randvoorwaarden natuurontwikkeling Onderlaatste Laak; Bodemkundige en hydrologische kansen en beperkingen voor de realisatie van natuurdoelen. *Alterra rapport 799*. Alterra, Wageningen

Delft, S.P.J. van, G.H. Stoffelsen, F. Brouwer, 2007. Natuurpotentie van Zwartebroek en Allemanskamp; ecopedologisch onderzoek naar de mogelijkheden voor natuurontwikkeling. Wageningen. Alterra. *Alterra-rapport 1550*.

Delft, S. P. J. van, F. Brouwer en R. H. Kemmers, 2008. Natuurpotentie Schraallanden Wielrevelt; Ecopedologisch onderzoek naar de mogelijkheden voor natuurontwikkeling. Wageningen, Alterra. *Alterra-rapport: 1658*

Egmond, F.M. van, E.H. Loonstra, J. Limburg, geaccepteerd. Gamma-ray sensor for topsoil mapping; the Mole. In: In: Viscarra-Rossel et al., *Proximal Soil Sensing for High Resolution Soil Mapping* (in prep).

Hendriks, P.H.G.M., J. Limburg en R.J. de Meijer, 2001. Full-spectrum analysis of natural γ -ray spectra. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53: 365-380.

Hommel, P.W.F.M., E. Brouwer, E.C.H.E.T. Lucassen, A.J.P. Smolders en R.W. de Waal, 2006. Selectie van ecologisch relevante bodemeigenschappen - een verkennend onderzoek aan de hand van 92 SBB-referentiepunten. Wageningen, Alterra. *Alterra-rapport: 1445*

Kemmers, R.H. en J. Nelemans, 2007. Vergroting van de fosfaatadsorptiecapaciteit en afname van de chemische beschikbaarheid van fosfaat in gronden door wisselvochtigheid; Resultaten van desorptie- en adsorptie-experimenten met zand-, klei- en veengrond. Wageningen, Alterra, *Alterra-Rapport 1546*.

Kemmers, R.H. & S.P.J. van Delft, 2007. Stikstof-, fosfor- en kaliumbeschikbaarheid en kritische depositiewaarden voor stikstof in korte vegetaties. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1598.

Koopmans, G.F., 2004. Characterization, desorption, and mining of phosphorus in noncalcareous sandy soils. Wageningen. Wageningen University. PhD-thesis

Payne R W and Ainsley AE 2000 GenStat release 4.2 reference manual. Part1. VSN International Ltd. Oxford, UK.

Plan van Aanpak, 2005. Nutrientenonderzoek Water4All; proefproject duurzaam integraal waterbeheer benedenloop Hunze. Interne notitie Royal Haskoning/ Provincie Drente.

Schwertmann, U., 1964. Differenzierung der Eisenoxide dese Bodens durch Extraction mit Ammoniumoxalaat-Lösung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 105: 194-202

Wit, J. de, R. Muntjewerff, M. Osinga, E. Loonstra, 2007. Innovatie in toepassing bodeminformatie. Bodem 17, nr. 4: 165-168.

Zee, S.E.A.T.M van der & W.H. van Riemsdijk 1986. Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soil. Geoderma 38: 293-309.

Bijlage 1 Analyseresultaten bodemmonsters

Lab code	P-PO4 [mg/kg P]	Al [mg/kg]	Fe [mg/kg]	P [mg/kg]	organische stof [%]	Lab code	P-PO4 [mg/kg P]	Al [mg/kg]	Fe [mg/kg]	P [mg/kg]	organische stof [%]
1	0.1	855	3969	224	6.33	28	3.4	797	4788	681	10.5
2	4.5	1002	2010	293	9.01	29	0.3	1384	20622	697	32.8
3	0.3	794	9290	685	10.3	30	2	1316	9121	581	41.2
4	2.8	1335	7866	676	36.6	31	0.3	512	42985	2305	13.4
5	4	919	2409	312	12.7	32	0.7	1674	18695	1296	39
6	10.6	1365	6768	439	66.7	33	0.4	1722	27126	896	43.9
7	2.5	837	2728	398	8.75	34	5	583	750	264	3.52
8	0.7	1103	4307	369	10.4	35	1.3	989	11618	717	30.7
9	0.8	520	33728	2201	16.5	36	0.4	1487	9471	562	22
10	0.4	1638	49125	2145	50.3	37	5.2	700	1513	433	4.68
11	2.6	1246	4204	496	8.29	38	0.5	2212	13594	702	25
12	0.4	448	1772	147	4.37	39	2	1513	781	428	3.87
13	0.6	1422	68206	5412	40.8	40	1.1	1036	63351	7150	31.8
14	0.7	1599	34277	1718	65.4	41	0.2	865	29442	1312	13.1
15	0.3	1789	26107	938	50.9	42	1	597	34611	2166	16
16	0.3	1193	3866	314	4.85	43	0.4	892	33647	1625	18
17	0.5	1290	19446	932	39.2	44	0.9	276	3781	328	4.45
18	0.4	956	5781	579	6.33	45	3.8	1201	12039	740	50.5
19	1.1	1454	20023	1081	44.2	46	3.4	1120	2438	479	6.83
20	1.4	357	1635	316	2.4	47	0.3	1218	41216	1445	54.9
21	0.4	1027	11562	794	19.9	48	0.3	1676	28060	1561	32.9
22	0.1	830	46649	1824	16	49	0.6	804	6499	418	12.8
23	0.2	1835	60089	4370	40.2	50	2.7	989	3506	527	13.7
24	0.1	897	15256	299	25.4	51	0.6	1477	18367	865	38.5
25	4.2	612	1486	404	3.5	52	0.4	1168	64241	3802	40.8
26	1.1	905	1733	332	6.01	53	0.8	902	23051	847	71.1
27	0.4	919	7286	404	12.3						