

Klei voor behoud van veen

Verkenning mogelijkheden van koolstofvastlegging en preventie bodemdaling met klei uit de kringloop

Maaïke van Agtmaal, Joachim Deru, Frank Lenssinck



Onderzoek gefinancierd door
LTO Noord Projecten en Provincie Utrecht



provincie :: Utrecht

© 2019 Louis Bolk Instituut

Klei voor behoud van veen - verkenning mogelijkheden van
koolstofvastlegging en preventie bodemdaling met klei uit de
kringloop

Maike van Agtmaal¹, Joachim G.C. Deru¹, Frank Lenssinck²

¹ Louis Bolk instituut ² Veenweiden Innovatiecentrum

Publicatienummer 2019-010 LbD

29 pagina's

Deze publicatie is beschikbaar via

www.louisbolk.nl/publicaties

www.louisbolk.nl

info@louisbolk.nl

T 0343 523 860

Kosterijland 3-5

3981 AJ Bunnik

@LouisBolk

Louis Bolk Instituut: Onderzoek en advies ter bevordering van
duurzame landbouw, voeding en gezondheid

Voorwoord

Bodemdaling in het veenweidegebied is niet alleen een lokaal maatschappelijk probleem door de fysische gevolgen van dalende bodems, maar ook een nationale en in feite ook een globale issue door de CO₂ emissie van afbrekende organische stof. De bodem daalt omdat we sinds de middeleeuwen veengebieden steeds effectiever zijn gaan draineren ten behoeve van landbouw en wonen. Inmiddels is het voor zo'n drukbevolkt en sterk agrarisch gebied als het Groene Hart niet eenvoudig om oplossingen te vinden met beperkte maatschappelijke gevolgen.

Tot nu toe is grondwaterbeheer gezien als de oplossing voor bodemdaling in het veenweidegebied. In extreme vorm helemaal vernatten, met ook lokaal extreme maatschappelijke gevolgen, en in mildere vorm slootpeilfixatie of –verhoging, al dan niet met onderwaterdrainage. Met “klei in veen” ontstaat mogelijk een nieuw perspectief dat niet direct aan grondwaterbeheer is gekoppeld, en daarmee de combinatie van melkveehouderij en reductie van CO₂ emissie op veengrond mogelijk maakt. “Klei in veen” kan mogelijk ook met andere maatregelen worden gecombineerd.

Met het idee van “klei in veen” wordt uitdrukkelijk niet gewerkt aan een afsluitende kleideklaag. Nadeel van een kleidek is dat de veel grotere hoeveelheid klei – als deze beschikbaar is – tot ongewenste belasting van de infrastructuur kan leiden bij het aanvoeren. Uitdaging is om met relatief kleine hoeveelheden klei (lutum) die jaarlijks opgebracht worden de top-laag en later ook de onderlagen met lutumdeeltjes te verrijken. Hierbij moet de klei inspoeien, dus zonder de veengrond te hoeven bewerken.

In voorliggend rapport is onderzoek beschreven dat gefinancierd is door LTO-Noord Fondsen en de Provincie Utrecht. Dit onderzoek was uitdrukkelijk verkennend van aard, en dient als voorbereiding voor vervolgonderzoek op dit onderwerp. Daarom kunnen nog geen harde conclusies worden getrokken en zijn de conclusies en aanbevelingen vooral methodisch van aard.

De uitvoering van het onderzoek was niet mogelijk zonder de medewerking van een aantal mensen. Hiervoor willen we Mariet Heffing, Joost Keuskamp en Peter Veenhuizen van Universiteit Utrecht, Gerard Ros van NMI / Waterschap Amstel Gooi en Vecht, Ruud van Uffelen en Jan Willem Berendsen van Royal HaskoningDHV, Pieter van Grieken van Sibelco, Nick van Eekeren, Riekje Bruinenberg en Brechtje de Haas van het Louis Bolk Instituut, Kees de Hartog van Loonbedrijf den Hartog B.V. en Erik Jansen, Karel van Houwelingen en Anna Koornneef van het Veenweide Innovatie Centrum (VIC) bedanken.

De auteurs, maart 2019

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
2 Labstudie	15
2.1 Analyse van verschillende kleisoorten	15
2.2 Pilotproef kleiinspoeling	18
2.3 Pilotproef CO ₂ -emissie klei in veen	19
3 Conclusies en perspectief	25
4 Literatuur	27
Bijlage	29
Bijlage 1 fysische-chemische analyse Wamel	29

Samenvatting

Reduceren van de bodemdaling en de CO₂ emissie uit de bodem zijn een grote uitdaging in het veenweidegebied. De toepassing van 'klei in veen' biedt hierin een nieuw perspectief. Voorliggende studie is een eerste start tot het opbouwen van een kennisbasis voor de werking van klei-inspoeling op veenafbraak.

Deskstudie

Binnen de deskstudie zijn er verschillende randvoorwaarden van de kleitoepassing onderzocht. Er is een overzicht gemaakt van de wetenschappelijke kennis over de interacties tussen kleideeltjes en organische stof. Dit kan op verschillende manieren plaatsvinden en kan zowel chemisch of fysisch zijn. Verder is er een overzicht gemaakt van de verschillende kleibronnen en waar mogelijk zijn er gegevens over de afkomst en chemische samenstelling van de klei verzameld. Vanuit de publieke en private instanties die klei (kunnen) aanbieden is een grote drive om klei en slib dat vrijkomt een hoogwaardige toepassing te geven. Daarnaast is er gekeken naar de risico's van verontreiniging van klei met zware metalen in het geval van toepassing op veengrond. Metalen in de klei kunnen een impact hebben op de diversiteit en activiteit van het bodemleven. Of dit ook een risico vormt in de toepassing in veen is een aandachtspunt voor vervolgonderzoek.

Kleianalyses

Van zes kleisoorten van verschillende bronnen werd een uitgebreide chemische, fysische en mineralogische analyse gedaan. Deze eigenschappen kunnen mogelijk bijdragen aan de vorming van klei-humus complexen en/of aan de reductie van veenafbraak. Voorbeelden hiervan zijn de mineralogische samenstelling die van belang is voor de bindingscapaciteit, de pH, het organische stofgehalte van de klei zelf en het aandeel lutum. Daarnaast is ook de concentratie zware metalen gemeten in de zes kleisoorten. Vijf daarvan vielen binnen de achtergrondwaarden, een zesde kleisoort had hogere waarden in een aantal zware metalen.

Labstudies

In samenwerking met Universiteit Utrecht zijn respiratiemetingen uitgevoerd aan veenkolommen met toegevoegde klei. De ontwikkelde methode bleek geschikt en betrouwbaar te zijn. Bij de eerste metingen waren er effecten van klei concentratie en kleisoort meetbaar. Echter binnen de looptijd van dit onderzoek konden er nog geen harde conclusies getrokken worden over de reducerende werking van klei op veenafbraak, daar is een langere periode van monitoring voor nodig die in vervolgonderzoek zal worden uitgevoerd.

In een ander experiment is de inspoeling van kleideeltjes als 'proof of principle' in zandkolommen onderzocht. De inspoeling was afhankelijk van waterhoeveelheid en kleiconcentratie maar in alle gevallen spoelden er kleideeltjes in tot 40 cm diepte.

Conclusies

Op basis van de resultaten van de desk studie en de klei-analyses is er voldoende reden om door te gaan met het verkennen van inspoeling van kleideeltjes. Er is een eerste stap gezet naar het ontwikkelen van een kennisbasis voor de toepassing 'klei in veen'. Daarnaast is er een methode ontwikkeld die deze toepassing gedurende langere tijd kan meten.

1 Inleiding

Klei komt jaarlijks in grote hoeveelheden beschikbaar, bijvoorbeeld bij afgravingen of als sediment bij baggerwerkzaamheden. Deze klei kan mogelijk een belangrijke rol spelen in het veenweidegebied, waar afbraak van de organische stof in de bodemlaag boven het grondwater leidt tot CO₂ emissie, bodemdaling en hoge maatschappelijke kosten (Schot-horst, 1977; Van den Akker et al., 2008; Van den Born et al., 2016). Over het algemeen hebben bodems met hoge kleigehalten een lagere afbraak van organische stof. Dit gebeurt door chemische binding van organische stof in het klei-humus complex dan wel fysieke bescherming in aggregaten. Deze processen zorgen ervoor dat aanwezige koolstof in de bodem minder snel wordt afgebroken (Hassink et al., 1993). Organische stof in de bodem is niet evenredig verdeeld over de bodemdeeltjes: organisch koolstof accumuleert rond aanwezige organomineraalcomplexen (Vogel et al., 2014). Stabilisatie van organisch koolstof rond aluminium en ijzeroxides is daarom een bekend fenomeen (Mikutta and Kaiser, 2011; Rumpel et al., 2015). Het ijzergehalte (en in welke mate het beschikbaar is) beïnvloedt de enzymactiviteit in de bodem (Turner et al., 2014), de vorming van koolstof-ijzercomplexen (Giafreda et al., 1995), en daarmee ook de afbraak van organische koolstof.

Vrijkomende klei uit afgravingen en rivierbeddingen die niet benut wordt in de landbouwkringloop is een gemiste kans voor veengebieden met bodemdaling. De verwachting is dat deze klei een bijdrage kan leveren aan:

- Beperking van bodemdaling
- Het verminderen van de CO₂-emissie uit veenbodems als gevolg van de afbraak van veen)
- Verbetering van de landbouwkundige bodemkwaliteit

Eerder onderzoek (Deru et al., 2018) laat zien dat in het veenweidegebied, graslanden met een hoger kleigehalte een lagere afbraak van organische stof hebben. In dit onderzoek kunnen ook andere factoren een rol hebben gespeeld, zoals vochtgehalte, hoeveelheid substraat voor deze afbraak, etc., maar de gevonden relatie wordt door ander onderzoek ondersteund. In een recente studie van Wageningen Universiteit is gebleken dat kleideeltjes niet alleen in de bovengrond maar ook op grotere diepte een belangrijke rol kunnen spelen in het vastleggen van koolstof in de bodem (Torres-Sallan et al., 2017).

Toepassing in veenweiden

Bovenstaande observaties zijn aanleiding voor onderzoek naar het actief opbrengen van kleideeltjes op veengrond in het veenweidegebied. Zo wordt een bijdrage voorgestaan aan een verminderde afbraak van veen en het voorkomen van verdere bodemdaling. Met deze verminderde afbraak ontstaat een reductie van CO₂ emissie naar de lucht (klimaatmitigatie). Maar liefst 2,5% van de totale Nederlandse broeikasgasemissie is afkomstig van

veenaafbraak (Van den Akker et al., 2008); vermindering van die afbraak en heeft dus substantieel effect op nationaal niveau. Bovendien kan het binden van organische stof met kleideeltjes samen met een verminderde afbraak van deze organische stof, eveneens helpen om de mineralisatie van stikstof te beperken. Dit doet de verliezen naar lucht (ammoniak, lachgas) en uitspoeling van mineralen (als fosfor en nitraat) verminderen.

De vraag die zich nu voordoet is of veenaafbraak actief geremd kan worden op perceelsniveau met het toevoegen van klei en daarmee het verhogen van de kleigehalte in de bodem. Het hier gepresenteerde onderzoek gaat in de op haalbaarheid van dit concept, presenteert labanalyses van verschillende kleisoorten en bevindingen van een pilotexperiment veenaafbraak bij kleitoevoeging. Het doel van dit onderzoek was een eerste verkenning ter voorbereiding van vervolgonderzoek.

1.1 Bindingsmechanismen klei en veen

Klei is een verzamelnaam van kleine deeltjes ($< 2\mu\text{m}$, ook lutum genoemd) in de grond. Klei is gemaakt van kleine plaatjes die gemakkelijk verbindingen aangaan met andere kleideeltjes en daarmee een kleimatrix vormen. De vorm en samenstelling van de kleimineralen in de bodem zorgt ervoor dat het een grote oppervlakte heeft (in verhouding tot de massa), makkelijk ionen uitwisselt, gemakkelijk andere moleculen in de kleimatrix opneemt, water vasthoudt en afhankelijk van het soort klei, meestal negatief geladen is (Sposito 1999). Deze structuur en eigenschappen maakt dat klei veel verbindingen aangaat met organische stofdeeltjes in de bodem. Deze interactie van anorganische moleculen (klei) met organische moleculen in de bodem kan op verschillende manieren plaatsvinden :

1. Insluiting in kleideeltjes
2. Metaalcomplexen
3. Binding met kationen (brugvorming)
4. Humus tussen kleilagen
5. Humus-silicaat interactie (adsorptie)

Deze vijf manieren worden hieronder samengevat:

1. Insluiting in kleideeltjes

Klei bestaat uit minerale plaatjes (aluminosilicaten) die door interactie met elkaar een matrix vormen zodat een soort matje van kleideeltjes ontstaat. Deze matjes (kleilaagjes) kunnen vervolgens ook weer interacties met elkaar aangaan. Verschillende types kleimineralen verschillen in 'reactie' oppervlakte en lading (Rasmussen et al., 2006). Dit zorgt ervoor dat ze verschillend reageren in interactie met organische stof. Als er organischestof-verbindingen in deze kleimatrix ingesloten worden beschermt de kleimatrix de organische verbindingen tegen afbraak door de bodemmicroben (bacteriën en schimmels).

Bescherming tegen afbraak kan op verschillende manieren plaatsvinden: fysische bescherming en chemische bescherming (van Veen et al., 1990, Cotrufo et al., 2013). Fysische bescherming is vooral door bodemstructuur. Doordat kleideeltjes zo fijn zijn, is ook de verhouding van poriegrootte anders dan in bijvoorbeeld zandgrond. De poriegrootte en verdeling bepalen de hoeveelheid geschikte microhabitats waarin de microben leven (Sollins et al., 1996) doordat ze de water- en zuurstofbeschikbaarheid mede bepalen. Bacteriën kunnen bijvoorbeeld alleen leven in poriën die minstens driemaal groter zijn als zichzelf (Kilbertus et al., 1980). In de kleinste poriën in de klei kunnen alleen bacteriën binnendringen, in grotere poriën ook grotere organismen. Aangezien schimmels voornamelijk verantwoordelijk zijn voor de afbraak van de meer complexe organische verbindingen (Baldrian et al., 2008) in de bodem zorgt de fijne structuur van klei voor minder directe toegang tot organische stof. De 'actieve' uiteinden van de organische stof die enzymen zouden kunnen knippen (bijv. door hydrolyse) worden afgeschermd en daarmee behouden voor afbraak door microben. Daarnaast kunnen de complexe biopolymeren waaruit organische stof bestaat alleen worden gereduceerd tot afbreekbare monomeren met hulp van een mix van enzymen, geproduceerd door een diverse gemeenschap van micro-organismen. Hierdoor kan poriegrootte een selectieve werking hebben op de hoeveelheid en diversiteit van de microben die erin leven. Organische moleculen die ingesloten zitten in de kleimatrix worden daarmee als het ware afgeschermd van enzymactiviteit. Daarnaast zorgt de kleistruktuur ook voor andere water- en zuurstofstroom, en daarmee voor andere afbraak omstandigheden bijvoorbeeld een andere verdeling van poriën in de bodem die geheel of gedeeltelijk gevuld zijn met water.

2. Metaalcomplexen: opgeloste organische stof gaat uit oplossing

De bodem bevat veel metaaloxiden en metaalhydroxiden. Deze moleculen kunnen reageren met zowel basen als met zuurgroepen. Wanneer er polaire binding ontstaat met humuszuren of andere organische zuren ontstaat er een zoutverbinding die neerslaat. Deze metaal-organischestof-verbinding maakt een organo-metaal complex dat uit oplossing gaat (Brown et al., 2001). Omdat afbraak met enzymen voornamelijk plaatsvindt in oplossing vormt het metaalcomplex een chemische bescherming tegen afbraak door microben.

3. Kationbruggen

Zowel kleimineralen als humuszuren zijn colloïde deeltjes, deeltjes die in suspensie gaan maar niet oplossen. Deze eigenschap zorgt ervoor dat ze gemakkelijk neerslaan of adsorberen. Positieve ionen binden met negatief geladen deeltjes zoals organischestof-moleculen. Door de negatieve lading van kleikristallen en van organische stof verbinden deze stoffen zich niet zo maar aan elkaar, maar voornamelijk via kationbruggen. In bijna alle kleisoorten ontstaat het merendeel van de klei humus complexen door kationbruggen. De sterkte van de binding is afhankelijk van de kleisoort en de lading van het kation. In veen zijn Al^{3+} en Fe^{3+} de belangrijkste kationen, vanwege de lage pH van veengrond. De kationbrug-verbindingen kunnen zeer sterk zijn en daarmee de gebonden organische stof beschermen tegen afbraak.

4. Humus in klei(tussen)lagen

Naast insluiting in de kleimatrix kan er ook door kleiafzettingen een laagsgewijze afzetting ontstaan waarin een laag organische stof ingesloten is in een kleilaag. Door deze insluiting is de organische stof afgeschermd en profiteert het van de watervasthouding en andere kleieigenschappen die bijdragen aan een verminderde afbraak.

5. Humus-silicaat interactie (adsorptie) en aggregaatforming

De polariteit van (vaak lange en complexe) organischestof-moleculen zorgt ervoor dat deze gemakkelijk kan binden aan bijvoorbeeld ionen. Als de organische stof verbindingen maakt met andere organische stofdeeltjes, of met mineralen zoals klei, worden er aggregaten gevormd die minder toegankelijk zijn voor de werking van enzymen. Deze kleine aggregaten (microaggregaten) zijn zeer stabiel (Chenu et al., 2006). De kleine aggregaten kunnen ook weer gebonden worden door organische componenten of door kationbruggen zodat er grotere aggregaten ontstaan (Six et al., 2000, Six et al., 2004). Dit laatste gebeurt vaak door biologische processen. Bijvoorbeeld wortelharen of schimmeldraden kunnen verschillende kleine aggregaten bijeenbinden tot grotere structuren (Oades et al., 1993), en ook wortellexudaten en biofilms kunnen door de viscositeit een lijm vormen voor microaggregaten, die daardoor grotere aggregaten vormen (Six et al., 2004)

1.2 Verkenning en beschrijving van de potentiële bronnen voor klei en slib, en van hun fysisch-chemische kenmerken

In samenwerking met Royal Haskoning DHV zijn contacten gelegd met relevante bedrijven en instanties voor verkenning van mogelijkheden en beschikbaarheid van verschillende kleisoorten (zie Tabel 1). In het vervolgtraject is van zes locaties klei beschikbaar gekomen voor verder onderzoek (zie Tabel 2).

Tabel 1. Eerste verkenning mogelijke kleibronnen

Datum: 2 mei 2018
Ruud van Uffelen

Lijst van projecten van herkomst geschikt om te beproeven in laboratorium zoals verzocht LBI 30 april

Omschrijving	Instantie	Plaats	Grondsoort	Hoeveelheid, richting	Chemische kwaliteit	Planning
Specie uit Amsterdam Rijnkanaal	RWS SSRS	Utrecht	Kleibagger	1 M	?	2019?
Specie uit de Blanckenburghtunnel	WeBe, Ballast Nedam, Prov ZH	Schiedam	Tunnelspecie	500.000	AW	2019?
Overnachtingshaven Spijk	RWS	Spijk	Bovengrond	5000	AW	2019?
Uterwaarden Wamel Dreumel Heerewaarden	Valei en Veluwe	Wamel	Kleilige bovengrond	500000	?	2019
Waterberging Geldermalsen	JdB grond	Geldermalsen	Kleibovengrond met te veel OS voor dijkenklei	5000	AW	2018
Natuurontwikkeling Tricht	Provincie Gelderland	Tricht	Kleilige bovengrond	50000	AW	2018

Tabel 2. Kleibronnen en achtergrondgegevens

Herkomst klei	Betrokken instantie	Typering	Chemische analyse
Deest/Afferden	Boskalis	recent afgezet rivierslib	niet aanwezig
Breukelen/ Over Holland	Utrechts landschap	veenbagger	achtergrondwaarde (AW)
Wamel	Kragten/Vallei en Veluwe	recent afgezet rivierslib	type B
Culemborg	nvt	recent afgezet rivierslib 50cm diep	niet aanwezig
Culemborg	nvt	kleilaag 100 cm diep	niet aanwezig
Culemborg	nvt	kleilaag 180 cm diep	niet aanwezig

Beschikbaarheid en logistiek

In een aanpalend project (Veenverrijking met klei – logistiek Krimpenerwaard binnen de proeftuin Krimpenerwaard, looptijd 2018-2019) wordt er specifiek gekeken naar de beschikbaarheid, logistiek en transportmogelijkheden van de klei in veen toepassingen.

1.3 Verkenning naar kleiverontreinigingen met zware metalen in de beschikbare kleisoorten

Het goed functioneren van de bodem is essentieel voor ecosysteemdiensten. Voorbeelden hiervan zijn de nutriëntencyclus, de habitat voor flora en fauna, de productie van biomassa en gewassen, en het filteren en bufferen van water. Zware metalen breken niet af in de grond en kunnen daarom accumuleren in de bodem. Bij een hoger lutum of organische stof gehalte zullen zware metalen gebonden worden. Als de concentratie hoger is dan de bindingscapaciteit van de bodem is er een risico dat de zware metalen terecht komen in het (grond)water.

Deels zijn metalen nodig voor de groei van bijvoorbeeld planten, echter een te hoge concentratie van metalen is giftig voor de plant of verderop in de voedselketen. Over het algemeen geeft de aanwezigheid van (een hoge concentratie) zware metalen een stressreactie. Dit gebeurt bijvoorbeeld in planten (Ghori et al 2019), maar ook in het bodemleven zoals in nematoden (Korthals et al., 1996) en in het microbiële bodemleven (Abdu et al, 2017). Afhankelijk van de mate van verontreiniging en de gevoeligheid van de organismen voor de toxische metalen kan deze stressreactie mild of zeer sterk zijn. In Tabel 3 staat een overzicht van de verschillende responsen.

Tabel 3. Overzicht mogelijke effecten hoge concentratie zware metalen

Risico voor:	Lichte vervuiling	Sterke vervuiling
Milieu	Accumulatie in de bodem	Vervuiling grondwater
Bodemlevenactiviteit	Activiteit neemt plaatselijk toe of af	Activiteit bodemleven neemt sterk af
Diversiteit bodemleven	Verschuiving van soorten en abundantie	Diversiteit bodemleven vermindert sterk
Productie	Mogelijke stressreactie planten	Afname productie

Door jarenlange aanvoer door de (in het verleden som sterk vervuilde) rivieren kan het gehalte zware metalen in de uiterwaarden flink hoger zijn dan in vergelijkbare grond die niet in het stroomgebied van de rivieren ligt (van Driel, Smilde 1990). Zo is het gehalte zware metalen in

het overstromingsgebied van de Maas 3-10 keer hoger dan in een niet verontreinigde klei-grond en is de concentratie in de Rijnwaterwaarden zelfs 4-35 keer hoger.

Om vervuiling tegen te gaan staan in Besluit Bodemkwaliteit normen waaraan het beoogde materiaal moet voldoen. Van een heel scala aan stoffen, onder andere metalen zijn normeringen vastgesteld. Gebaseerd op een risicoschatting staan daarin voor metalen verschillende waarden die per functie verschillen, de achtergrondwaarden en de maximale waarden. De achtergrondwaarden zijn gebaseerd op natuurlijk voorkomen. Kleigrond/kleibagger met waarden die binnen de achtergrondwaarden vallen zijn altijd geschikt voor toepassing. Omdat de binding en adsorptie van zware metalen ook afhankelijk is van grondsoort (onder andere lutum gehalten en organische stof) is er per bodemtype een formule die de waarde van de gegeven grondsoort omrekent naar de standaardgrond die voor de normering is gebruikt.

Tabel 4. Normering volgens Besluit Bodemkwaliteit (Bron: Bijlage B, Tabel 1 Besluit Bodemkwaliteit)

	Achtergrondwaarden	Maximale waarden voor verspreiden van baggerspecie over aangrenzend perceel ²	Maximale waarden bodemfunctieklassen wonen	Maximale waarden bodemfunctieklassen industrie	Maximale waarden grootschalige toepassingen op of in de bodem	
			Maximale waarden kwaliteitsklassen wonen	Maximale waarden kwaliteitsklassen industrie	Maximale emissiewaarden	Emissietoetswaarden
Stof (1)	mg/kg ds	mg/kg ds	mg/kg ds	mg/kg ds	mg/kg L/S 10	mg/kg ds
1. Metalen						
antimoon (Sb)	4,0*		15	22	0,070	9
arseen (As)	20	X	27	76	0,61	42
barium (Ba)						
cadmium (Cd)	0,60	X en 7,5	1,2	4,3	0,051	4,3
chrom (Cr)	55	X	62	180	0,17	180
kobalt (Co)	15		35	190	0,24	130
koper (Cu)	40	X	54	190	1,0	113
kwik (Hg)	0,15	X	0,83	4,8	0,49	4,8
lood (Pb)	50	X	210	530	15	308
molybdeen (Mo)	1,5*		88	190	0,48	105
nikkel (Ni)	35	X	39	100	0,21	100
tin (Sn)	8,5		180	900	0,093	450
vanadium (V)	80		97	250	1,9	146
zink (Zn)	140	X	200	720	2,1	430

Gehalte zware metalen in de gebruikte kleibronnen

Alle kleibronnen die in het kader van die onderzoek nader zijn onderzocht vallen binnen de achtergrondwaarden, met uitzondering van 1 (uiterwaarde gebied bij de Waal in Wamel). De chemische analyse valt binnen de maximale waarden, de kleigrond heeft echter duidelijk hogere gehalten aan zware metalen (zie Bijlage 1).

2 Labstudie

2.1 Analyse van verschillende kleisoorten

Achtergrond

Verschillende klei-eigenschappen kunnen bijdragen aan binding van kleideeltjes aan organische stof. Daarnaast zijn er andere eigenschappen die direct of indirect van invloed kunnen zijn op de vorming van klei-humuscomplexen, veenafbraak of bodemactiviteit. Een voorbeeld hiervan is pH. Dat heeft direct en indirect invloed op bodemprocessen en daarmee op de afbraak van veen. Hoe zuurder het milieu hoe lager de bodemlevenactiviteit en organischestof-afbraak in de bodem. Om een goed beeld te krijgen van de invloed van verschillende klei-eigenschappen is er een uitgebreide fysische, chemische en geologische analyse gedaan van zes kleisoorten die vervolgens de laboratoriumproef getest (zie paragraaf 2.3).

Fysische-chemische analyse

De zes beschikbare kleisoorten zijn geanalyseerd door het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB) in Wageningen. De samenstelling van de klei is geanalyseerd op eigenschappen die vanuit de literatuur naar voren kwamen als potentieel belangrijk in de interactie tussen klei en organische stof. Dit zijn onder meer lutumgehalte, pH, nutriënten, metalen, CEC en organische stof. Daarnaast is er ook een analyse gedaan naar de aanwezigheid van zware metalen om een beeld te krijgen van de risico's op verontreiniging.

Resultaten

Tabel 5. CBLB fysisch-chemische analyse

kleisoort	C- elementair [g/kg]	N- elementair [g/kg]	< 2 µm [%]	C- organisch [g/kg]	pH [bij 20±1°C]	pH [bij 20±1°C]	Fe [mg/kg]
Culemborg 50	15.6	1.74	56.1	19	7.72	6.78	6361
Culemborg 100	14.8	0.69	35.1	6	8.21	7.40	4354
Culemborg 180	40.4	1.07	18.6	20	7.88	7.50	1645
Deetse waarden	24.1	0.66	4.9	20	8.17	7.95	3278
Kleibagger Over							
Holland	58.2	4.81	50.3	63	6.48	5.83	5194
Wamel 50	51.7	1.74	28.3	35	8.02	7.46	5930
Methode	LECO-CHN	LECO-CHN	granulaire samenstel- ling	Kurmies	pH-H ₂ O	pH-KCl	extractie am- moniumoxalaat - oxaalzuur

kleisoort	Ca [cmol(+)/kg]	CEC [cmol(+)/kg]	Mg [cmol(+)/kg]	Ca [cmol(+)/kg]	CEC [cmol(+)/kg]	Mg [cmol(+)/kg]
Culemborg 50	36	38	4	36.4	39	4.1
Culemborg 100	27	25	2	26.9	25	2.0
Culemborg 180	17	16	1	18.6	16	1.3
Deetse waarden	8	7	0	8.1	7	0.4
Kleibagger over						
Holland	34	39	4	34.8	39	4.3
Wamel 50	22	21	1	23.7	22	1.5
Methode	CEC gebufferd	CEC gebufferd	CEC gebufferd	CEC ongebufferd	CEC ongebufferd	CEC ongebufferd

kleisoort	Al [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Fe [mg/kg]	K [mg/kg]	Mg [mg/kg]
Culemborg 50	40378	9467	66.8	39837	6011	9491
Culemborg 100	25559	37809	51.9	41034	3754	10409
Culemborg 180	14561	75545	126	17243	2384	9159
Deetse waarden	6682	25296	250	15282	1532	3325
Kleibagger over Holland	31527	8384	56.5	35328	4212	8068
Wamel 50	19860	60044	188	31902	3577	8240
Methode	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)

kleisoort	Mn [mg/kg]	Mo [mg/kg]	Na [mg/kg]	P [mg/kg]	S [mg/kg]	Zn [mg/kg]
Culemborg 50	828	1.1	172	585	353	102
Culemborg 100	2093	0.8	143	641	170	72
Culemborg 180	383	0.9	132	367	2242	56
Deetse waarden	345	1.2	188	551	467	191
Kleibagger over Holland	398	1.0	211	650	9725	116
Wamel 50	1288	1.0	231	1163	565	1146
Methode	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)

kleisoort	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Co [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	V [mg/kg]	Ni [mg/kg]
Culemborg 50	15.1	0.29	14.9	33	32.7	65.6	52.5
Culemborg 100	12.5	0.25	15.2	20	19.1	43.3	47.1
Culemborg 180	9.28	0.24	9.48	16	12.0	25.8	33.5
Deetse waarden	8.20	0.77	7.26	22	34.6	16.9	25.0
Kleibagger over Holland	13.0	0.51	16.5	28	30.7	55.3	54.4
Wamel 50	64.4	4.80	17.3	115	339	39.8	42.9
Methode	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)	destructie HNO3-HCL (aqua regia)

Geologische/mineralogische analyse

De soort klei, waaronder welke kleimineralen aanwezig zijn die de typische plaatjesstructuur van klei vormen, bepaalt voor een deel de eigenschappen van de klei. Hoe de plaatjesstructuur is opgebouwd en hoe deze vervolgens is gerangschikt in lagen van mineralen, is belangrijk voor de lading die de klei heeft, voor de hydrologische eigenschappen en daarmee voor de bindingscapaciteit van de kleideeltjes. De structuur van klei met illiet mineralen is bijvoorbeeld opgevuld met Kaliumkationen waardoor de klei niet zwelt en bovendien geeft de opbouw van de kleilagen weinig bindingsplaatsen. Smectiet kleisoorten daarentegen hebben veel bindingsplaatsen door de structuur van de mineralenopbouw in de lagen. Door de negatieve lading van zuurstofatomen trekt deze klei kationen aan. Daarnaast is er bij smectiet ruimte voor water in de tussenlagen en zorgt de losse interne binding ervoor dat het feit dat deze klei gemakkelijk zwelt. Naast de fysisch chemische analyse werd met behulp van XRF (X ray fluorescens) en XRD spectra (X ray powder diffraction) de mineralogie van de klei bepaald in het lab van Sibelco. Met deze technieken konden de kleisoorten getypeerd worden naar soort kleimineralen.

Resultaten mineralogische analyse

Tabel 6. Mineralogie van verschillende kleisoorten

				Culem- borg 50	Culem- borg 100	Culem- borg 180	Deetse Waarden	Over Holland	Wamel 50
	Description								
Analyses determined by labo Maastricht	Chemical XRF	Fe2O3	%	6,42	5,79	2,67	2,52	5,39	4,78
		Al2O3	%	17,01	11,90	8,96	6,88	15,61	10,54
		TiO2	%	0,81	0,61	0,45	0,27	0,73	0,52
		K2O	%	3,24	2,42	2,03	2,24	2,88	2,47
		CaO	%	1,26	6,08	12,17	3,49	1,30	9,00
		MgO	%	2,13	2,18	2,12	0,80	1,91	1,87
		Na2O	%	0,25	0,42	0,26	0,58	0,30	0,38
		SiO2	%	58,78	60,52	55,77	76,45	55,12	54,50
		SrO	%	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
		BaO	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		Cr2O3	%	0,08	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
		SO3	%	0,00	0,01	0,47	0,13	0,06	0,15
		P2O5	%	0,18	0,17	0,10	0,14	0,19	0,31
		MnO	%	0,03	0,24	0,05	0,05	0,06	0,17
		F	%	0,25	0,16	0,07	0,01	0,18	0,29
Loss on Ignition	LOI	%	9,26	9,68	14,62	7,1	15,82	14,77	
Moisture	Moisture cont 105°C	%	21,7	21,3	31,9	32,3	68,9	31,4	
Acidimetric titra- tion	CaCO3(+Mg)	%	3,0	11,9	22,9	6,4	2,3	15,9	
Analysis determined by labo Dessel	Chemical XRF	Fe2O3	%	6,276	5,791	2,756	2,384	5,347	5,058
		Al2O3	%	17,245	12,285	8,838	6,866	15,149	10,657
		TiO2	%	0,756	0,623	0,481	0,266	0,672	0,543
		K2O	%	2,812	2,177	1,797	1,997	2,420	2,138
		CaO	%	1,361	4,784	11,136	3,684	1,183	8,625
		MgO	%	2,110	2,080	1,973	0,784	1,816	1,836
		Na2O	%	0,551	0,776	0,858	0,939	0,549	0,702
		SiO2	%	56,640	60,610	57,030	73,650	52,360	54,040
		SrO	%	0,013	0,017	0,029	0,017	0,013	0,026
		ZrO2	%	0,021	0,028	0,031	0,014	0,017	0,023
		BaO	%	0,074	0,059	0,043	0,050	0,062	0,097
		Cr2O3	%	0,024	0,018	0,015	0,020	0,020	0,033
		Loss on Ignition 950°C	LOI	%	11,314	9,968	14,481	8,515	19,445
	Mineralogical XRD	Quartz	%	28,3	41,3	42,8	60,6	30,2	38,5
		K Feldspar	%	3,9	4,2	4,0	7,7	2,9	5,0
		Plagioclase	%	4,7	6,9	8,5	8,6	4,7	6,3
		Calcite	%		5,6	16,5	5,8		13,2
		Dolomite	%	0,1	0,6	0,7	0,2		0,4
		Ankerite	%	0,2	1,9	3,0	0,6		1,6
		Pyrite	%	0,1		0,1	0,1	0,7	0,1
		Anhydrite	%		0,2	0,4	0,3	0,2	0,2
		Hematite	%	0,1			0,2		0,4
		Anatase	%	0,5	0,4	0,4	0,2	0,6	0,4
		Rutile	%	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		Goethite	%	0,2	0,5		0,1		
		Kaolinite	%	5,2	1,9	1,2	0,6	4,8	2,4
		Cholrite	%	2,7	2,5	2,4	3,1	3,2	2,8
		Illite	%	7,4	6,1	4,4	4,4	8,2	6,7
		Illite/Smectite mixed layer	%	15,7	6,5	5,9	4,3	15,8	11,5
		Smectite	%	30,6	21,1	9,5	3,0	28,5	10,3

Conclusies kleianalyse

De gebruikte kleisoorten verschillen sterk in verschillende eigenschappen. Zo is er een groot verschil in de hoeveelheid lutum in de verschillende soorten klei, dit verschilt van 5-65%. Ook het koolstof-gehalte verschilt met een factor 10 van 6-63 gram per kilo droge stof. Dit kan van belang zijn omdat organische stof die al gebonden zit aan kleimineralen mogelijk de hoeveelheid beschikbare bindingsplaatsen in de klei al bezet houdt. Het gehalte zware metalen was in de meeste gevallen rond de achtergrondwaarden, wat betekent dat deze kleisoorten zonder meer gebruikt kunnen worden. Alleen het uiterwaardgebied van Wamel geeft voor een aantal metalen en duidelijk hogere concentratie, met name voor arsenicum, cadmium en koper. Voor lood is de waarde zelfs meer dan 10x de ander gemeten waarden. De minerale kleisamenstelling wisselt met name in de hoeveelheid zand (kwarts) in het monster. Daarnaast wisselt ook het aandeel smectiet sterk, van 3-30%. Het smectiet aandeel is mogelijk een van de klei eigenschappen die van belang kan zijn voor een goede binding van organische stof. In vervolgonderzoek binnen aanpalende projecten zullen klei-eigenschappen op een rij worden gezet die essentieel zijn voor een vorming van klei-humus complexen.

2.2 Pilotproef klei-inspoeling

Achtergrond en vraagstelling

Het succesvol toepassen van klei in veen hangt nauw samen met in welke mate de kleideeltjes in de bodem komen, en dan voornamelijk inspoelen tijdens regenval. Als bij elke regenbui een beetje klei 'oplost' in het regenwater en daarmee dieper in de bodem terechtkomt vermengt de klei zich langzaam in het veen. Om te testen of dit proces plaatsvindt is er een simpel 'proof of principle' experiment met kleisuspensies in kwartzandkolom opgezet.

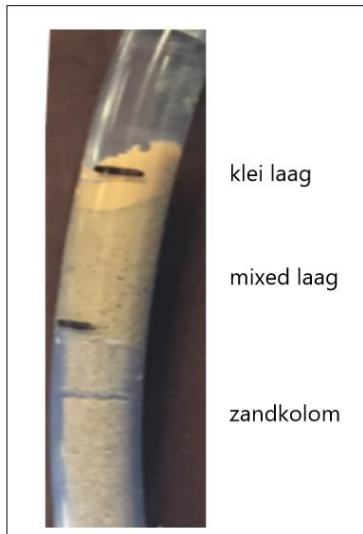
De vraagstelling voor dit pilot experiment was: bewegen kleideeltjes zich dieper de bodem met behulp van vocht?

Proefopzet

Zes buizen met een lengte van 50 cm en binnendiameter van 16 mm zijn voor 40 cm gevuld met kwartzand. Aan de onderkant was de buis afgesloten met een paar kleine gaatjes om het effluent te kunnen opvangen. Twee verschillende kleihoeveelheden (1 mm en 5 mm, rode klei), zijn getest in combinatie met drie verschillende vochthoeveelheden (29.5 ml, 59 ml en 88.3 ml) gebaseerd op de regenval van 4 maanden ($1/3^e$ van de jaarlijkse neerslag (<https://www.clo.nl/indicatoren/nl050806-jaarlijkse-hoeveelheid-neerslag-in-nederland>)).

Resultaten

Voor sommige kleisuspensies duurde het relatief lang voordat de kleisuspensie door de gehele kolom gemengd was. Na ongeveer een week was de laatste suspensie (behandeling D) in het zand gespoeld (Figuur 1). De snelste suspensie was die in buis C, die liep gelijk door. Hierbij kwam ook het meeste zand in het effluent (data niet weergegeven).



Tabel 7. Toegevoegde hoeveelheid kleisuspensie, water en gemeten effluent per behandeling.

Behandeling	Kleihoogte (cm)	Water (ml)	Effluent (ml)
A	0.1	29.5	0
B	0.1	59	0
C	0.1	88.3	0
D	0.5	29.5	5
E	0.5	59	30
F	0.5	88.3	45

Figuur 1. Foto van de inspoeling van klei in een zandkolom

Conclusie

Het doel van deze proef was om meer te weten te komen over de inspoeling van een kleisuspensie in een zandkolom, als "proof of principle". Uit deze proef is gebleken dat de meeste klei bovenop de zandkolom blijft liggen, zeker bij de hogere kleiconcentraties. De hoogste kleiconcentraties deden er ook het langst over om in de zandkolom te spoelen. Niettemin spoelden in elke behandeling kleideeltjes door de gehele lengte van de buis, aangezien het effluent van elke behandeling kleideeltjes bevatte. Hiermee valt te concluderen dat de inspoeling van klei in een zandkolom afhankelijk is van het vochtgehalte en de concentratie klei maar dat in alle gevallen kleideeltjes minimaal 40 cm in de zandkolom bewogen. In een aanpalend vervolgonderzoek zal de rol van het bodemleven in het mixen van klei in een veenbodem nader worden onderzocht.

2.3 Pilotproef CO₂-emissie klei in veen

Achtergrond en vraagstelling

Door chemische binding van organische stof in het klei-humus complex en door aggregaatforming wordt bodemkoolstof minder snel afgebroken. Bodemorganischestof kan stabiliseren rond de metaaloxiden in klei en is daardoor beschermd tegen afbraak (zie paragraaf 1.1). Er zijn echter grote verschillen tussen kleisoorten in o.a. lutumgehalte, pH, nutriënten en organische stof. Hoe goed kleideeltjes kunnen binden aan organische stof hangt af van de specifieke samenstelling en omstandigheden.

De belangrijkste vraag voor dit experiment was: neemt de afbraak van organische stof af wanneer er kleideeltjes in het veen worden gebracht?

Daarnaast was er een drietal deelvragen:

- Is de gebruikte methode geschikt voor vervolgonderzoek?
- Is er een effect van kleiconcentratie?
- Is er een effect van kleisoort, en is dit effect te relateren aan fysisch en/of chemische klei-eigenschappen?

Wanneer toevoeging van klei voor binding van organische stof zorgt en daarmee voor een vermindering van veenafbraak zou dit een reductie moeten geven in de CO₂-emissie, aangezien CO₂-emissie een product is van afbraakprocessen door het microbiële bodemleven. Het meten van de CO₂-emissie uit veen is daarmee de een directe methode om de afbraak van organische stof te bepalen.

Om het effect van toevoeging van klei in veen te kunnen beoordelen is een pilotexperiment opgezet waarin de veen afbraak over de tijd is gemonitord. Daarnaast is er in dezelfde proefopzet ook gemeten wat de respiratie is van de klei zelf.

Proefopzet

Om te testen of de afbraak van organische stof (gemeten als CO₂-emissie) beïnvloed wordt bij het toevoegen van klei en om te testen of er een relatie is tussen klei-eigenschappen en veenafbraak zijn er zes kleisoorten geselecteerd die sterk verschillen in samenstelling. Omdat er weinig bekend was over de relatie tussen concentratie en effect zijn in de proef twee verschillende concentraties en een controle (geen kleitoevoeging) gebruikt. Het gebruikte veen was afkomstig uit een perceel van KTC Zegveld uit de ondergrond (50 cm diep; boven het grondwaterstand). De veenmonsters zijn genomen op 27 september 2018.

Startbepalingen

Voor de start van het experiment werd eerst het droge stof gehalte in de veenmonsters bepaald door 24 u in de oven (max 105 °C) te drogen en het gewichtsverlies te bepalen.

Daarnaast werd het organischestof-percentages van zowel de veen- als de kleimonsters vastgesteld met de gloeiverliesmethode (550°C). Ook werd het watervasthoudend vermogen van de veenmonsters bepaald door 15,6 gram in te wegen (15,6 gram versgewicht is gelijk aan 3 gram drooggewicht) in verschillende herhalingen. De ingewogen veenmonsters werden op een nat filter in een trechter geplaatst en vervolgens werd de trechter gevuld met water. Alle water dat niet door de grond kon worden opgenomen lekte via de trechter in een maatbeker. Na 15 uur werd bepaald wat het gewicht aan water was dat door de monsters was opgenomen.

Resultaten startbepalingen

	Organische stof (%)
Zegveld 50 cm (veen)	76,5
Wamel 50 cm	5,8
Kleibagger Over Holland	14,6
Deestse waarden	2,8
Culemborg 50	5,58
Culemborg 100	2,2
Culemborg 180	3,6

Percentage droge stof in veldmonster: Zegveld 50 cm: 19.25%

Water vasthoudend vermogen: 15,6 + 4.4 gr water

Testmetingen

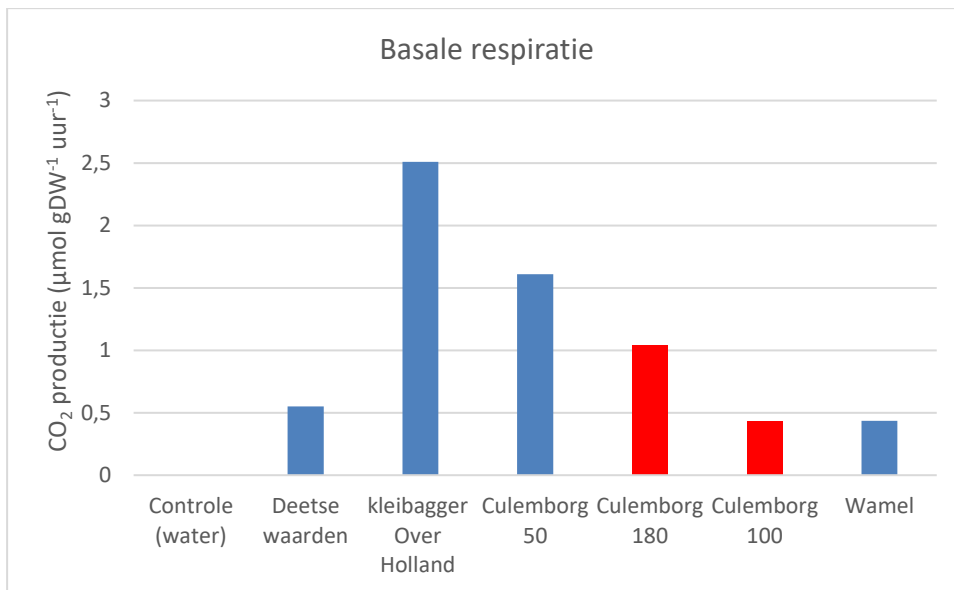
Voor de start van de CO₂ metingen over de tijd is er eerst een serie startmetingen gedaan om een aantal methodische vragen te beantwoorden. Hierin werd getest of de respiratie van de beoogde hoeveelheden grond binnen de detectielimiet viel en of er CO₂ vrijkomt uit de toegevoegde klei zelf.

Opzet testmetingen

Om te bepalen welke respiratie uit klei vrijkomt na interactie met veen werd een meting opgezet waarin klei is gemend met microben uit de veenbodem. De ovengedroogde klei (105 °C) werd gemalen en 6 gram werd in een 1:1 suspensie gebracht met water. Hier werd een inoculum uit veen aan toegevoegd tot een totaal van 1% van het volume van de klei-water suspensie. Het inoculum werd bereid door een 'soil wash' te maken uit het veenmonster. Hiervoor werd er een 1:1 suspensie veen en water gemaakt, deze werd 60 s gemengd (vortex) en 20 minuten geschud. Vervolgens werd een verdunningsreeks gemaakt uit deze suspensie tot 10⁻². De CO₂-emissie van de mix van klei met veeninoculum in suspensie werd in een respirometer in 4 herhalingen per kleisoort tijdens 336 uur (2 weken) continu gemeten volgens de methode van Keuskamp et al., 2013.

Resultaat testmetingen

In Figuur 2 is duidelijk te zien dat de respiratie uit de klei sterk verschilt per kleisoort. Het veen-bagger Over Holland had van zichzelf een hoog organische stof gehalte en bij incubatie met microben uit het veen was er een hoge respiratie zichtbaar. Na 336 uur meten waren de meeste kleisoorten de initiële CO₂-piek voorbij en hadden een stabiele basale respiratie. Dit was nog niet het geval bij de kleimonsters uit de 180cm diepe laag en de 100cm diepe laag in Culemborg ($p > 0,05$) (in de figuur rood weergegeven).



Figuur 2. Basale respiratie van kleimonsters geïncubeerd met microben uit het veenmonster.

Effect van klei in veen: opzet experiment

Het labexperiment is zo ontworpen dat de omstandigheden zoveel mogelijk lijken op de beoogde veldtoepassing. Aangezien de klei in de praktijk op het veld wordt aangebracht is er gekozen om veenkolommen te maken met 3 gram droge stof (versgewicht 15,6g). In de buizen zijn gaatjes gemaakt voor een optimale gasuitwisseling om de respiratie goed te kunnen meten. Hierop werd de klei in de verschillende concentraties aangebracht. Om uitdroging van de veenkolommen te voorkomen werden deze in een 500 ml fles gezet met een laag vochtig perliet op de bodem (zie Figuur 3).

6 kleisoorten
 2 concentraties + 1 controle
 (water toevoeging)
 4 herhalingen
 Totaal metingen = 72



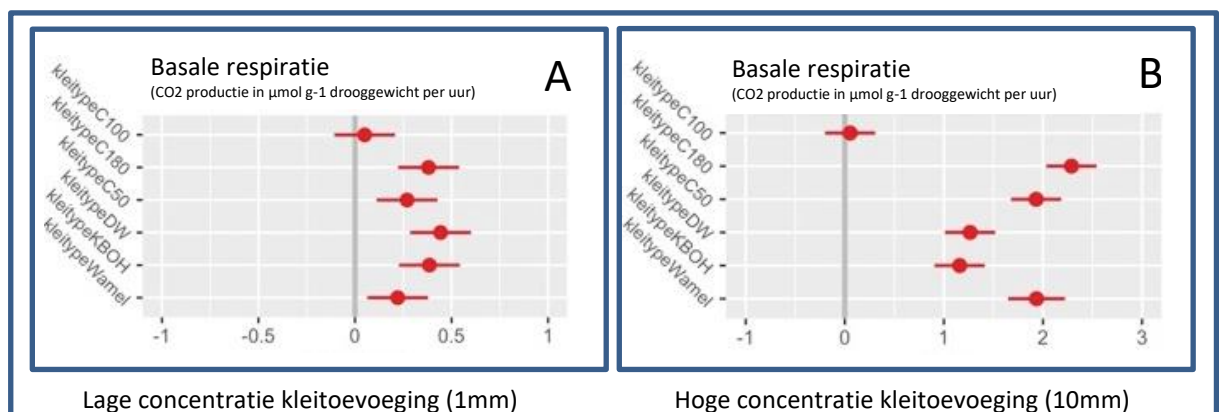
Figuur 3. Meetopstelling met veenkolommen in een laag perliet

Voorafgaand aan de incubatie van klei in veen werd er per kleisoort een suspensie gemaakt in twee concentraties. De kleisuspensie was een equivalent van het aanbrengen van een 1 cm kleilaag en van een 0,1 cm kleilaag op het veld. Per kolom kwam dat neer op 0,6

gr en 0,06 gr klei (droge stof). Een totaal volume van 4,4 ml kleisuspensie (2 concentraties) of water (controle) werd aan elke veenkolom toegevoegd. Gebaseerd op de resultaten van de startmeting werd de incubatietijd op 2 weken gesteld alvorens de respiratie gemeten werd. Alle behandelingen werden in het donker bij constante (kamer) temperatuur geïncubeerd.

Binnen de looptijd van dit project was het alleen mogelijk één meetronde uit te voeren vlak na de eerste incubatietijd van 2 weken.

Resultaten respiatiemetingen



Figuur 4. Additionele CO₂-productie ten opzichte van de controle van verschillende kleisoorten na toevoeging in veen. De nullijn is de respiratie van de controle (water toevoeging). C100 is Culemborg 100cm, C180 is Culemborg 180cm, C50 is Culemborg 50 cm, DW is Deetse waarden, KBOH is kleibagger Over Holland.

Uit de eerste metingen (direct na de 2 weken initiële incubatie) blijkt dat toevoeging van klei een positief effect had op de respiratie. Dit effect was groter bij een aantal kleitypen en bij een hogere hoeveelheid toegevoegde klei. Dit resultaat is tegengesteld aan de verwachting dat toevoeging van klei een remmende werking heeft op de veenafbraak. Dit is echter te verklaren doordat er ook CO₂-vrijkomt uit de toegevoegde klei, die immers zelf ook organische stof bevat (zie Tabel 5). Door de labbewerkingen bevat het toegevoegde klei gemakkelijk afbreekbaar organische stof. Dit veroorzaakt een initiële piek in CO₂-productie. De piek in CO₂ door kleitoevoeging zal waarschijnlijk vervolgens afnemen wanneer het gemakkelijk afbreekbare organische stof opdraakt. Het kleimonster uit de kleilaag van 100cm diep in Culemborg toonde een afwijkend patroon ten opzichte van de andere kleimonsters. Er was hier nauwelijks additionele CO₂-productie en er was ook geen effect van kleiconcentratie.

Conclusie respiatiemetingen

Methodisch heeft de gebruikte proefopstelling goed gewerkt. Er konden stabiele respiraties gemeten worden met voldoende resolutie. Hiermee blijkt we deze methode geschikt voor vervolgonderzoek. Wel is het waarschijnlijk dat er ondanks een incubatieperiode van twee weken er waarschijnlijk nog in de initiële CO₂-piek werd gemeten. Dit was verassend omdat in de testmeting er na 2 weken in bijna alle kleisoorten een stabiele basale respiratie was

bereikt. Mogelijk liep dit proces trager in de veenkolommen doordat de klei en het veen hier niet actief zijn gemengd. Voortzetting van de metingen elke 6 weken gedurende een langere periode (minimaal een jaar) zal een beter beeld geven van de waarde van kleitoevoeging voor veen. De hier gepresenteerde resultaten zijn hiervoor nog ongeschikt. Wel zijn er grote verschillen waargenomen tussen kleisoorten in gemeten respiratie. Hoe dit zich in de tijd verder ontwikkelt zal uit vervolgonderzoek blijken.

3 Conclusies en perspectief

Literatuuronderzoek binding veen door klei

Conclusies: In de wetenschappelijke literatuur is informatie verzameld over de interactie tussen kleideeltjes en organische stof. Hieruit kwam naar voren dat de binding van organische stof in klei-humus complexen, in aggregaten en in kleilagen op verschillende manieren kan verlopen. De binding kan chemisch zijn, bijvoorbeeld bij kationbindingen maar ook fysisch in aggregaten. Duidelijk is dat klei-eigenschappen belangrijk zijn in de interactie tussen organische stof en klei.

Perspectief: In het vervolgonderzoek is het belangrijk klei-eigenschappen en de verschillende manieren waarop bindingsprocessen in veen plaats kunnen vinden uit te diepen en te relateren aan het gemeten effect op CO₂-respiratie.

Verkenning potentiële bronnen en soorten van klei

Conclusies: In Nederland is klei beschikbaar van verschillende bronnen en er is in beginsel enthousiasme bij de organisaties die klei beheren (publieke en private) om mee te denken voor een hoogwaardigere toepassing van de beschikbare klei. Op dit moment is vanuit de aanbodkant een grote drive om klei in het veenweidegebied toe te passen, en is er grote behoefte in de wetenschappelijke kennisbasis: werkt kleitoepassing inderdaad als maatregel tegen veenafbraak, bodemdaling en CO₂-emissie?

Perspectief: Er is grote potentie voor de maatregel "klei in veen" omdat er veel klei beschikbaar is en veel partijen zich hiervoor willen inzetten. Het is aan te bevelen om met de resultaten van lab- en veldproeven in vervolgonderzoek een lijst met geschikte klei-eigenschappen op te stellen waarmee het aanbod kan worden gematcht met de vraag voor het veenweidegebied.

Verkenning verontreiniging klei met zware metalen

Conclusies: In Nederland zijn de risico's op vervuiling van de klei met zware metalen er voornamelijk in rivierafzettingen (uiterwaarden). Omdat zware metalen niet afbreken in de grond kunnen ze accumuleren in de bodem. Bij een hoger lutum- of organische stofgehalte zullen de metalen veelal gebonden worden. Als de concentratie hoger is dan de bindingscapaciteit van de bodem is er een risico dat de zware metalen terecht komen in het (grond) water.

Perspectief: Het is mogelijk dat bepaalde kleisoorten met een hoge concentratie zware metalen een milieurisico vormen, echter of dit in veen het geval zal zijn met de gebruikte concentraties is nog maar de vraag. Het is wel aan te bevelen om dit risico te onderzoeken en het effect van metaalverontreiniging op veengrond mee te nemen in vervolgonderzoek.

Labonderzoek naar klei-eigenschappen

Conclusies: De geanalyseerde kleimonsters verschillen in fysische, chemische en mineralogische eigenschappen. Deze eigenschappen hebben, gebaseerd op de literatuurstudie, mogelijk verschillende implicaties voor de interactie tussen kleideeltjes en het veen. Zo verschilt

de bindingscapaciteit van klei door verschillen in mineralogische samenstelling en het aandeel organische stof in de klei zelf.

Perspectief: In een vervolgstudie zou het van belang zijn om de stap te maken van klei-eigenschap naar het effect in de interactie van klei en veen. Met name de implicaties van een hogere pH, smectietgehalte, ijzergehalte of organische stofgehalte. Dit zijn de voornaamste eigenschappen die effect kunnen hebben op de vorming van bindingen tussen organische stof en lutumdeeltjes of op veenafbraak in zijn algemeen.

Respiratie-experiment klei in veen

In samenwerking met Universiteit Utrecht zijn respiratiemetingen uitgevoerd in veenkolommen waarin verschillende soorten en concentraties klei waren toegevoegd. Na de eerste metingen werd duidelijk dat we een geschikte en betrouwbare methode hebben ontwikkeld voor het meten van het effect van kleitoevoeging in veen. Op grond van de eerste metingen, die hier zijn gepresenteerd, kunnen we nog geen harde conclusies trekken over effecten op veenafbraak. Hiervoor zijn metingen nodig over een langere periode zoals voorzien in vervolgprojecten. Wel traden er al bij de eerste meting verschillen op tussen kleisoorten.

Perspectief: Het is waarschijnlijk dat er ondanks een incubatieperiode van twee weken er bij de eerste meetronde nog in de initiële CO₂-piek werd gemeten. Voortzetting van de metingen kan een beter beeld geven van de waarde van kleitoevoeging voor veen. Dat de eerste meting grote verschillen gaf tussen kleisoorten geeft een indicatie dat klei-eigenschappen (mede-)bepalend zijn voor het effect. Dit moet aandacht krijgen in vervolgonderzoek. Of er kleisoorten zijn die uiteindelijk een remmend effect geven op de veenafbraak zal in vervolgonderzoek worden vastgesteld.

Synthese

Klei gebruiken of hergebruiken in veenweidebodems is een veelbelovend concept, met name in het kader van de klimaatuitdagingen op lokale en globale schaal. Kleitoevoeging kan leiden tot een robuustere veenbodem. Doordat klei-inspoeling de potentie heeft de veenafbraak te reduceren en daarnaast mogelijk andere bodemverbeterende eigenschappen heeft is er in de landbouwpraktijk, het bedrijfsleven en vanuit beleid veel interesse voor deze maatregel. Echter, het wetenschappelijke bewijs dat toevoegen van klei een vermindering kan geven van de veenafbraak en welke factoren daarbij van belang zijn is nog niet geleverd. Het onderzoek beschreven in dit rapport, met als doelstelling het verkennen van de voorwaarden van de toepassing van klei in veen, is daarvoor een eerste maar belangrijke stap. De ontwikkelde methode blijkt wetenschappelijk geschikt en bruikbaar, en er zijn eerste indicaties dat verschillende kleisoorten verschillende CO₂-respiraties geven. Met het ontwikkelen van deze methode is een eerste stap gezet naar het verkennen van de mogelijkheden voor de grootschalige toepassing van klei in het veenweidegebied.

4 Literatuur

- Abdu, Nafiu, Aliyu A. Abdullahi, and Aisha Abdulkadir. "Heavy metals and soil microbes." *Environmental chemistry letters* 15.1 (2017): 65-84.
- van den Akker, J.J.H., Kuikman, P.J., De Vries, F., Hoving, I.E., Pleijter, M., Hendriks, R.F., Wolleswinkel, R.J., Simões, R.T.L., Kwakernaak, C., 2008. Emission of CO₂ from agricultural peat soils in the Netherlands and ways to limit this emission, in: Farrell, C and J. Feehan (Eds.), 2008. Proceedings of the 13th International Peat Congress After Wise Use – The Future of Peatlands, Vol. 1. International Peat Society, pp. 645–648.
- Van den Born, G.J., Kragt, F., Henkens, D., Rijken, B.C., van Bemmelen, B., van der Sluis, S.M., Polman, N., Bos, E.J., Kuhlman, T., Kwakernaak, C., 2016. Dalende bodems, stijgende kosten: mogelijke maatregelen tegen veenbodemdaling in het landelijk en stedelijk gebied: beleidsstudie. PBL-publicatie 1064. (No. PBL-publicatie 1064). Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- Baldrian, P., & Valášková, V. (2008). Degradation of cellulose by basidiomycetous fungi. *FEMS Microbiology Reviews*, 32(3), 501-521
- Brown, G. E. (2001). How minerals react with water. *Science*, 294(5540), 67-69.
- Chenu, C., & Plante, A. F. (2006). Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: Revisiting the concept of the primary organo-mineral complex. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 596-607.
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Denef, K., & Paul, E. (2013). The microbial Efficiency-Matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4), 988-995.
- Deru, Joachim GC, et al. "Soil ecology and ecosystem services of dairy and semi-natural grasslands on peat." *Applied Soil Ecology* 125 (2018): 26-34.
- Van Driel, W., and Klaas Willem Smilde. "Micronutrients and heavy metals in Dutch agriculture." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 25.2 (1990): 115-126.
- Ghori, N-H., et al. "Heavy metal stress and responses in plants." *International Journal of Environmental Science and Technology* (2019): 1-22.
- Gianfreda, L., De Cristofaro, A., Rao, M.A., Violante, A., 1995a. Kinetic behavior of synthetic organo-and organomineral-urease complexes. *Soil Science Society of America Journal* 59, 811–815
- Giller, Ken E., Ernst Witter, and Steve P. McGrath. "Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review." *Soil biology and biochemistry* 30.10-11 (1998): 1389-1414.
- Hassink, J., Bouwman, L.A., Zwart, K.B., Bloem, J., Brussaard, L., 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma, Soil Structure/Soil Biota Interrelationships* 57, 105–128.
- Keuskamp, Joost A., et al. "Nutrient amendment does not increase mineralisation of sequestered carbon during incubation of a nitrogen limited mangrove soil." *Soil Biology and Biochemistry* 57 (2013): 822-829.
- Kilbertus, G. "Microhabitats in soil aggregates. Their relationship with bacterial biomass and the size of the procaryotes present." *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol* 17.4 (1980): 543-557.
- Korthals, Gerard W., et al. "Long-term effects of copper and pH on the nematode community in an agroecosystem." *Environmental Toxicology and Chemistry* 15.6 (1996): 979-985.
- Mikutta, R., Kaiser, K., 2011. Organic matter bound to mineral surfaces: Resistance to chemical and biological oxidation. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1738–1741.
- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76(1-3), 319-337.

- Rasmussen, C., Southard, R. J., & Horwath, W. R. (2006). Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils. *Global Change Biology*, 12(5), 834-847
- Rumpel, C., Baumann, K., Remusat, L., Dignac, M.-F., Barré, P., Deldicque, D., Glasser, G., Lieberwirth, I., Chabbi, A., 2015. Nanoscale evidence of contrasted processes for root-derived organic matter stabilization by mineral interactions depending on soil depth. *Soil Biology and Biochemistry* 85, 82–88
- Schothorst, C.J., 1977. Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. *Geoderma* 17, 265–291.
- Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099-2103.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31.
- Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma*, 74(1), 65-105
- Sposito, G., Skipper, N. T., Sutton, R., Park, S., Soper, A. K., & Greathouse, J. A. (1999). Surface geochemistry of the clay minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), 3358-3364.
- Torres-Sallan, G., Schulte, R.P.O., Lanigan, G.J., Byrne, K.A., Reidy, B., Simó, I., Six, J., Creamer, R.E., 2017. Clay illuviation provides a long-term sink for C sequestration in subsoils. *Sci. Rep.* 7.
- Turner, S., Schippers, A., Meyer-Stüve, S., Guggenberger, G., Gentsch, N., Dohrmann, R., Condon, L.M., Eger, A., Almond, P.C., Peltzer, D.A., 2014. Mineralogical impact on long-term patterns of soil nitrogen and phosphorus enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry* 68, 31–43.
- van Veen, J. A., and P. J. Kuikman. "Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms." *Biogeochemistry* 11.3 (1990): 213-233.
- Vogel, C., Mueller, C.W., Höschen, C., Buegger, F., Heister, K., Schulz, S., Schlöter, M., Kögel-Knabner, I., 2014. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils. *Nat Commun* 5.

Bijlage

Bijlage 1 fysische-chemische analyse Wamel

Projectcode	RWS165-36
Projectnaam	UWDH-Deelgebied 36
Monsteromschrijving	36-MM001
Monstersoort	Waterbodem (AS3000)
Monster conclusie	Klasse B

Analyse	Eenheid	SR	BT
---------	---------	----	----

Malen van monstermateriaal

droge stof	%	75.4	75.4
gewicht artefact g		0	
aard van de afval		Geen	
organische stof %		7.7	7.7
gloeirest	% vd DS	90.4	

KORRELGROOTTEVERDELING

min. delen <2u % vd DS	28	28
------------------------	----	-----------

METALEN

arsen	mg/kg	71	70.3
barium ⁺	mg/kg	820	748
cadmium	mg/kg	7.2	7.46
chromium	mg/kg	190	179
kobalt	mg/kg	21	19.2
koper	mg/kg	170	168
kwik	mg/kg	3.8	3.72
lood	mg/kg	330	327
molybdeen	mg/kg	<1.5	1.05
nikkel	mg/kg	50	46.1
zink	mg/kg	1200	1150