



Inundatie van alle kanten belicht

Historische achtergrond en effecten op bodemstructuur, -chemie, -biologie en bestrijdende werking

R. Peters¹, J. Visser¹, P. Brinkman¹, K. van Rozen¹, A. Mager², G. van Os³ & L.P.G. Molendijk¹

¹Wageningen University & Research | Open Teelten, ²Verify, ³Aeres Hogeschool



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

WPR-OT-1062

Inundatie van alle kanten belicht

Historische achtergrond en effecten op bodemstructuur, -chemie, -biologie en bestrijdende werking

R. Peters¹, J. Visser¹, P. Brinkman¹, K. van Rozen¹, A. Mager², G. van Os³ & L.P.G. Molendijk¹

¹ Wageningen University & Research | Open Teelten

² Vertify

³ Aeres Hogeschool

Dit onderzoek is in opdracht van het consortium PPS Bollen, Bodem & Aaltjes (project 3742324901) uitgevoerd door de Stichting Wageningen Research (WR), business unit Open teelten

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Lelystad, maart 2024

Rapport WPR-OT-1062

R. Peters, J. Visser, P. Brinkman, A. Mager, G. van Os & L.P.G. Molendijk, 2024. *Inundatie van alle kanten belicht; Historische achtergrond en effecten op bodemstructuur, -chemie, -biologie en bestrijdende werking*. Wageningen Research, Rapport WPR-OT-1062, 42 blz.; 10 afb.; 3 tab.; 59 ref.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/644838>

Sinds inundatie met succes is ingezet voor de bestrijding van verschillende plantenparasitaire aaltjes in recente jaren, wordt deze anaerobe grondontsmettingstechniek steeds vaker ingezet. Er waren echter nog veel vragen over de invloed die inundatie heeft op verschillende aspecten van de bodem. In dit rapport is daarom op basis van de momenteel (2024) beschikbare wetenschappelijke literatuur een overzicht gemaakt van de kennis aangaande de historische achtergrond van inundatie en effecten op bodemstructuur, -chemie, -biologie en bestrijdende werking.

Trefwoorden: *Inundatie, anaerobe grondontsmetting*

© 2024 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Open Teelten, Postbus 430, 8200 AK Lelystad; T 0320 29 11 11; www.wur.nl/plant-research

KvK: 09098104 te Arnhem
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Foto omslag: WUR-OT

Inhoud

Woord vooraf	4
Samenvatting	5
1 Inleiding	7
2 Historisch onderzoek	9
2.1 Overstroming met zout water	9
2.2 Inundatie met zoet water	11
3 Invloed op de bodem	12
3.1 Fysisch	12
3.2 Chemisch	13
3.2.1 Zuurgraad (pH)	13
3.2.2 Redoxpotentiaal	14
3.2.3 (Total) Cation Exchange Capacity (TCEC/CEC)	15
3.2.4 Organische stof (OS)	16
3.2.5 Macronutriënten	17
3.2.6 Micronutriënten	22
3.3 Microbiologie	24
3.3.1 Betrokken groepen op basis van redoxpotentiaal	24
3.3.2 Toxische vetzuren en hun producenten	25
3.3.3 Het microbioom na inundatie of Anaerobic Soil Disinfestation (ASD)	26
3.3.4 Bodemdieren/-insecten	27
4 Inundatie als ziekte- en plaagbestrijding	30
4.1 Uitvoering van de maatregel	30
4.2 Werking	31
4.3 Effectiviteit van inundatie	32
5 Openstaande en nog niet volledig beantwoorde vragen	34
5.1 Bemestingseffect & -advies	34
5.2 Vorming en uitstoot van broeikasgassen	34
5.3 Invloed op bodemgezondheid & herstel van weerbaarheid	35
De kern van het verhaal in vraag en antwoord	37
Literatuur	41
Bijlage 1 Invloed zout water op kleigronden	44

Woord vooraf

Sinds inundatie succesvol is gebleken voor de bestrijding van *Ditylenchus dipsaci*, *Meloidogyne chitwoodi* en *Globodera spp.* wordt inundatie op steeds grotere schaal ingezet. Er zijn nog veel vragen rondom de duurzaamheid van deze techniek, waarbij zorgen worden geuit over mogelijke nadelen op het gebied van structuur, bodembioïologie, nutriëntenuitspoeling en methaanvorming. De partners binnen de PPS hebben zich ten doel gesteld tot een objectieve beoordeling te komen van de voor- en nadelen van inundatie. Dit literatuuronderzoek vormt hiertoe de basis.

Naast dit literatuuronderzoek wordt er, zowel via pot- als veldproeven, meer informatie verzameld over de hoofd- en neveneffecten van inundatie. In de periode 2023-2025 zal er meer informatie beschikbaar komen die te volgen is via de website van de PPS <https://www.wur.nl/nl/show/pps-bollenbodem-aaltjes-integraal-aangepakt-.html>

Dit overzicht is geschreven in het kader van de PPS Bollen, Bodem & Aaltjes: integraal aangepakt (3742324901). De PPS wordt gefinancierd door Topsector Tuinbouw & Uitgangsmaterialen, KAVB, Stichting bloembollenonderzoek, Anthos, CNB, Agrifirm, CAV Agrotheek, BO Akkerbouw, Bloembollenacademie, Greenport Noord-Holland Noord en Greenport Duin- & Bollenstreek. Uitvoering door de kennisinstellingen Wageningen University & Research (BU Glastuinbouw & Bloembollen, BU Open Teelten) en Vertify i.s.m. de partners.

Samenvatting

Inundatie, oftewel het vrijwillig onder water zetten van grond ter bestrijding van ziekten, plagen en onkruiden, is een complex en ingrijpend proces met invloed op veel verschillende aspecten van de bodem. In dit rapport is de momenteel (2024) beschikbare kennis vervat aangaande inundatie op akkerbouwgronden met betrekking tot historische informatie, invloed op de bodemstructuur, -chemie en -biologie, de bestrijdende werking en openstaande vragen.

De historische informatie (ca. 1775-1945) over inundatie gaat niet over inundatie volgens de huidige definitie, maar uitsluitend over overstromingen. Van inundatie volgens de huidige definitie wordt voor het eerst melding gemaakt in wetenschappelijke bronnen in 1985. Sindsdien is de omvang van het onderzoek naar inundatie sterk toegenomen.

Inundatie met zoet water heeft op zavelgronden vaak geen effect op de bodemtextuur. De indringingsweerstand wordt doorgaans lager. Dit is afhankelijk van de kwaliteit van het uitvoeren van de inundatie. In korte tijd veel water opbrengen kan met name op droge zandgronden een 'instortingseffect' veroorzaken. Gronden met een wat hoger gehalte aan lutum zijn hier beter tegen bestand. Gronden die veel lutum bevatten en ook grotendeels uit hetzelfde type kleimineraal bestaan kunnen, afhankelijk van de specifieke mineraalsoort, zowel krimpen als opzwellen.

Voor wat betreft bodemchemie en het vrijkomen dan wel vastleggen van nutriënten is inundatie een bijzonder complex proces. De zuurgraad (pH, concentratie H^+ -ionen), het redoxpotentiaal (maat voor de uitwisseling van elektronen tussen moleculen), de TCEC (de totale kationen bindings- en uitwisselingscapaciteit), de kwaliteit en kwantiteit van de (toegevoegde) organische stof (OS) en de diversiteit en kwantiteit van het bodemleven (voorkomende soorten en aantal van met name bacteriën en archaea (ééncellige micro-organismen)) spelen alle een belangrijke rol.

De stikstofvoorraad in de bodem neemt in enige mate af door inundatie. Het minerale deel vervluchtigt voor een groot deel en er komt stikstof uit organische massa vrij. Een klein deel wordt vastgelegd door anaerobe micro-organismen. De hoeveelheid oplosbaar fosfaat neemt tijdens de inundatie toe. Bij het weer opdrogen van de bodem komt veel van deze fosfaat weer vast te liggen. In ijzerrijke bodems geldt een toegenomen risico op de vorming van ijzerfosfaat, een verbinding die zeer moeilijk of door slijtage weer in oplossing komt. Inundatie heeft geen invloed op zogenaamde structuur-kalium (kalium die onderdeel is van de siliciumstructuur van kleiplaatjes). Over het algemeen is er wel een afname van het in water opgeloste kalium. Het aandeel uitwisselbare kalium kan fluctueren tijdens inundatie, maar neemt uiteindelijk altijd af. Veel van de vrijkomende kalium spoelt uit of vormt bij het opdrogen van de grond verbindingen die minder goed oplosbaar zijn.

De hoeveelheid opgeloste zwavel neemt aanvankelijk toe en blijft bij het weer opdrogen van de bodem stabiel in het bodemvocht of neemt af. Ook het gehalte magnesium neemt tijdens inundatie toe in het bodemvocht, maar blijft bij het weer opdrogen van de bodem in het bodemvocht of in makkelijke oplosbare vormen beschikbaar. Eventuele zware metalen (koper, lood, nikkel) gedragen zich tijdens inundatie veelal als ijzer. Ze gaan tijdens de inundatie in oplossing, maar slaan bij het opdrogen ook weer neer.

De afbraak van de OS volgt in grove lijnen de onderstaande drie fasen: 1) Een reductiefase waarin de anorganische oxidatoren (zuurstof, nitraat) vrij snel worden opgebruikt en de productie van CO_2 maximaal is; 2) Een fermentatie-/methanogenese fase waarbij de productie van methaan maximaal is, en 3) Een min of meer stabiele fase waarin evenwichtsconcentraties worden bereikt van de restproducten van anaerobe afbraak.

Verschillende families en geslachten van veelal obligaat anaerobe bacteriën en archaea bewerkstelligen deze processen en nemen tijdens inundatie sterk in aantal toe. Deze groepen zijn goed in denitrificatie en het verteren van complexe OS en hebben een zeer brede tolerantie wat betreft de zuurtegraad (pH). Het bestrijdende/sanerende effect van inundatie is echter niet direct van micro-organismen afkomstig, maar indirect van de toxische vetzuren die tijdens de fermentatie van de OS ontstaan. Azijnzuur, boterzuur, propionzuur en 3-methylbutaanzuur zijn de vetzuren met waarschijnlijk de sterkst bestrijdende werking.

De diversiteit van het microbiom na inundatie is in grove lijnen hetzelfde als voor de inundatie. Er zijn voor bacteriën en archaea geen aanwijzingen voor het volledig verdwijnen van klassen of orden. Of dit ook geldt voor individuele soorten is niet bekend. De aantallen van een groot aantal klassen/families/geslachten zullen sterk zijn gedaald, maar herstellen zich meestal tot gelijksoortige niveaus als voor de inundatie. De invloed van inundatie op de diversiteit van schimmels in de bodem is nog grotendeels onbekend.

Sommige ziekten, plagen en onkruiden worden door inundatie goed bestreden, maar dat geldt niet voor alle soorten. Met name pathogene soorten die saprofytisch en/of qua concurrerend vermogen zwak zijn, kunnen zich kort na inundatie sterk uitbreiden. Het aanbieden van rijpe OS (compost) kan de groei van concurrerende micro-organismen stimuleren en daarmee de pathogenen terugdringen. Sommige nematodensoorten worden wel bestreden door inundatie, terwijl andere overleven. Het effect op de bodemfauna is vaak slechts ten dele bekend. Vrijwel alle ongewervelden en geleedpotigen die in de bodem voorkomen hebben overlevingsstrategieën voor overstromingen of kortdurende inundatie.

Over het ontstaan en de uitstoot van broeikasgassen bij inundatie is weinig bekend. Veel broeikasgassen, en in het bijzonder twee van de sterkste broeikasgassen (lachgas en methaan), zijn geen gedoodverfde eindproducten van de anaerobe afbraak van OS. Ze kunnen namelijk tijdens het uit de bodem diffunderen weer omgezet worden in het meer zuurstofrijke inundatiewater, of worden omgezet door bepaalde micro-organismen. Alleen praktijkmetingen kunnen zekerheid bieden omtrent de vragen welke en hoeveel broeikasgassen er door een geïnundeerd perceel worden geproduceerd.

De consequenties van het bovenstaande voor de voorbereiding, uitvoering en nazorg voor inundatie als maatregel is in een aantal punten samen te vatten:

- Zorg voorafgaand aan het inunderen dat de grond zo is bewerkt dat deze goed los is.
- Teel het gras of de groenbemester voor de extra OS (ca. 40 ton/ha) op het betreffende perceel, en bemest daarbij minimaal adequaat voor de behoefte van het gewas.
- Laat het water langzaam op het perceel stromen, beginnend bij het laagste punt, waarbij ook direct onder de uitlaat van de pomp de waterstraal zoveel mogelijk gebroken wordt (bijvoorbeeld met behulp van pallets). Dit voorkomt luchtinsluiting en verkleint het risico op 'instorting' van de bodemstructuur sterk.
- Pomp tijdens de inundatieperiode water bij mits nodig; bedenk dat droogvallen van de grond direct een zeer sterk remmende werking heeft op het inundatieproces, die ook moeilijk is te herstellen.
- Laat na afloop van de inundatieperiode het water langzaam en gecontroleerd af. Dit betekent via een bij aanvang aangebrachte hevelbuis waarmee het overgrote deel van het water wordt afgevoerd. Open pas daarna de drains. Dit alles om inspoeling van fijne bodemdeeltjes te voorkomen.
- Wacht geduldig af tot de grond weer voldoende draagkracht heeft en ga ook niet direct aan de slag met grondbewerking (vanwege risico op versmering en dichtslaan van de grond).
- Steek vóór het volgende teeltseizoen een grondmonster en laat dit analyseren op macro- én micronutriënten, want het kan zijn dat de inundatie andere gebreken oplevert dan je gewend bent van het betreffende perceel.
- Voer in het volgende teeltseizoen een gift organische bemesting aan (zoals compost of storrijke stalmest), en teel een gewas dat niet of weinig gevoelig is voor *Pythium* spp. en enigszins zouttolerant is.

1 Inleiding

De **PPS Bollen@Bodem & Aaltjes: Integraal aangepakt** richt zich binnen het brede thema van bodemkwaliteit op het specifieke onderdeel van de aaltjesbeheersingsstrategie. We willen met en voor de sector een praktische methodiek ontwikkelen om de bodem duurzaam te verbeteren, zoals het aanpassen van het bodemkwaliteitsplan voor de bollensector. Een ander doel is om kennis over aaltjesbestrijding voor de bollensector te vergroten. Uit een sector evaluatie (november 2020), blijkt namelijk dat aaltjes een kern knelpunt vormen bij het ontwikkelen van een goed gemeenschappelijk beheer van percelen voor de teelt van bollen. Daarom hebben we extra kennis nodig op een aantal aspecten van aaltjes die een bedreiging zijn voor de bloembollensector, om het mogelijk te maken een succesvolle beheersmaatregelen te ontwikkelen. Binnen deze PPS wordt daarom o.a. gekeken naar hoofd- en neveneffecten van inundatie als beheersingsmaatregel.

Inundatie betekent 'het bewust en doelmatig onder water laten lopen van een stuk land'. In landbouwkundige zin wordt inundatie ingezet als een bestrijdingsmaatregel tegen ziekten en onkruiden. Het effect werd vanuit de praktijk gemeld door bloembollentelers, die na het tijdelijk onder water hebben gestaan van de Wieringermeer in 1945, merkten dat ze een aantal jaar minder last hadden van ziekten in hun percelen. De eerste officiële Nederlandse publicatie waarbij actief een perceel onder water werd gezet dateert echter van enkele tientallen jaren later (Stover, 1979). In dit rapport wordt aan de hand van literatuuronderzoek de historie, het effect op bodemstructuur, de chemische en microbiologische werking en het gebruik van inundatie als bestrijdingsmaatregel beschreven.

Het literatuuronderzoek moet zo mogelijk de onderstaande vragen beantwoorden voor de effecten van inundatie op de fysische, chemische en biologische aspecten van de bodem en de consequenties hiervan op de wijze van uitvoering van inundatie op verschillende grondsoorten.

Fysisch

- Wat bepaalt of de bodemstructuur van een perceel verbetert of verslechtert? Is dit afhankelijk van de grondsoort, zoutgehalte van het water, uitgangssituatie van het perceel, grondbewerking kort voor inundatie?
- Welke maatregelen kun je nemen om de negatieve effecten te beperken of de positieve effecten te versterken?

Chemisch

- Wat gebeurt er met stikstof, fosfaat, kalium, magnesium, zwavel en sporen elementen?
- Voor N is de vraag in welke mate N uitspoelt of naar de lucht verdwijnt en in welke vorm?
- Welke hiervan zijn broeikasgassen en hoe moet deze emissie worden gewogen?
- Welke maatregelen kunnen worden genomen om de negatieve aspecten zoveel mogelijk te beperken?

Biologisch

- Mechanismen: hoe komt de doding van bodempathogenen, nematoden, onkruiden tot stand?
- Met welke maatregelen kun je de mechanismen ondersteunen?
- Welke hiervan overleven inundatie en waarom?
- Wat gebeurt er met het niet pathogene bodemleven?.
- Wordt de bodembiodiversiteit sterk verminderd en zo ja, is dit blijvend of tijdelijk?
- Wat gebeurt er met het antagonistisch potentieel van een bodem (specifieke weerbaarheid) en wat met de algemene weerbaarheid. Is herstel mogelijk en hoe lang neemt dat in beslag?

Consequenties

Gebaseerd op de resultaten van dit literatuuronderzoek worden de adviezen voor de uitvoering van inundatie al dan niet aangepast om zo doelmatig mogelijk te zijn met minimalisatie van negatieve neveneffecten.

- Is het wel of niet zinvol om extra organische stof aan te voeren?
- Zo ja, welke criteria moeten er worden gesteld aan de (kwaliteit van) de organische stof?
- Hoeveel organische stof is zinvol? Te veel levert immers alleen extra uitspoeling van mineralen en uitstoot stikstofproducten op.
- Wat is de beste manier om een perceel op inundatie voor te bereiden?
- Wat is de beste manier om na inundatie het bodemleven weer te herstellen?

2 Historisch onderzoek

Naar inundatie in de vorige eeuwen is door Rowaan (1951) uitgebreid literatuuronderzoek gedaan. Het volgende is een overzicht van de belangrijkste agriculturele ontwikkelingen rondom de historie van inundatie.

2.1 Overstroming met zout water

De vroegste landbouwkundige beschrijvingen van inundatie in Nederland stammen uit 1775 en betreffen gezien de door ons gehanteerde definitie geen 'echte' inundaties maar overstromingen. De beschrijvingen, gemaakt door Van Ponse (1808 en 1825 in (Rowaan, 1951)), gaan hoofdzakelijk over grondherstel na overstroming met zout water, wat geschiedt door 'echte' inundatie met zoet water, gevolgd door licht ploegen en het telen van diep wortelende gewassen (zomergerst/haver). Later voegt Van Bemmelen (1872 in (Rowaan, 1951)), een bodemkundige, hier na onderzoek van met zout water overstroomde gronden in Groningen in 1825 en 1863 de inzaai met grassen en klavers aan toe om de bodemvruchtbaarheid op het oude peil te brengen.

In 1877 richtte het Proefstation der Rijkslandbouwschool te Wageningen (nu Wageningen University & Research) voor het eerst zijn aandacht op overstroomde gronden in de Reiderwolderpolder. Zowel onderzoekers van het Proefstation der Rijkslandbouwschool als een bekende bodemkundige uit die tijd (Kakebeeke, 1906 in (Rowaan, 1951)) komen na meerdere jaren van onderzoek tot dezelfde conclusie. Met zout water overstroomde gronden moeten ontzilt worden, hooguit licht bewerkt om verslemping tegen te gaan en met haver of gerst worden ingezaaid om opnieuw de structuur te vormen.

Kort nadien bleek, onder andere door experimenten rondom het in gebruik nemen van de gronden in de Flevopolder, dat toediening van de juiste hoeveelheid gips (zwavelzure kalk) en goede afwatering veel belangrijker waren voor het weer op orde krijgen van de structuur dan het eerste te verbouwen gewas. Het toedienen van gips zorgde ervoor dat de zogenaamde natronklei een groot deel van zijn natrium (Na^+) uitwisselde voor calcium (Ca^{2+}). Uit dit proces ontstond de veel losser van structuur zijnde kalkklei en natriumbicarbonaat (NaHCO_3), wat in opgeloste vorm via ontwatering weg kon lopen (Hissink, 1933a; Hissink et al., 1954). Op basis van de CEC (bezetting) van het kleihumuscomplex werden in de jonge poldergronden bodems met een gehalte aan uitwisselbare Na^+ -kationen (in % milli-equivalenten/100 gram grond) hoger dan 20 als 'verdorven door zeewater' aangeduid (Hissink, 1933a). Zie verder bij Hoofdstuk 3.1 Fysisch.

Na een uitgebreid onderzoek naar de overstroomde gronden in Zeeland (1906-1909) voegt de landbouwkundige Ter Haar (1907 en 1910 in (Rowaan, 1951)) suikerbieten, voederbieten en luzerne aan de mogelijke zomergewassen na overstroming toe. Hij stelde dat door het gedurende vier jaar telen van luzerne de gronden het snelst hersteld konden worden. Later bleek luzerne echter, mogelijk door structuurschade, zeer slecht te groeien kort na overstroming met zout water (Tabel 1). Bij de volgende overstroming, in Noord-Holland in 1916 werd voor het eerst bepaald welke gewassen in de eerste teelt na een overstroming goed gedijden (Tabel 1).

Tabel 1 Overzicht van gewassen ingedeeld naar gewasprestatie bij telen in het eerste teeltseizoen na een overstroming met zout water

Mate van groei	Gewas
Goede groei	Suikerbiet, voederbiet, boerenkool, selderij, peterselie, knolraap, raapstelen, spinazie, koolzaad
Matige groei	Aardappelen, wortelen, uien, erwten, tuinbonen, andijvie, koolgewassen (anders dan boerenkool), postelein, gerst, tarwe, haver
Slechte groei	Aardbeien, stambonen, prei, radijs, rabarber, klaver, luzerne

Fruitteelt aan bomen (appel, peer, perzik, pruim en kers) bleek niet haalbaar, omdat de bomen afstierven. Kruisbes en framboos gingen ook vroegtijdig dood, maar teelt van zwarte en rode bes bleek redelijk bestand tegen de gevolgen van overstroming. Veel van de bovenstaande onderzoeken en conclusies worden door Smeding (1921 in (Rowaan, 1951)) in de jaren 1916-1918 in de Anna Paulownapolder herhaald en bevestigd.

Na de inundatie van de polders van Zuid-Beveland in 1939-1940 merkte men voor het eerst op dat de opbrengst van suikerbietenteelt in het derde jaar na inundatie hoger lag dan het streekgemiddelde, hoewel met een lager suikergehalte. Aardappelen groeiden na die periode ook niet slecht, maar hadden een lager zetmeelgehalte.

Op microbiel vlak is gemeten dat bij een zoutgehalte onder de 0,2% nitrificerende bacteriën weer hun werk kunnen doen (Rowaan, 1951) (Baeyens & Appelmans, 1947). Bakker (1950) verrichtte in de jaren 1946-1950 onderzoek op het eiland Walcheren na de overstroming van Zeeland in 1946. Hij berichtte uitvoerig over het overleven en voorkomen van flora en fauna kort na de overstromingen met zout water. Van enig belang voor de akkerbouw is de overleving van kweekgras (*Agropyron repens*), straatgras (*Poa annua*), Engels raaigras (*Lolium perenne*), melganzervoet (*Chenopodium album*), korrelganzervoet (*C. polysperma*), en stippelganzervoet (*C. ficifolium*). Deze stikstofminnende en relatief zouttolerante soorten, die voor de akkerbouw problematisch kunnen zijn, kwamen in het voorjaar na de overstroming met zout water in grote getalen voor op zavelruggen en overgangsgonden. In het bijzonder werd hier melganzervoet genoemd, die soms op gronden met wel 20 g NaCl/L bodemvocht voorkwam. Op de komgronden, welke het meest verzilt en het armst aan kalk waren kwamen alleen halofyten (zoutminnende planten) voor.

In opdracht van de Rijksoverheid voerden Van Beekom et al. (1961) en Westerhof et al. (1951) een aantal onderzoeken uit aan de gronden geïnundeerd tijdens de jaren '44-45, aan het einde van de tweede Wereldoorlog. Dit waren Zuid-Beveland (Midden-Zeeland), Tholen en St.-Philipsland (Oost-Zeeland) (beide kleigronden) en een niet nader beschreven gebied in Noord-Brabant. Zij trokken de volgende conclusies: bij inundatie met zowel zoet, brak als zout water komt stikstof vrij (20-60 kg/ha op kleigronden, voor zandgrond wordt geen getal genoemd). De mate van het vrijkomen van stikstof is afhankelijk van de pH voor en tijdens de inundatie, alsmede de duur van inunderen. Het effect is het sterkst bij met zout water geïnundeerde gronden. Naarmate de pH lager was, kwam er meer stikstof vrij, terwijl naarmate de pH hoger was, er meer fosfaat vrijkwam. Dit heeft waarschijnlijk te maken met complexe reacties van de organische stof, die verschillende nutriënten afgeven, omvormen en vastleggen afhankelijk van de redoxpotentiaal.

De kaliumgehalten, gemeten als K₂O, stijgen in geïnundeerde gronden en vertonen een positieve correlatie met het percentage afslibbare delen. Gewassen op geïnundeerde gronden reageren sterker op fosfaatbemesting dan gewassen op niet-geïnundeerde gronden. De mate van reageren is matig positief gecorreleerd is aan de hoeveelheid humus in de bodem. Geopperd wordt dat dit te maken heeft met een reactie met het door anaerobe reductie in oplossing gebracht ijzer. Dit ijzer heeft zich aan fosfaat gebonden en is neergeslagen in de vorm van voor planten zeer slecht opneembaar ijzerfosfaat. Er was door het inunderen dus een tekort aan oplosbaar fosfaat ontstaan.

Stikstofbemesting hielp de opbrengstdepressie te verminderen, maar alleen als het nitrificatieproces op orde was, hetgeen wil zeggen in de omstandigheid dat er dat er geen ernstig structuurverval was en voldoende afwatering.

2.2 Inundatie met zoet water

In het overzicht van (Sevenants, 1960) van landbouwkundig onderzoek uitgevoerd tussen 1945-1958 wordt geen melding gemaakt van onderzoeken aan geïnundeerde gronden, behalve die tijdens de Tweede Wereldoorlog met zeewater waren geïnundeerd. In verhandelingen uit Amerika en uit landen in Oost-Europa worden de termen 'overstroming' en 'inundatie' veelal door elkaar heen gebruikt en hebben daar dus een andere betekenis. Deze verhandelingen zijn daarom hier niet verder uitgewerkt.

Inundatie wordt na 1958 in Nederland voor het eerst (althans in gedigitaliseerde bronnen) weer genoemd in 1985 (Muller & Vink, 1985) als mogelijke maatregel tegen plagen, ziekten en onkruiden. Later wordt het ook nog onderzocht als mogelijkheid voor het saneren van zeef- en sorteergrond (Boerma, 1991). In de VS wordt inundatie als methode voor beheersing van plantpathogenen al iets eerder genoemd (Pullman & DeVay, 1981). De invloed/werkzaamheid van inundatie op pathogenen is elders in dit rapport uitgewerkt (Hoofdstuk 4). De eerste schriftelijke vermelding in Nederland van een voorstel om met behulp van afdekking van de bodem met plastic het effect van inundatie na te bootsen (Anaerobic Soil Disinfestation, ASD) dateert van eind vorige eeuw.

3 Invloed op de bodem

Het langdurig, zo goed als volledig verzadigd zijn met water heeft vergaande invloed op de bodem en de bodemeigenschappen. In dit hoofdstuk is uitgewerkt hoe een bodem reageert op inundatie en welke componenten daarbij een rol spelen.

3.1 Fysisch

In een onderzoek van Runia et al. (2013) werd de fysieke gesteldheid van een bodem onderzocht voor en na 16 weken inundatie d.m.v. profielkuilen, de indringingsweerstand en de granulaire samenstelling. Uit de vergelijking van de profielkuilen voor en na inundatie bleek dat er weinig verschillen waren in de door plantenwortels en wormen gevormde poriën en in de opbouw van het bodemprofiel. Wel was in sommige delen blauwkleuring ontstaan door zuurstofgebrek. De indringingsweerstand (gemeten in MPa) was veelal gehalveerd in laag 0-50 cm (van 5-6 MPa naar 2.5-3 MPa). In de laag 50-80 cm was er geen verschil, wat mogelijk werd veroorzaakt door een zeer verdichte laag met schelpen in dit perceel op 50 cm diepte. Voor wat betreft de granulaire samenstelling bleek er een zeer kleine, niet-significante afname te zijn van bodemdeeltjes $<53\ \mu\text{m}$ (21.3 naar 20.1%) en van lutumdeeltjes ($<2\ \mu\text{m}$, 7.8 naar 7.2%). Dit vertaalde zich in de Spurway-analyse in een licht afgenomen afslibbaarheidsgetal (10 naar 9).

In een grote praktijkproef (Visser et al., 2021) werden de bodemeigenschappen, waaronder bodemvruchtbaarheid, -textuur en vochtvasthoudend vermogen van twee geïnundeerde percelen gemeten. Eén van de percelen was met zoet water (perceel NM), het andere met zout water (perceel WM) gedurende respectievelijk 11 en 15 weken geïnundeerd. Het betrof percelen met respectievelijke bodemtypen zavel en zeer lichte zavel, 1.8 en 1.4 % OS (organische stof), en afslibbaarheidsgetallen van 11 en 7. Voor geen van beide percelen was extra organische stof aangevoerd.

Voor beide percelen leken de gehalten lutum en silt iets (niet-significant) afgenomen door de inundatie, om daarna in de loop van drie maanden weer toe te nemen. Het gehalte zand nam juist iets (niet-significant) toe tijdens de inundatie en daarna weer af. Deze verschillen zouden kunnen worden verklaard door een meetfout of spreiding in de gegevens, maar gelet op de metingen uit het onderzoek van Runia et al. (2013) is het ook mogelijk dat de lutumdeeltjes en silt voor een klein deel zijn uitgespoeld of de verdeling in de bodem is veranderd en bij het opdrogen van de bodem weer worden gemeten. Al met al bleek er echter geen significante verandering van bodemtextuur te zijn ontstaan door de inundatie.

De volumefractie vocht voerende (open) poriën was op beide percelen iets (niet-significant) hoger kort na de inundatie dan drie maanden later. Omdat de volumefractie vocht sterk gecorreleerd is aan de textuur en de porositeit, lijkt dit resultaat in eerste instantie niet aan te sluiten bij de resultaten van de textuur (meer zand). Omdat de verschillen zowel voor textuur als voor volumefractie vocht echter zeer klein en niet-significant zijn is het ook mogelijk dat de verzadiging van de grond kort na inundatie simpelweg hoger was omdat relatief grote poriën op dat moment nog water bevatten wat later zou wegsijpelen of verdampen. Een mogelijke herverdeling van de lutumdeeltjes en silt door de inundatie zoals hierboven beschreven zou hier ook een rol in kunnen spelen.

In welke mate een bodem uitzet of juist compacter wordt onder invloed van inundatie is voor een deel afhankelijk van de materialen (mineralen) waaruit een bodem bestaat, en voor een deel van de toestand van de bodem bij de start van de inundatie. Schanz et al. (2018) vergeleken het 'gedrag' van twee typen kleigronden uit Duitsland; Spergau kaolin (Sk) hoofdzakelijk bestaand uit kaolinite, en Calcigel bentoniet (Cb) voornamelijk bestaand uit montmorilloniet. De Sk-klei verloor poriënvolume en werd compacter. De mate van verzadiging met water bij aanvang van de inundatie had nauwelijks invloed op dit effect. De Cb-klei reageerde omgekeerd, zwol op en had een toename van poriënvolume.

In het geval van de Cb-klei had de mate van verzadiging met water bij aanvang van de inundatie wel een duidelijke invloed: hoe hoger de initiële verzadiging, hoe minder de klei opzwol. Als het water werd vervangen door een niet-polaire vloeistof (in dit geval heptaan (C_7H_{16})) reageerden de beide kleitypen veel minder sterk, wat aantoont dat een deel van het verschil tussen de kleitypen in reactie op inundatie afhankelijk is van de reactie tussen water en geladen kleideeltjes op moleculair niveau. Een meer gedetailleerde beschrijving van het effect van zouten op kleiplaatjes is te lezen in Bijlage I.

Tadepalli (1991) voerde een soortgelijk onderzoek uit met een leemhoudende zandgrond (62% zand, 32% silt en 6% klei) onder verschillende hoeveelheden druk, waardoor verschillende 'droge dichtheden' werden verkregen. In deze proef werd de mate van 'instorting' van de bodemstructuur (compactie) gemeten tijdens en na inundatie. Vervolgens werden deze gecorreleerd aan de initiële mate van verzadiging met water of de initiële dichtheid van de grond. Uit deze proeven bleek dat hoe droger de grond is bij de start van de inundatie, des te groter de compactie. Het verband hiertussen was dus omgekeerd lineair en zeer sterk (R^2 niet gegeven, maar de punten vormden een nagenoeg rechte lijn). Specifiek deze grond liet een compactie zien van 12% bij 7% verzadiging, en 4% bij 14% verzadiging. Daarnaast bleek de dichtheid van de bodem een rol te spelen. Voor specifiek deze grond gold een compactie van 12% bij een initiële dichtheid van 1.5 Mg/m^3 , en een compactie van 4% bij een initiële dichtheid van 1.7 Mg/m^3 . Ook dit verband was omgekeerd lineair met een bijna perfecte correlatie. Met behulp van aanvullend literatuuronderzoek trekt men uit deze proeven de conclusie dat bij een snel toenemende verzadiging de mate van wrijving tussen de bodemdeeltjes zo klein wordt dat de contactpunten (veelal de hoeken van de zand- en siltkorrels) langs elkaar gaan glijden. Vermoedelijk neemt dit fenomeen af naarmate er meer lutum in de bodem aanwezig is, omdat de kleiplaatjes zich als 'cement' tussen de zand- en siltkorrels gedragen.

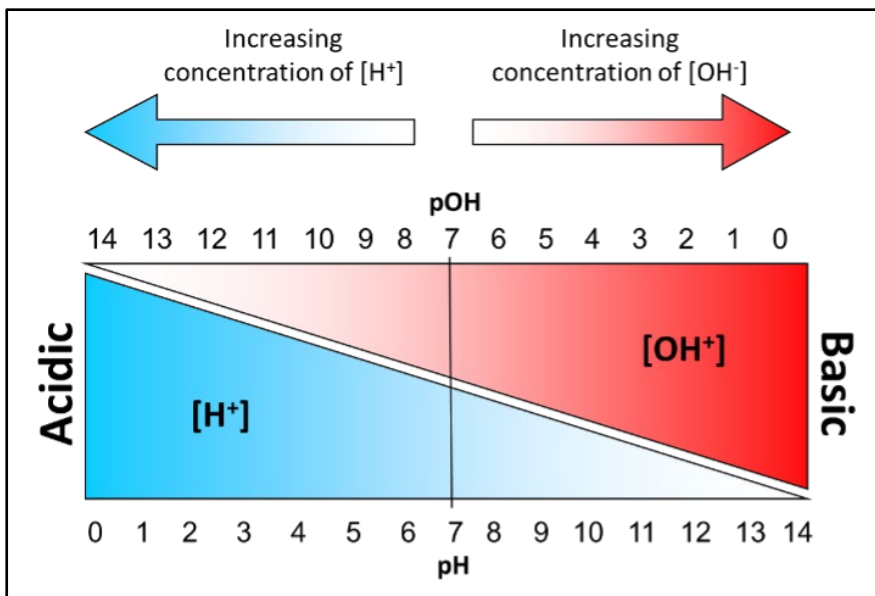
Samenvattend: Inundatie met zoet water op kleigronden kan het poriënvolume zowel vergroten als verkleinen, dit effect is sterk afhankelijk van het dominante mineralentype en het soort kation dat in de hoogste mate aanwezig is. Bij inundatie van kleigronden met zout water (veel Na^+ -kationen) is er veel risico op verslapping omdat de kleicomplexen uit elkaar vallen. Hoe lichter de grond hoe meer kans op compactie vooral als de inundatie start op ingedroogde grond. Door vanuit het laagste punt het water langzaam op te zetten (voor het uit de grond 'duwen' van de aanwezige zuurstof), wordt het risico op compactie waarschijnlijk al sterk verkleind.

3.2 Chemisch

Naast invloed op de bodemtextuur hebben de omstandigheden zoals die bij inundatie ontstaan (zuurstofloosheid en volledige verzadiging met water) ook een sterke invloed op de bodemchemie. Om de verschillende chemische processen goed te begrijpen, is enige kennis van de invloed van de zuurgraad (pH), het redoxpotentiaal (Eh) en de Cation Exchange Capacity (CEC) vereist, daarom worden deze begrippen eerst kort toegelicht.

3.2.1 Zuurgraad (pH)

De pH is een maat voor de zuurgraad van water en wordt berekend aan de hand van de concentratie waterstofionen (H^+ , Afb. 1). De pH wordt uitgedrukt op een logaritmische schaal en loopt van 0-14, waarin 0 = sterk zuur en 14 = sterk basisch, met water als neutraal in het midden ($\text{pH} = 7$). Omdat het een logaritmische schaal betekent een toename in de pH van één punt dus een 10-voudige toename van het aantal H^+ -ionen. Een toename van het aantal H^+ -ionen leidt tot een afname van de zuurgraad op de pH-schaal (verschuiving richting pH 0). De tegenhanger van het H^+ -ion is het waterstofhydroxide-ion (OH^-). De vorming van OH^- -ionen verbruikt H^+ -ionen, waardoor het aantal H^+ -ionen altijd daalt als het aantal OH^- -ionen stijgt. Een toename van het aantal OH^- -ionen leidt tot een toename van de zuurtegraad op de pH-schaal (verschuiving richting pH 14). Om de pH van een bodem te bepalen wordt een extractie gemaakt met water (H_2O), calciumchloride (CaCl_2) of kaliumchloride (KCl). Met name tussen de bepaling in een extra met water en een extractie met kaliumchloride kan behoorlijk verschil zitten, soms een heel punt. Het dient opgemerkt te worden dat de geraadpleegde bronnen zelden aangaven welke extractie-methoden zij hebben gebruikt, hier moet rekening mee worden gehouden bij het trekken van conclusies op basis van de hier verzamelde informatie.



Figuur 1 Schematische weergave van het concept van de pH-schaal (onderaan), de pOH-schaal (bovenaan) is voor dit rapport niet van belang. Overgenomen van: www.chegg.com

Ponnamperuma (1972) beschrijft het effect van pH op onder water staande bodems als volgt: Alle van nature voorkomende chemische, reducerende reacties verbruiken H^+ -ionen. Wanneer bodems onder water komen te staan, neemt de pH aanvankelijk iets af door de accumulatie van koolstofdioxide (CO_2), geproduceerd door respiratie van aerobe micro-organismen. Vervolgens verschuift de pH van zowel zure ($pH < 7$) als basische ($pH > 7$) bodems richting neutraal ($pH = 7 \pm 1$). De oxidatie/reductie van ijzer (Fe) en mangaan (Mn) spelen hierbij een belangrijke rol, die verderop toegelicht wordt. Tenzij een bodem zeer arm is in ijzer, is de rol van ijzer in het proces veel groter dan die van mangaan, omdat het gehalte ijzer in de meeste bodems vaak hoger is dan dat van mangaan.

3.2.2 Redoxpotentiaal

Het redoxpotentiaal (Eh/pe), ook wel het reductie-/oxidatiepotentiaal genoemd, is een maat voor de uitwisseling van elektronen (de negatief geladen deeltjes in een atoom, e^-) tussen verschillende stoffen (Afb. 2). Het redoxpotentiaal wordt aangeven in Volt (V) of in milliVolt (mV). Merk op dat tussen deze twee manieren van weergeven een factor 1000 zit.

De stof in de uitwisselingsreactie die elektronen afstaat heet de reductor (deze wordt dus positiever geladen, want deze staat negatief geladen deeltjes af). De stof die de elektronen opneemt heet de oxidator (deze wordt dus negatiever geladen, want neemt negatief geladen deeltjes op). Na de uitwisseling is de reductor geoxideerd en de oxidator gereduceerd.

Over de invloed op het redoxpotentiaal van onder water staande bodems schrijft Ponnamperuma (1972) het volgende: Onder water staande bodems kenmerken zich door een laag redoxpotentiaal (-0.4 tot 0.2 V oftewel 200 tot -400 mV). Het redoxpotentiaal van een goed gedraineerde bodem zit rond de 0.3 tot 0.8 V, oftewel 300 tot 800 mV. Deze redoxpotentialen zijn een afspiegeling van hun respectievelijk gereduceerde en geoxideerde conditie.

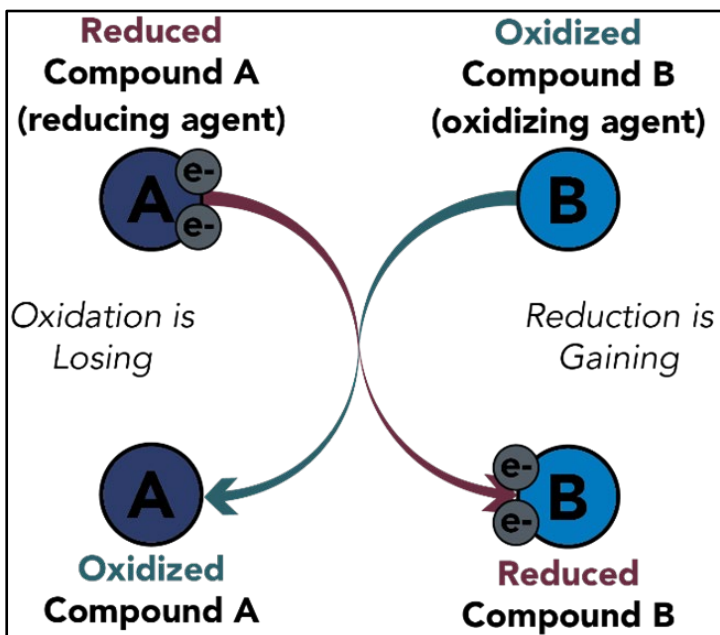
De mate van daling van het redoxpotentiaal is in sterke mate afhankelijk van de soort en hoeveelheid OS, de temperatuur, en de duur van het onder water staan. Organisch materiaal is in de bodem de belangrijkste bron van elektronen en vormt het merendeel van de reductiecapaciteit (Husson, 2013). Gronden die veel makkelijk afbreekbaar organisch materiaal bevatten, verbruiken veel zuurstof, waardoor organische stoffen worden gevormd die reducerende eigenschappen bezitten. Hierdoor dalen zowel de redoxpotentiaal als de pH van de grond. De aanwezigheid van verse OS versnelt de daling van het redoxpotentiaal tot op zekere hoogte, de aanwezigheid van nitraat (NO_3^-) vertraagt het.

Bodems rijk aan actieve OS ($OS > 3\%$) bereiken binnen 2 weken al potentiële redoxpotentialen van -200 tot -300 mV, tenzij ze sterk verzuurd zijn, in welk geval de hoge concentratie aan waterstofionen (H^+) een deel van de makkelijk uitwisselbare elektronen opneemt en daarmee de daling van het redoxpotentiaal vertraagt.

Cho & Ponnamura (1971) schrijven verder dat de sterkste afname van het redoxpotentiaal optreedt bij 25 °C. In de meeste bodems bereikt het redoxpotentiaal een stabiel minimum na ongeveer 12 weken bij een temperatuur tussen de 15 – 45 °C.

Wat voor het begrip van het inundatieproces van bijzonder belang is, is het volgende:

Hoe sterker negatief het redoxpotentiaal, hoe makkelijker metalen elektronen (e^-) opnemen en in oplossing komen. Dit proces verbreekt daarbij de bindingen die de metalen hebben met eventuele moleculen zoals zuurstof en fosfor.



Figuur 2 Schematische weergave van het concept van redox-reacties. Merk op dat de reductor (stof A) elektronen afstaat en geoxideerd wordt, terwijl de oxidator (stof B) elektronen opneemt en dus gereduceerd wordt. Overgenomen van: www.mavenwe.com

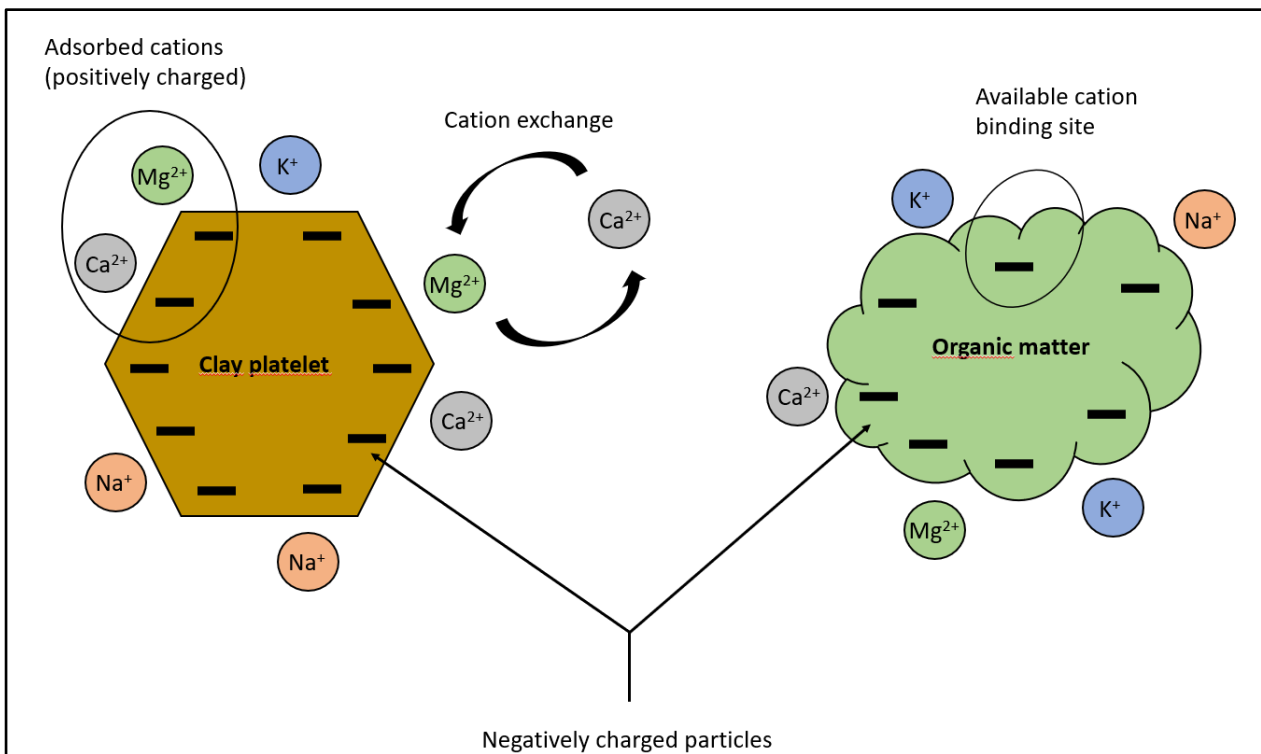
3.2.3 (Total) Cation Exchange Capacity (TCEC/CEC)

Deze term laat zich in het Nederlands vertalen als de (Totale) Kationen Uitwisselings Capaciteit. Aangezien ook in de meeste bodemanalyses van Nederlandse laboratoria de Engelse variant van de term wordt gebruikt (dus CEC), wordt deze ook hier gebruikt. De termen TCEC en CEC worden soms door elkaar heen gebruikt, en ook niet alle onderzoeksinstituten gebruiken ze op dezelfde wijze. De Total Cation Exchange Capacity (TCEC of TEC) geeft, zoals de naam al zegt, aan hoeveel bindingsplaatsen voor kationen er in totaal in een gegeven bodemonmonster zijn. De CEC geeft in de meeste gevallen de bezetting aan met 'basische' kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , en Na^+) en rekent de 'zure' kationen (Al^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ en H^+) niet mee.

CEC wordt gerapporteerd als milliequivalenten per 100 gram grond (meq/100g), of lading per gewicht grond. Milliequivalenten worden gebruikt in plaats van gewicht omdat lading een nuttigere eigenschap is als je het hebt over ionenuitwisseling. Met name lutum (kleiplaatjes) en organische stof zijn belangrijk voor de CEC. Zowel kleiplaatjes als organisch materiaal zijn van nature negatief geladen, waardoor ze kationen uit het bodemvocht aan zich kunnen binden. Veel van deze verbindingen zijn polair en relatief zwak, waardoor ze omkeerbaar zijn. Dit betekent dat de gebonden kationen uitwisselbaar zijn.

Favre et al. (2002) onderzochten de CEC-waarden en oxidatieprocessen in drie verschillende kleibodems en zag een sterke toename van de CEC-waarde (tot bijna een verdrievoudiging) wanneer deze gedurende 100 dagen onder water stonden. Metingen verricht aan de oxidatieprocessen in de bodems toonden aan dat deze toename in CEC vrijwel volledig toe te schrijven was aan de reductie van ijzerkristallen (Fe(III) oxyhydroxiden) en het in oplossing gaan van ijzerlaagjes (in de vorm van ijzer (Fe(II)- en (Fe(III) oxyhydroxiden) op kleiplaatjes.

Verder is dankzij experimenten van Kirk (2004) bekend dat, bij een redoxpotentiaal en een pH zoals te verwachten in onder water staande bodems, de belangrijkste kationen in hoofdzaak in vrije vorm aanwezig zijn. Het betreft dan de kationen van ijzer (Fe^{2+}) en mangaan (Mn^{2+}) welke dus veelal vrij zijn om reacties aan te gaan en in opgeloste vorm voorkomen in het bodemvocht.



Figuur 3 Schematisch weergave van het binden en uitwisselen van kationen. Merk op dat de 'zure' kationen (Al^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ en H^+) niet zijn opgenomen. Een theoretische bodem bestaand uit enkel zand of zavel (zonder lutum of OS) heeft geen bindingsplaatsen voor kationen.

3.2.4 Organische stof (OS)

De afbraak van OS is één van de twee meest voorkomende omzettingen van op koolstof (C) gebaseerde moleculen in de bodem. De tweede is de metabolische omzetting van pyruvaatzuur (pyrodruivenzuur) door micro-organismen, deze wordt verderop in dit hoofdstuk behandeld (§ 3.3.2).

De grootste verschillen in de afbraak van OS tussen droge en onder water staande bodems zijn de afbraaksnelheid en de eindproducten van de afbraak. De afbraaksnelheid is trager in onder water staande bodems dan in veldnatte droge bodems, in het bijzonder in zure bodems. In droge bodems zijn de eindproducten: koolstofdioxide (CO_2), nitraat (NO_3^-), sulfaat (SO_4^{2-}) en afbraakresistente producten (humeuze substanties). In onder water staande bodems zijn de eindproducten: koolstofdioxide, waterstofgas (H_2), methaan (CH_4), stikstofgas (N_2), ammonium (NH_4^+), waterstofsulfide (H_2S) en afbraakresistente producten (humeuze substanties) (Kirk, 2004; Ponnamperuma, 1972).

Over de rol van OS in de regulatie van het redoxpotentiaal schrijft Ponnamperuma (1972) dat het de daling van het redoxpotentiaal kort na het onder water zetten versnelt. De metingen van Sahrawat (1976) lijken dit op basis van een versnelde toename van opgelost ijzer en mangaan te bevestigen. Uit een review (Zhang & Furman, 2021) blijkt echter dat het totale plaatje veel complexer is.

Volgens hen kan OS namelijk zowel dienen als oxidator als wel als reductor; stoffen (die vrijkomen) uit OS kunnen zowel elektronen opnemen als afstaan. Tijdens de anaerobe afbraak van de 'vaste' delen van OS ontstaat Opgeloste Organische Stof (OOS), die vervolgens een rol kan spelen als oxidator en ook makkelijk beschikbaar is voor verdere afbraak door bacteriën.

Alewell et al. (2008) onderzochten de rol van OS in gebieden en vennen die van nature grote delen van het jaar onder (zoet) water staan, op drie locaties met een hoog gehalte OS en drie locaties met een laag gehalte OS. Zij kwamen tot de conclusie dat een hoog gehalte aan OS een snel verbruik geeft van nitraat (NO_3^-) en sulfaat (SO_4^{2-}), waarbij vrij snel ijzer (Fe^{2+}), mangaan (Mn^{2+}), lachgas (N_2O) en methaan (CH_4) vrijkomen. Gasmetingen lieten zien dat in de bovenste 5-10 cm van de bodem in de OS-rijke vennen er nog voldoende zuurstof aanwezig is om denitrificatie te voorkomen. In de lagen daaronder nam de methaanproductie stapsgewijs toe. Een groter gehalte aan bacteriën dat de OS aeroob afbreekt en hierbij een elektron acceptor nodig heeft ligt daaraan ten grondslag.

Een laag initieel gehalte aan OS veroorzaakt een ander verloop van de anaerobe afbraak en ook op minder lage diepten, waarbij veel koolstofdioxide (CO_2), lachgas (N_2O) en zeer hoge methaan-concentraties voorkomen. De onderzoekers wijten dit aan een gebrek aan elektron-donoren, veroorzaakt door de lage hoeveelheden OS. Dit sluit aan bij de waarnemingen van Katyal (1977) die na de toevoeging van verse OS een versnelde CO_2 piek en verhoogde concentraties van opgelost ijzer en mangaan waarnam. Hij zag na toevoeging van verse OS ook een versnelde daling van het redoxpotentiaal, vermoedelijk doordat de aerobe bacteriën die de verse OS afbraken in hoog tempo de nog aanwezige zuurstof verbruikten. Gelet op de productie van broeikasgassen is een voldoende hoog initieel OS-gehalte gunstiger, omdat hiermee de productie van lachgas en methaan verminderd worden.

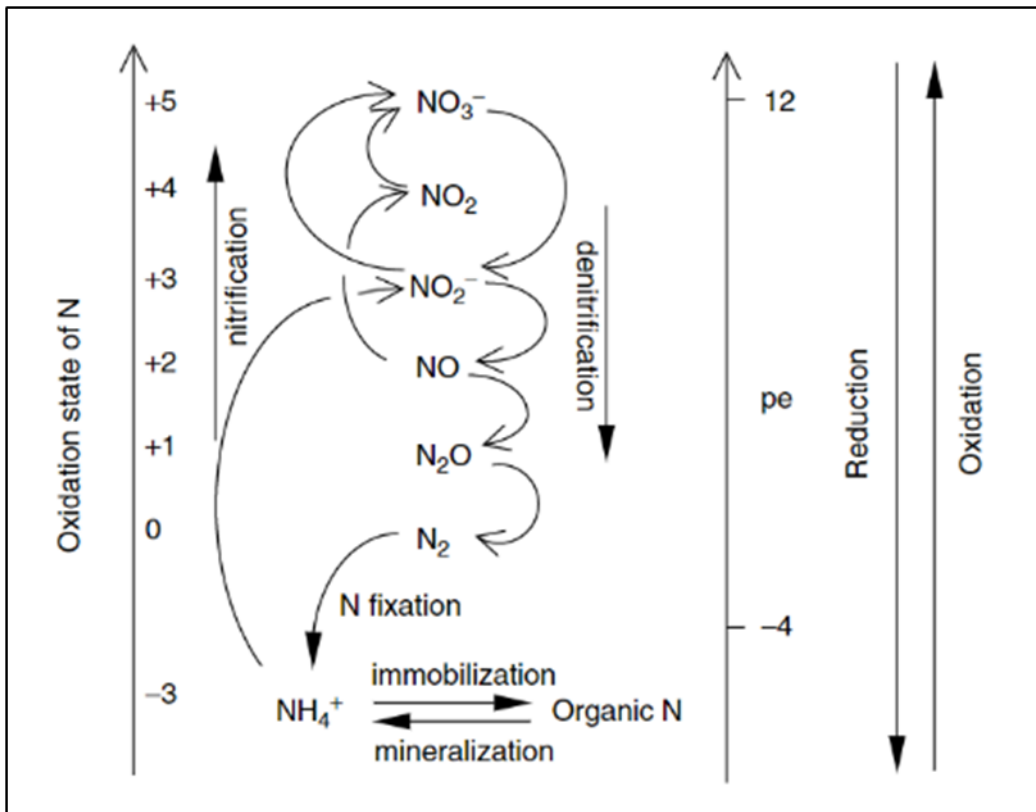
3.2.5 Macronutriënten

3.2.5.1 Stikstof (N)

Stikstof speelt op verschillende wijzen een belangrijke rol in het inundatieproces. Ten eerste speelt het een rol bij het verlagen van het redoxpotentiaal, en zoals eerder in dit hoofdstuk aangegeven (§3.2.2) vertraagt stikstof in de vorm van nitraat (NO_3^-) het dalen van het redoxpotentiaal. In de bodem is zuurstof (O_2) de sterkste elektronenacceptor, gevold door nitraat. Volgens Ponnamperna (1972) stabiliseert de aanwezigheid van nitraat het redoxpotentiaal op ongeveer 200 mV. In bodems met een hoog nitraatgehalte (> 275 ppm) kan nitraat voor verscheidene weken de rol van zuurstof als dominante elektron acceptor overnemen. Voor een hectare grond met een bouwvoor van 25 cm zou dit echter neerkomen op ruim 776 kg nitraat per hectare, een situatie die in de praktijk dus nooit zal spelen in Nederlandse landbouwgronden.

Ten tweede speelt stikstof een rol in de vorming van stikstofgassen die vrij komen uit onder water staande bodems. De processen die hieraan ten grondslag liggen, worden uitgelegd aan de hand van onderstaande afbeelding (Afb. 4) (Kirk, 2004). Uitgaande van nitraat (NO_3^-) dat zich in het zuurstofloze deel van de bodem bevindt, kan het proces van nitrificatie niet plaatsvinden, omdat hier zuurstof voor nodig is. Er vindt dus vrijwel uitsluitend denitrificatie plaats, een proces waarbij nitraat, al dan niet met als tussenstap nitriet (NO_2^-), door anaerobe bacteriën wordt omgezet tot stikstofoxide (NO), distikstofmonoxide (lachgas, N_2O) en stikstofgas (N_2).

De stikstof die is vastgelegd in organische stof (N_{org}) wordt voor een klein deel vastgelegd in de groei van anaerobe bacteriën. Het merendeel van de stikstof mineraliseert anaeroob tot ammonium (NH_4^+) wat diffundeert naar het meer zuurstofrijke oppervlakte water of via de zogenaamde Anammox reacties (door bacteriën gemedieerde oxidatie van ammonium) wordt omgezet in stikstofoxide (NO), distikstofmonoxide (lachgas, N_2O) en stikstofgas (N_2).

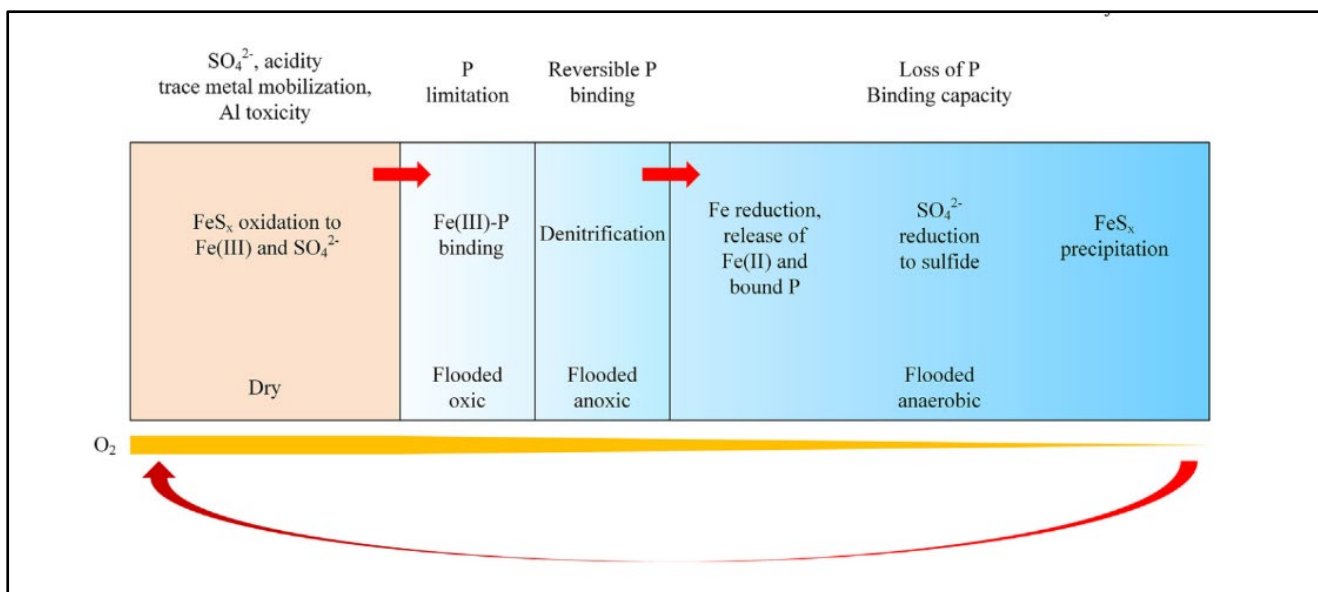


Figuur 4 Schematische weergave van de transformatie van nitraat op basis van het redoxpotentiaal (pe). Uit: (Kirk, G., 2004)

Stikstof die als ammonium in het meer zuurstofrijke oppervlaktewater terechtkomt, kan daar ofwel vervluchtigen als ammoniakgas (NH_3), of door bacteriën op de overgang van bodem naar water ook weer deels genitrificeerd worden tot nitriet en vervolgens tot nitraat, waardoor het deels opnieuw de cyclus in gaat. De vorming van ammoniakgas uit Nederlandse landbouwbodems is echter onwaarschijnlijk. Het vrijkomen van ammoniakgas wordt vrijwel uitsluitend waargenomen in zoetwatermoerassen, waarin enorme hoeveelheden OS aanwezig zijn. Na 12 weken of meer onder water is echter wel degelijk een groot deel van de stikstof in enige vorm van gas vervluchtigd, ook in landbouwgronden. Dit sluit aan bij de waarnemingen van Deenik et al. (2013) in natte teelt van Taro, een aronskelkachtige plant met zetmeelrijke wortelstok. Met name de stikstof die in minerale vorm aanwezig is, en stikstof die eventueel met het inundatiewater meekomt draagt sterk bij aan het deel dat uiteindelijk vervluchtigt.

De Jong et al. (2020) namen monsters van de toplaag (0-10 cm) van oude veenweiden in Nederland (omgeving Utrecht) waarvan 3 rijk aan ijzer en 1 arm aan ijzer. Ze incubeerden deze monsters bij 15 °C voor 1 dag, 2 weken, 6 weken, 12 weken of 69 weken en verrichtten op deze momenten in het inundatieproces metingen aan de gas- en nutriëntensamenstelling. Zij zagen dat nitraat zeer snel afnam in alle bodems, de concentratie ervan was binnen 2 weken onder de detectiegrens. Tegelijkertijd zagen ze een toename van de concentratie in oplossing zijnde ammonium, welke piekt na 12 weken inundatie en daarna langzaam afneemt. Dit geeft waarschijnlijk het punt aan waarop de makkelijk beschikbare stikstof is opgebruikt en de stofwisselingsprocessen een stabiele fase ingaan waarin restproducten van fermentatie worden gerecycled in samenhang met een zeer trage verdere afbraak van de overgebleven, meer recalcitrante OS.

3.2.5.2 Fosfor (P)



Figuur 5 Schematische weergave van de rol van ijzer in het vastleggen van fosfaat en zwavel onder verschillende gehalten van zuurstof (O₂). Merk op dat de rol van organische stof, mangaan en aluminium niet in deze afbeelding zijn meegenomen. Uit: (Zhang & Furman, 2021)

Fosfor, en de daarvan opgeloste verbindingen zoals die voorkomen in water, is in de bodem (Afb. 5) een heel belangrijke nutriënt voor zowel plantaardig als microbiel leven. Ponnampereuma (1972) en Kirk (2004) zijn eenduidig in hun beschrijving van de beschikbaarheid en transformatie van fosfaat in onder water staande bodems. De hoeveelheid fosfaat die vrij in oplossing is (PO₄³⁻, HPO₄²⁻ of H₂PO₄⁻), neemt aanvankelijk toe, bereikt een bepaald plateau en neemt daarna af.

In neutrale en basische bodems is na het bereiken van het juiste redoxpotentiaal (ca. -180 mV) binnen enkele weken een afname te zien. Bij (licht) zure bodems kan het gehalte oplosbaar fosfaat aanvankelijk toenemen, om vervolgens in de loop van verscheidene maanden af te nemen. Deze aanvankelijke toename is te wijten aan het vrij in oplossing komen van fosfaat uit het kleihumuscomplex.

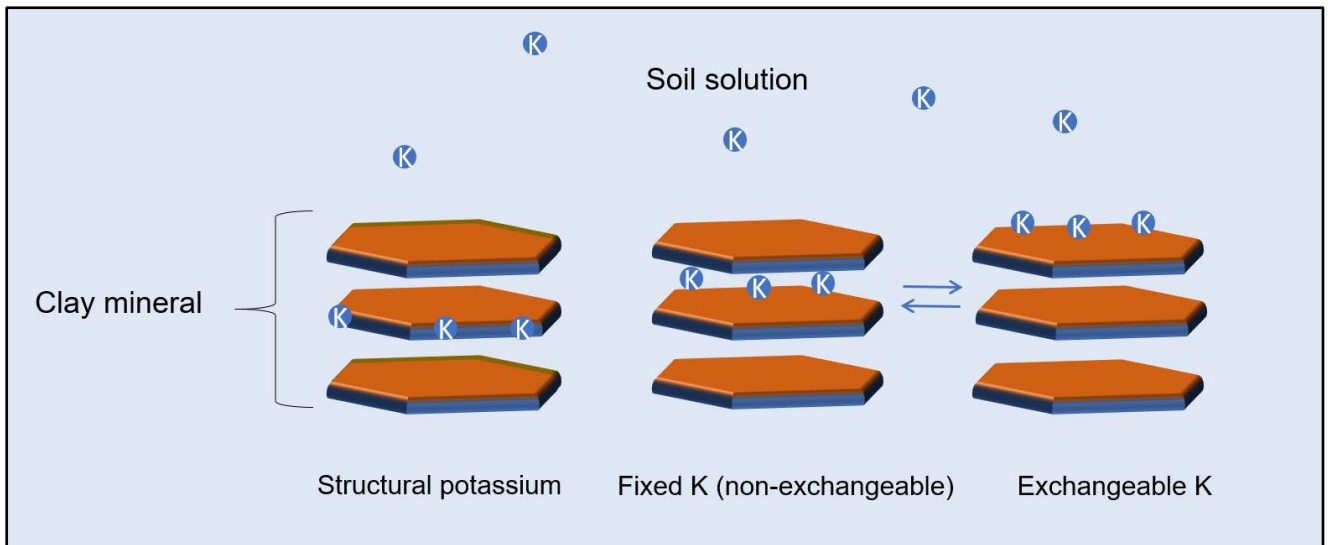
Fosfaat komt vrij door verbreken van verbindingen met verschillende materialen: ijzerkristallen (Fe(III) oxyhydroxiden) waaraan fosfaat gebonden is, calcium (vooral in basische bodems), kleiplaatjes, organische chelaten (cationbindende moleculen van organische oorsprong), en bij de mineralisatie van organische stof.

De daarop volgende afname wordt veroorzaakt door opname door zwak-gestructureerde ijzerkristallen (Fe(II) oxyhydroxiden), resorptie aan kleiplaatjes, en diffusie naar zuurstofrijker oppervlaktewater, van waaruit het weer neerslaat als ijzerfosfaat (FePO₄). Met name in zure bodems kan binding aan aluminium (Al) ook optreden in de vorm van aluminiumfosfaat (AlPO₄).

Het snel opdrogen en daardoor heroxideren van een bodem na inundatie kan ervoor zorgen dat fosfaat die uit verschillende bronnen (dus moeilijk en makkelijk oplosbare) is vrijgekomen, in een zeer slecht oplosbare vorm wordt vastgelegd, namelijk in ijzerkristallen (Fe(III) oxyhydroxiden) (Ponnampereuma, 1972; Zhang & Furman, 2021). Dit risico is vooral aanwezig in bodems die relatief rijk zijn aan ijzer. Mangaan (Mn) en aluminium (Al) kunnen deze rol ook vervullen en zouden bij een voldoende hoge pH (bij een zuurtegraad waarbij ze niet in oplossing gaan en fytotoxiciteit veroorzaken) potentieel ook in redelijke hoeveelheden in Nederlandse landbouwbodems voor kunnen komen.

De Jong et al. (2020) namen monsters van de toplaag (0-10 cm) van oude veenweiden in Nederland (omgeving Utrecht) waarvan 3 rijk aan ijzer en 1 arm aan ijzer. Ze incubeerden deze monsters bij 15 °C voor 1 dag, 2 weken, 6 weken, 12 weken of 69 weken en verrichtten op deze momenten in het inundatieproces metingen aan de gas- en nutriëntensamenstelling. Ze zagen hierbij een toename van de concentratie in oplossing zijnde fosfor, welke sterk stijgt in de eerste 6-12 weken inundatie en daarna in 2 gronden langzaam blijft toenemen, en in de andere 2 gronden stabiel blijft.

De gronden waarin het na 12 weken nog bleef toenemen waren zeer rijk aan OS (40 en 49%), wat voor akkerbouwgronden niet representatief is. De grond die voor akkerbouwgrond het meest representatief was (6,4% OS) bleef na een kleine stijging in de eerste 6 weken stabiel.



Figuur 6 Schematische weergave van de verschillende vormen van kalium in het klei complex. Overgenomen van: www.cropaia.com

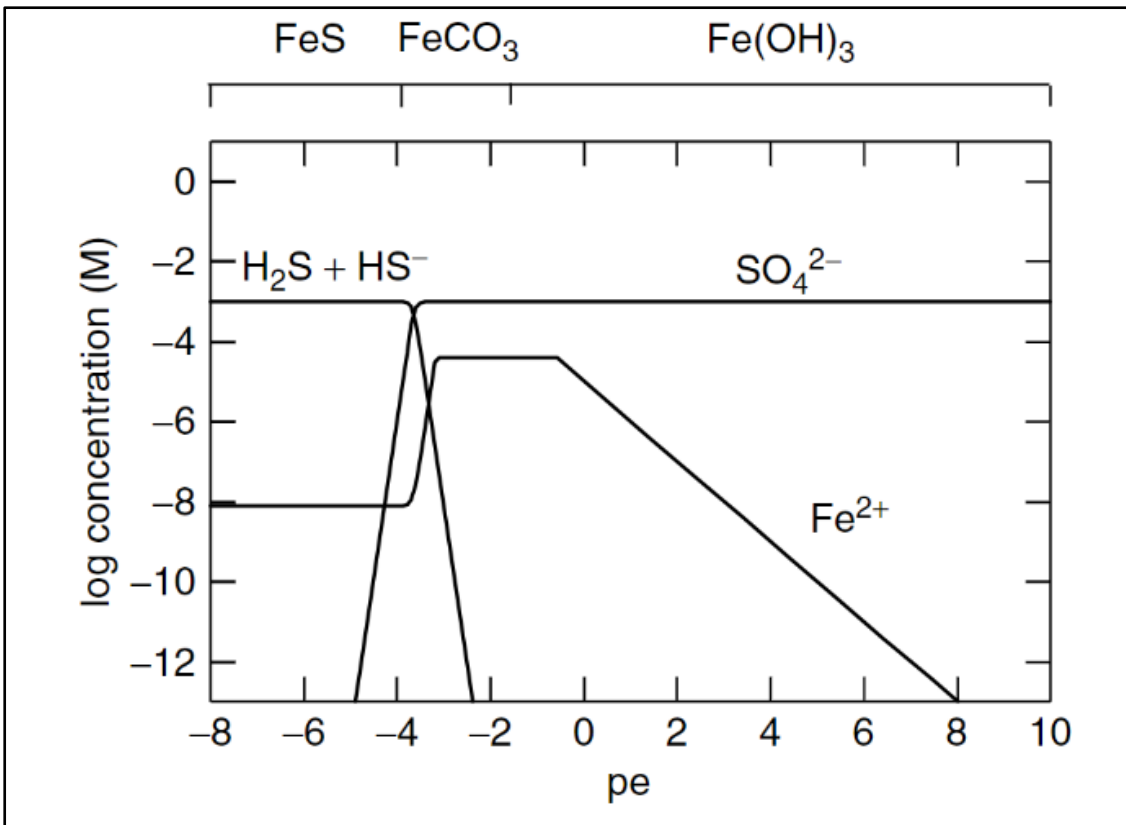
3.2.5.3 Kalium (K)

Over de rol van kalium in onder water staande bodems is relatief minder bekend dan over stikstof en fosfaat. Majumder et al. (2018) onderzochten de veranderingen in de verschillende vormen van kalium (Afb. 6) in een kleihoudende zavelgrond (32% lutum) bij verschillende perioden van onder water staan en opdrogen. Zij onderscheidden hierbij structurele kalium (kalium als onderdeel van complexe minerale verbindingen en gesteenten), gefixeerde/niet-uitwisselbare kalium (kalium die bijvoorbeeld tussen kleiplaatjes vastligt) en uitwisselbare/wateroplosbare kalium (kalium aan de buitenzijde van kleiplaatjes).

Zij zagen over het algemeen een afname van het in water opgeloste kalium, waarvan het gehalte na 90 dagen onder water met ongeveer 1/3^e afnam. Het aandeel uitwisselbare kalium fluctueerde echter, het was hoger wanneer de grond onder water stond en lager wanneer de grond weer opdroogde maar nam uiteindelijk altijd af. Dit kan verklaard worden door het vervangen van kaliumionen (K^+) door calciumionen (Ca^{2+}) aan het kleihumuscomplex. Veel van deze vrijkomende kalium spoelt echter uit of vormt bij het opdrogen van de grond weer verbindingen die minder goed oplosbaar zijn. Dit was ook terug te zien in de hoeveelheid niet-uitwisselbaar kalium, die aanvankelijk afnam maar na verloop van tijd flink toenam. Naveen & Moossa (2019) vonden gelijksoortige effecten op kalium in een leemhoudende zandgrond die 60 dagen onder water werd gezet.

De waarnemingen worden voor beide grondsoorten ook ondersteund door de eerdere resultaten van Katyal (1977), die in de loop van 112 dagen zowel in een zand- als in een kleigrond eerst een toename en op termijn een afname zag van de hoeveelheid in water opgeloste kalium.

3.2.5.4 Zwavel (S)



Figuur 7 De voorkomende concentraties van verschillende vormen van zwavel en ijzer bij een bepaalde redoxpotentiaal (pe). Uit: (Kirk, G., 2004)

De rol van zwavel in onder water staande bodems is relatief recent meer opgehelderd. Ponnamperna (1972) meldt vooral de reductie van zwavel in opgeloste vorm (SO_4^{2-}) naar waterstofsulfide (H_2S) en de reactie met en daarop volgende neerslag ervan met verschillende metalen.

De beschrijving van de processen waar zwavel bij betrokken is in onder water staande bodems van Kirk (2004) is een stuk uitgebreider (Afb. 7). Na de reductie van sulfaat (SO_4^{2-}) naar waterstofsulfide (H_2S) ontstaan er vervolgens ook hydrosulfide (HS^-) en uiteindelijk zelfs elementaire, opgeloste zwavel (S^{2-}).

In de praktijk is er in bodems meer dan voldoende slecht gestructureerd ijzer (Fe(II) oxyhydroxiden) aanwezig. Dit type ijzeroxide komt niet makkelijk meer in oplossing, maar heeft nog niet de kristalstructuur van (Fe(III) oxyhydroxiden) (roest) aangenomen. Het is dan ook meer reactief en reageert met de elementaire zwavel en hydrosulfide tot ijzersulfiden (FeS_x), welke neerslaan. Er blijft slechts een (zeer) klein aandeel opgeloste fosfaat en hydrosulfide achter in het bodemvocht, waardoor het bijzonder lastig is om verschillen te meten onder praktijkomstandigheden.

De Jong et al. (2020) namen monsters van de toplaag (0-10 cm) van oude veenweiden in Nederland (omgeving Utrecht) waarvan 3 rijk aan ijzer en 1 arm aan ijzer. Ze incubeerden deze monsters bij 15 °C voor 1 dag, 2 weken, 6 weken, 12 weken of 69 weken en verrichtten op deze momenten in het inundatieproces metingen aan de gas- en nutriëntensamenstelling. Zij zagen dat de in oplossing zijnde zwavel vooral in de eerste 6 weken toeneemt, piekt en daarna stabiel blijft of afneemt (bij de hoogste concentraties, 700 $\mu\text{mol/L}$). De grond die voor akkerbouwgrond het meest representatief was (6,4% OS) piekte na 6 weken op 40 $\mu\text{mol/L}$, daalde licht naar ongeveer 30 $\mu\text{mol/L}$ en bleef daarna stabiel.

3.2.5.5 Magnesium (Mg)

De invloed van inundatie op de beschikbaarheid en type verbindingen van magnesium is veel minder goed onderzocht als die van stikstof, fosfaat, kalium en zwavel. Omdat het echter wel in veel onderzoeken standaard wordt meegenomen bij de bodemvruchtbaarheidsanalyses zijn er wel aanwijzingen voor.

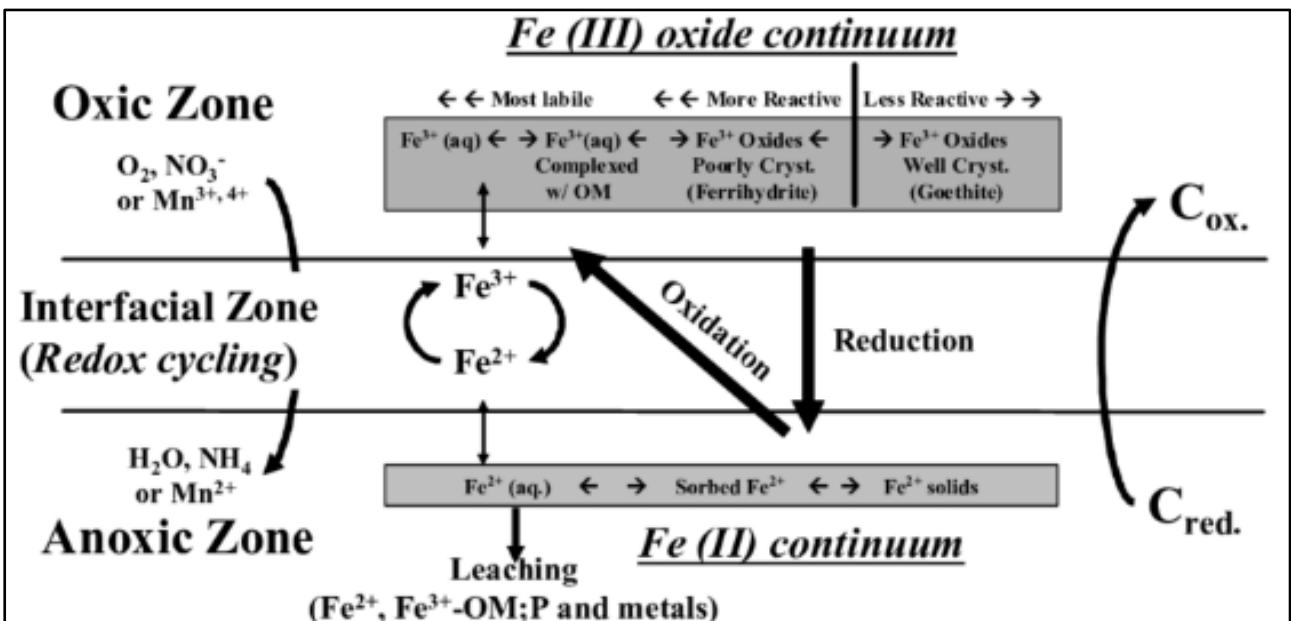
In een grote praktijkproef (Visser et al., 2021) werden de bodemeigenschappen, waaronder bodemvruchtbaarheid, -textuur en vochtvasthoudend vermogen van twee geïnundeerde percelen gemeten. Eén van de percelen was met zoet water (perceel NM), het andere met zout water (perceel WM) gedurende respectievelijk 11 en 15 weken geïnundeerd. Het betrof percelen met respectievelijke de bodemtypen zavel en zeer lichte zavel, 1.8 en 1.4 % OS (organische stof), en afslibbaarheidsgetallen van 11 en 7. Voor geen van beide percelen was extra organische stof aangevoerd. In beide percelen neemt de hoeveelheid magnesium die in oplossing kan worden gebracht toe (in mg/kg: NM-perceel 38 voor inundatie, 101 direct na inundatie, en 74 het volgend voorjaar; WM-perceel 39 voor inundatie, 148 direct na inundatie, en 104 het volgend voorjaar).

Dit sluit aan bij het werk van Chowdhury et al. (2021) waarbij op grote schaal (ruim 1400 velden, verspreid over Bangladesh) de bodemvruchtbaarheid van droge en natte rijstteeltpercelen werd onderzocht. De hoeveelheid magnesium was altijd significant hoger in de percelen waarop natte rijstteelt werd uitgevoerd. Ook Drzymala et al. (2000) vonden na 30 dagen inundatie (zonder extra toegevoegde OS maar er stond wel gras op de betreffende percelen) een voor de betreffende regio hoge concentratie beschikbaar magnesium in de bodem. Helaas was in dit onderzoek de bodem alleen na inundatie bemonsterd.

Magnesium lijkt zich dus in veel opzichten te gedragen zoals veel andere metalen, het komt extra in oplossing tijdens de inundatie. Opvallend aan magnesium is dat het ook nog een redelijke tijd na inundatie in makkelijk oplosbare vormen aanwezig lijkt te zijn, zie proeven van (Visser et al., 2021).

3.2.6 Micronutriënten

3.2.6.1 Ijzer



Figuur 8 Het voorkomen van de verschillende vormen van ijzer onder invloed van zuurstofniveau en redoxpotentiaal. Merk op dat links in de afbeelding ook de rol van zuurstof (O_2), nitraat (NO_3^-) en twee redoxstadia van mangaan ($Mn^{3/4+}$) zijn meegenomen. Uit: (Thompson, 2005)

Zoals reeds toegelicht bij de onderdelen 'Redoxpotentiaal' en 'CEC' van dit hoofdstuk speelt ijzer een zeer brede rol bij het inundatieproces (Afb. 8). Wanneer zuurstof en nitraat zijn verbruikt als terminale elektronenacceptoren en het redoxpotentiaal sterker negatief wordt, gaan metalen steeds makkelijker elektronen (e^-) opnemen, wat leidt tot de reductie van ijzerkristallen (roest) ($Fe(III)$ oxyhydroxiden) en het in oplossing gaan van ijzerlaagjes (in de vorm van ijzer ($Fe(II)$ - en ($Fe(III)$ oxyhydroxiden) op kleiplaatjes. Dit brengt niet alleen een sterke toename van de CEC tot stand, maar maakt ook plaatsen vrij in het klei-humuscomplex voor andere kationen om te binden (Favre et al., 2006; Thompson, 2017). Bij het weer opdrogen en oxideren van de bodems kan ijzer bindingen aangaan met anionen zoals fosfaat, die daarna lastig weer in oplossing komen.

3.2.6.2 Mangaan

Mangaan speelt een soortgelijke rol als ijzer in onder water staande bodems (Desiredy & Pothanamkandathil, 2021; Gotoh & Patrick, 1974), maar heeft een veel geringere invloed omdat het in vele malen lagere hoeveelheden aanwezig is in de bodem.

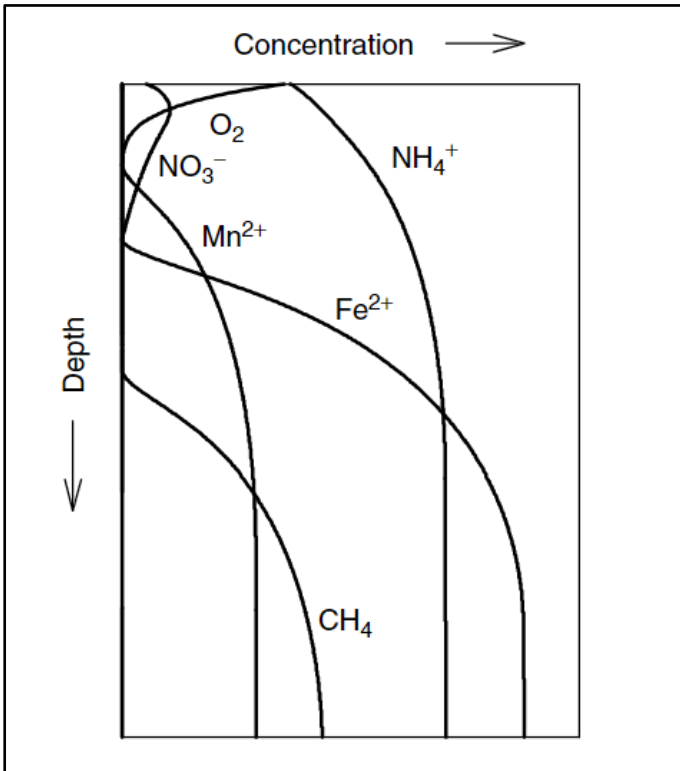
3.2.6.3 Borium, koper, zink, lood en overige zware metalen

Aan de rol van borium, koper, zink, lood en overige zware metalen in onder water staande bodems is vrijwel alleen onderzoek verricht in situaties waarin de bodem sterk met deze metalen vervuild was. Gezien hun gedrag als kationen zullen ze een soortgelijke rol als ijzer en mangaan vervullen. Deze metalen zullen dus in opgeloste vorm in potentieel toxische concentraties aanwezig kunnen zijn gronden die geïnundeerd worden. Dit vermoeden wordt (weliswaar voor rijstteelt) bevestigd door het werk van Chowdhury et al. (2021) waarbij op grote schaal (ruim 1400 velden, verspreid over Bangladesh) de bodemvruchtbaarheid van droge en natte rijstteeltpercelen werd onderzocht. In deze inventarisatie waren de concentraties van alle metalen (zowel de essentiële als de zware) altijd significant hoger in bodems waarop natte rijstteelt werd uitgevoerd. Aangenomen wordt dat Nederlandse landbouwbodems doorgaans niet in ernstige mate met zware metalen zijn vervuild, waardoor hun bijdrage aan het inundatieproces nihil is.

3.3 Microbiologie

De samenstelling van het microbioom kan sterk verschillen tussen bodems en daardoor is het specifieke effect van inundatie op de bodem deels van het microbioom afhankelijk. Omdat er zo'n hoge mate van diversiteit kan bestaan tussen het microbioom van verschillende bodems richten we ons in dit rapport daarom op de grote lijnen en in het bijzonder op welke groepen micro-organismen bij welke omzettingen van stoffen betrokken zijn tijdens het inundatieproces. De stoffen die deze organismen verbruiken en uitstoten bepalen namelijk de invloed die zij op het inundatieproces als geheel hebben.

3.3.1 Betrokken groepen op basis van redoxpotentiaal



Figuur 9 De meeste voorkomende stoffen die beschikbaar zijn voor elektronenuitwisseling op basis van diepte en redoxpotentiaal. Over het algemeen geldt dat hoe dieper, hoe lager het redoxpotentiaal. Methaan (CH_4) is een restproduct. Uit: (Kirk, 2004)

Voor de stofwisselingsreacties die micro-organismen uitvoeren, zijn stoffen nodig die elektronen kunnen opnemen (oxidatoren). Omdat de concentratie van verschillende oxidatoren verandert met het dalen van het redoxpotentiaal en de diepte in de bodem (Afb. 9), kan de dominante vorm van stofwisseling door micro-organismen in een onder water staande bodem hiernaar worden ingedeeld.

In de bovenste lagen die nog in contact staan met zuurstofrijk water vindt nog aerobe afbraak plaats, waarvoor zuurstof (O_2) wordt verbruikt (Kirk, 2004). In de iets diepere lagen worden nitraat (NO_3^-), ijzer (Fe^{2+}) en mangaan (Mn^{2+}) als oxidatoren gebruikt. In de lager daaronder zijn alleen koolstofdioxide (CO_2) en waterstof (H^+) nog beschikbaar om elektronen op te nemen, en worden de dominante vormen van stofwisseling fermentatie en methanogenese (stofwisseling met methaan (CH_4) als eindproduct).

Inundatie heeft niet alleen effect op pathogenen, maar op de hele bodemgemeenschap. Meercellige schimmels beschikken niet of nauwelijks over de mogelijkheid van anaerobe stofwisseling en dragen dus nagenoeg niet bij aan de afbraak van organische stof (OS) tijdens inundatie. Bacteriën die goed kunnen leven onder anaerobe omstandigheden nemen in dichtheid toe. Elk micro-organisme is aangepast aan specifieke Eh-omstandigheden en kan zich ontwikkelen binnen een bepaald Eh-gebied. Anaerobe bacteriën kunnen zich alleen maar ontwikkelen binnen een heel nauw gebied van lage Eh-waarden, terwijl aerobe bacteriën hogere Eh-waarden vereisen, maar zich wel over een bredere reeks waarden kunnen ontwikkelen (Husson 2013).

De afbraak van OS geschiedt dus door bacteriën, wat onder aerobe omstandigheden koolstofdioxide, nitraat, sulfaat (SO_4^{2-}) en humeuze restsubstanties als eindproducten geeft. Als zuurstof en nitraat niet meer beschikbaar zijn, wordt overgegaan op anaerobe afbraak (fermentatie). Hierbij ontstaan verschillende vetzuren en alcoholachtige stoffen, worden eiwitten gesplitst in aminozuren en koolhydraten tot suikers. Zowel de vetzuren en alcoholachtige stoffen, eiwitten en koolhydraten, worden uiteindelijk afgebroken tot acetaat (azijnzuur) en waterstof.

Het verloop in stofwisselingsprocessen in de loop van de tijd, is onderzocht door Yao et al. (1999) in 16 gronden afkomstig uit 3 verschillende landen (China, de Filipijnen en Italië). Zij kwamen tot het volgende verloop:

- (1) Een reductiefase waarin de anorganische oxidatoren vrij snel worden opgebruikt en de productie van CO_2 maximaal is. Deze fase neemt 19-75 dagen in beslag, al naar gelang de eigenschappen van de bodem.
- (2) Een fermentatie-/methanogenese fase waarbij de productie van methaan maximaal is. Deze fase begint na 2-87 dagen duurt 38-68 dagen.
- (3) Een min of meer stabiele fase waarin (met diverse tussenstappen van omzetting) evenwichtsconcentraties worden bereikt van de restproducten van anaerobe afbraak.

De Jong et al. (2020) namen monsters van de toplaag (0-10 cm) van oude veenweiden in Nederland (omgeving Utrecht) waarvan 3 rijk aan ijzer en 1 arm aan ijzer. Ze incubeerden deze monsters bij 15 °C voor 1 dag, 2 weken, 6 weken, 12 weken of 69 weken en verrichtten op deze momenten in het inundatieproces metingen aan de gas- en nutriëntensamenstelling en het microbiom (met een focus op methaanproducerende/-oxiderende bacteriën en archaea). Zij zagen aan hun metingen dat zowel de productie als het verbruik van methaan na 30 dagen op gang kwam en heel stabiel bleef tot aan het einde van de meetperiode (120 dagen incubatie). Bij de bodem die qua OS-gehalte het dichtst in de buurt kwam van Nederlandse akkerbouwgronden (6.4%) was de maximale productie van methaan 3.5 $\mu\text{mol/mL}$ grond, maar zolang er zwavel, nitriet of nitraat aanwezig waren (die omzetting naar koolstofdioxide katalyseren) was de productie van methaan veel lager (0-1 $\mu\text{mol/mL}$ grond). Van de bacteriën waren vooral de orden *Bacillus* en de *Sphingobacteriales* sterk aanwezig (soms ook de *Betaproteobacteriales*), van de archaea waren het de orden *Bathyarchaeia*, en de *Methanoregulaceae* met daarbij soms de *Methanosaetaceae* en soms de *Woesearchaeia*.

3.3.2 Toxische vetzuren en hun producenten

Zowel Maas (1987) als Runia & Molendijk (2010) schrijven (een belangrijk deel van) de werking van inundatie toe aan het ontstaan van toxische organische vetzuren door fermentatie. Genoemd worden: Huang et al. (2015) namen grond uit een bananenplantage, deden deze in potten (150 gram) samen met 1 of 2% (w/w) stro van mais of luzerne. Een behandeling droog en een met alleen water dienden ter controle, en iedere behandeling werd uitgevoerd met 12 replica's. De potten werden geïncubeerd voor 15 dagen bij 25 °C in een incubator. Elke 2 dagen werd vloeistofchromatografie toegepast om vast te stellen welke organische zuren erin aanwezig waren.

Hun metingen toonden aan dat azijnzuur (11 mM) en boterzuur (13 mM) de meest voorkomende organische zuren waren. Ook propionzuur (1,5 mM) en 3-methylbutaanzuur (3mM) kwamen voor, maar in significant lagere concentraties. Aan het einde van de 15-daagse meetperiode hadden de opbouw van azijnzuur en boterzuur een piek in concentratie laten zien na respectievelijk 6 en 12 dagen. Het 3-methylbutaanzuur was na 15 dagen verdwenen, en het propionzuur leek na 15 dagen nog steeds te stijgen. De opbouw van propionzuur tot concentraties die wel een ziektebestrijdende werking hebben, is op basis van dit experiment dus niet uit te sluiten. Uit een aparte screening die werd uitgevoerd op chlamydosporen van *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* bleek dat azijnzuur, boterzuur, propionzuur en 3-methylbutaanzuur de sterkste dodende werking hadden van de eerder genoemde organische zuren.

Aanvullend werd onderzoek gedaan naar de bacteriegroepen die door inundatie met stro van mais of luzerne het sterkst worden verrijkt (Huang et al., 2019). Op basis van een moleculaire 16S-analyse stelden zij vast dat in 4 bodems met gradaties in OS- en lutumgehalte altijd de bacteriën (op familieniveau) *Ruminococcaceae*, *Clostridiaceae* en *Lachnospiraceae* werden verrijkt.

Uitgaande van de geslachten waarover het meest bekend is binnen deze families (respectievelijk *Ruminococcus* spp., *Clostridium* spp. en *Lachnospira* spp.) is het zeer logisch dat deze families bij veel verschillende gradaties van OS en lutum worden verrijkt. Het zijn allemaal strikt anaerobe bacteriën, ze hebben allemaal de mogelijkheid om OS te verteren en hebben een brede tolerantie voor pH-veranderingen. Binnen deze geslachten komen ook altijd soorten voor die OS afbreken in het spijsverteringsstelsel van herbivoren (Starr et al., 1981).

De geslachten *Ruminococcus* en *Clostridium* bestaan voor een groot deel uit acetogenen, organismen die als deel van hun metabolisme acetaat produceren (Dworkin et al., 2006a). Uit proeven bleek dat acetaat stimulerend werkt voor de groei van veel soorten uit het geslacht *Lachnospira*. Soorten uit dit geslacht zijn verder gespecialiseerd in het afbreken van pectine, en produceren als onderdeel van hun metabolisme methanol (Dworkin et al., 2006b).

Tijdens onderzoek aan het optimaliseren van het fermentatieproces in een microbiële vergister zagen Greses et al. (2021) dat voldoende aanwezigheid van *Lactobacillus* spp. door de productie van melkzuur de ontwikkeling en vermeerdering van *Ruminococcus* spp. nog kan versterken. Melkzuurbacteriën afkomstig uit grond staan breed bekend om hun functie in de afbraak van organische stof door middel van fermentatie en het mediëren van de groei van zowel plantengroei bevorderende als pathogene bacteriën en schimmels (Jaffar et al., 2023).

3.3.3 Het microbiom na inundatie of Anaerobic Soil Disinfestation (ASD)

Bij onderzoek aan de beheersing van *Fusarium* in banaan (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) met inundatie ontdekten Huang et al. (2015) dat de bacteriële geslachten *Coprococcus* spp. en *Symbiobacterium* spp. en de schimmelgeslachten *Chaetomium* spp. en *Penicillium* spp. zich zeer sterk vermeerderden als na behandeling wortellexudaten van bananenplanten aan de bodem werden toegevoegd.

Coprococcus spp. zijn net als *Clostridium* spp. onderdeel van de familie van de *Firmicutes*. Ze zijn ook goede anaerobe verteerders van plantaardig materiaal en produceren daarbij boterzuur, azijnzuur en propionzuur. *Symbiobacterium* spp. zijn beperkt onderzocht, maar hebben vaak in hun genoom de genen die nodig zijn voor de aanmaak van enzymen die ook complexe delen van plantaardig materiaal kunnen afbreken. Ze komen meestal samen met *Bacillus* spp. voor (Huang et al. (2016). *Chaetomium* spp. en *Penicillium* spp. zijn schimmelgeslachten die wereldwijd voorkomen en bekende afbrekers zijn van lignine en (ligno)cellulose.

Huang et al. (2016) ontdekten verder dat bij toepassing van ASD in een kas zwaar besmet met *Rhizoctonia* (*Rhizoctonia solani*, AG niet gespecificeerd), dat na de behandeling en 2 x 25 dagen opkweek van komkommerplanten (*Cucumis sativus*) naast de vaker genoemde geslachten *Ruminococcus* spp. en *Coprococcus* spp. ook de geslachten *Flavisolibacter* spp., *Rhodanobacter* spp. en *Lysobacter* spp. dominant werden in het microbiom. *Flavisolibacter* spp. zijn nog maar beperkt onderzocht, maar werden in één onderzoek geassocieerd met gronden met een lage incidentie van knolvoet (*Plasmodiophora brassicae*) (Saraiva et al., 2020) en bevatten in ieder geval de genen voor een deel van de enzymen betrokken bij het denitrificatieproces. *Rhodanobacter* spp. hebben de genen om de enzymen benodigd voor het volledige denitrificatieproces rond te zetten, en *Lysobacter* spp. staan bekend als potentiële antagonisten (Du et al., 2015).

Van Os (2003) onderzocht de samenstelling van het microbiom in bodems die behandeld waren met een fumigant, met inundatie, waren gesteriliseerd of gesteriliseerd en daarna verrijkt met 1% compost. Ze gebruikte hiervoor 4 primersets (2 voor bacteriën, 2 voor schimmels) en na vermeerdering Denaturing Gradient Gel Elektrophoresis voor het vergelijken van de DNA-bandjes. De onbehandelde, gefumigeerde, en geïnundeerde bodems gaven zeer sterk op elkaar lijkende resultaten, een indicatie dat de dominante microflora in ieder geval grotendeels intact blijft.

Let wel dat middels de gebruikte techniek geen onderscheid konden worden gemaakt in de actieve en niet-actieve delen van het microbiom. De na sterilisatie met compost verrijkt grond had wel een afwijkend microbiom, waarschijnlijk doordat de met de compost geïntroduceerde micro-organismen zich vrij en zonder concurrentie konden uitbreiden.

Kowalchuk et al. (2003) heeft onderzocht welke veranderingen optreden in de microbiële gemeenschap als gevolg van inundatie (8 weken). Hierbij werden de bacterie en schimmel gemeenschap geïdentificeerd door het sequencen van DGGE-banden. De dominante microbiële populaties bleven grotendeels intact, zelfs na een breedwerkende bodembehandeling als inundatie. Desondanks had de inundatiebehandeling wel een effect op de bodemweerbaarheid tegen *Pythium* (zie paragraaf 5.2).

Van Agtmaal et al. (2015) vergeleek met behulp van amplicon sequencing van het 16S fragment de samenstelling van bacteriegemeenschappen in zandgronden die waren blootgesteld aan ASD met de samenstelling in onbehandelde bodems.

Drie maanden nadat de ASD-behandeling was afgerond, was er nog steeds een duidelijk erfeniseffect van de vroegere anaerobe stress op de samenstelling van de bacteriële gemeenschap, met een sterke toename in de relatieve overvloed van het phylum Bacteroidetes en een significante afname van de phyla *Acidobacteria*, *Planctomycetes*, *Nitrospirae*, *Chloroflexi* en *Chlorobi*. Deze verandering in de samenstelling van de bacteriële gemeenschap viel samen met het verlies van de productie van *Pythium*-onderdrukkende bodemvluchtige stoffen (VOC's) en van de onderdrukking van de impact van *Pythium* spp. op de aantasting in hyacint. Een jaar na de behandeling was de samenstelling van de bacteriële gemeenschap in de ASD-bodems gelijk aan die van de onbehandelde bodems.

3.3.4 Bodemdieren/-insecten

Inundatie heeft niet alleen een effect op het microbiële bodemleven, maar ook op de kleine bodemdieren en insecten (macro- en mesofauna), zoals wormen, springstaarten en mijten. Voor de soorten waar informatie over voorhanden was is deze ook opgenomen, hoewel de literatuur overwegend een focus had op wormen.

Plum (2005) onderzocht middels literatuuronderzoek (bronnen van 1948-2004) de reacties van verschillende groepen ongewervelde bodemfauna (slakken, wormen, pissebedden, duizendpoten, miljoenpoten en vlieg- en keverlarven) op overstroming/inundatie. Op basis van deze gegevens werd o.a. onderstaande tabel (Tabel 2) opgesteld over de typen overlevingsstrategieën die verschillende soorten ongewervelde bodemfauna erop nahouden.

Tabel 2 Overlevingsstrategieën van verschillende klassen ongewervelde bodemfauna bij het voorkomen van overstromingen (Naar: Plum, 2005)

Klasse	Horizontale Migratie	Verticale migratie	Fysiologische adaptatie	Aanpassing levenscyclus	Reproductie (voortplanting)
Gastropoda ((Naakt)slakken)	X	X			X
Lumbricidae (Regenwormen)	X	X	X	X	X
Enchytraeidae (Potwormen)		X	X	X	X
Isopoda (Pissebedden)		X			X
Chilopoda (Duizendpoten)				X	X
Diplopoda (Miljoenpoten)		X			
Insectenlarven	X	X	X	X	X

Met name regenwormen en (naakt)slakken proberen actief via horizontale migratie te ontsnappen aan het water, als dat niet lukt proberen ze het net als veel kleinere insecten via verticale migratie in vegetatie en hekwark. Lukt ook dit niet, dan komen alle volwassenen zonder fysiologische adaptaties in principe om, en zal rekolonisatie vanuit aangrenzende gebieden of vanuit speciale overlevingsvormen/eieren moeten plaatsvinden. Wanneer waterstorende lagen in de bodem aanwezig zijn zoeken verschillende wormensoorten deze actief op en kunnen daar overleven zolang het zuurstofniveau voldoende is.

Van de kleipissebed (*Trachelipus rathkii*) welke in Nederland zeer algemeen voorkomt op rivier- en kleigronden is bekend dat deze geïnundeerde gronden snel herkoloniseert. Andere pissebedsoorten verdragen overstrooming en inundatie echter zeer slecht en worden nadien niet meer aangetroffen. De gewone blauwkopworm (*Lumbricus rubellus*) komt ook zeer algemeen in Nederland voor, en kan door zijn voor wormen korte levenscyclus (ca. 74 dagen van ei tot volwassen worm) ook relatief snel herkoloniseren.

De eieren van veel soorten duizend- en miljoenpoten overleven natuurlijke overstroomingen in de winter, en inundatie gedurende twee weken is beschreven als een effectieve bestrijdingsmethode in Californië (Michelbacher, 1938). Volwassen duizend- en miljoenpoten zijn zeer gevoelig voor overstrooming en inundatie, en komen om als ze niet tijdig kunnen migreren naar drogere grond. Sommige soorten duizend- en miljoenpoten kunnen zich ook asexueel voorplanten of via fragmentatie, en kunnen op die manier vanuit lage aantallen vrij snel een populatie opbouwen (Plum, 2005).

Van de slakken waar de meeste informatie over bekend was, kwamen 3 van de 4 soorten überhaupt alleen voor op zeer natte plaatsen als moerassen en poelen. Alleen de plompe dwergslak (*Carychium minimum*), welke algemeen voorkomend is in Nederland hoewel minder op de Noord- en Zuidoostelijke zandgronden, komt ook onder drogere omstandigheden voor. Na een periode van 4 maanden onder water werden nog lage aantallen *C. minimum* aangetroffen. Specifiek over naaktslakken werd nauwelijks informatie gevonden, en er is dan ook geen uitspraak gedaan over hun overleving (Plum, 2005).

Ausden et al. (2001) onderzochten de reactie van macrofauna in bodems van graslanden die in de winter 60, 90 of 120 dagen of niet onder water werden gezet. Deze behandelingen leverden voor de meeste wormensoorten een splitsing op tussen de geïnundeerde en nog droge bodems. De groene regenworm (*Allolobophora chlorotica*, groen gepigmenteerde variant) en de gewone blauwkopworm (*L. rubellus*) waren de enige soorten die zowel in droge als in geïnundeerde bodems voorkwamen. De vierhoekworm (*Eiseniella tetraedra*) en de geelstaartworm (*Octolasion tyrtaeum*) overleefden 120 dagen inundatie het beste vanwege hun fysiologische aanpassingen aan zuurstofarme bodems. Beide zijn soorten van natte (veen, broekbossen) tot zeer natte (poelen en rivierbedden) bodems.

Echter, in 13 van de 14 onderzochte monsterlocaties liep de biomassa van de wormen zeer sterk en significant terug (tot 1/5^e of minder) in de geïnundeerde bodems t.o.v. van de niet-geïnundeerde bodems. Door de manier waarop de monsterlocaties waren ingericht konden de onderzoekers ook vaststellen dat een groot deel van de afname van de biomassa van de wormen niet werd veroorzaakt door afdoding, maar omdat het merendeel van de wormen de delen die onder water kwamen te staan massaal verlieten kort na het oplaten van het water. Een onverwacht bijkomend effect was dat ook de larven van kevers en tweevleugeligen de geïnundeerde bodems verlieten. Deze zijn niet tot op geslacht of soort gedetermineerd.

In een emmerproef (de Graaf et al., 2024) werd het effect van inundatie op ritnaalden onderzocht. In kleine emmers (1L) met en zonder grond overleefden alle ritnaalden bij een temperatuur van 12°C een periode van 8 weken inundatie. In grotere emmers (12L) met grotere volumes grond en water werd significant meer afdoding vastgesteld. Dit is een indicatie dat biologische en/of chemische bodemprocessen in de bodem een rol spelen. In deze grotere volumes nam de afdoding van ritnaalden bij een langere blootstellingduur en onder een hogere temperatuur toe. De afkomst van de grond had invloed op de mate van afdoding. Gemiddeld genomen over alle varianten werd 50% van de ritnaalden in 8 weken afgedood, maar in de praktijk is mogelijk een hogere afdoding te bereiken.

Zorn et al. (2005) onderzochten de populatiedynamiek van wormen in de uiterwaarden van de rivier Rijn in Nederland van oktober 2000 tot maart 2003. Binnen deze periode overstroomde de Rijn in dit gebied viermaal, de kortste overstroming duurde 4 weken, de langste 8 weken. Hun waarnemingen voor wat betreft de groene regenworm (*A. chlorotica*, groen gepigmenteerde variant) komen overeen met die van Ausden (2001). Overstromingen hadden nagenoeg geen invloed op de populatiedynamica van deze soort. Ook troffen zij bij overstromingen de grote blauwkopworm (*L. terrestris*) aan in de bovenste 20 cm van de bodem, terwijl deze soort nogmaals gesproken dieper blijft. Waarschijnlijk probeerde deze soort via het grondoppervlak het water te ontsnappen of was hij op zoek naar meer zuurstofrijke omstandigheden. Hun aantallen gingen sterk achteruit bij een overstroming, maar herstelden zich weer binnen ongeveer 1 jaar.

In tegenstelling tot de bevindingen van Ausden et al. (2001) troffen Zorn et al. (2005) veel exemplaren van de gewone grauwworm (*Aporrectodea caliginosa*) aan op hun overstroomde locaties. Zij wijten deze schijnbare tegenstelling aan het feit dat *A. caliginosa* veel subsoorten kent, mogelijk met verschillende mate van aanpassing een zeer natte, zuurstofarme omstandigheden. Ten slot toonden hun tellingen aan dat de gewone blauwkopworm (*L. rubellus*) de overstromingen overleefde, maar dat hun aantal naar vrijwel 0 was gezakt (vermoedelijk grotendeels door migratie) aan het einde van iedere overstroming. Dat (Ausden et al., 2001) desondanks in geïnundeerde graslanden veel *L. rubellus* vinden wijten zij aan het moment van monsteren en het feit dat de betreffende soort een korte levenscyclus heeft met veel ei-/cocon afzet.

Tijdens een inundatie-experiment onder gecontroleerde omstandigheden in een laboratorium zien Zorn et al. (2008) hun eerdere conclusies bevestigd voor wat betreft de soorten groene regenworm (*A. chlorotica*), de gewone grauwworm (*A. caliginosa*) en de gewone blauwkopworm (*L. rubellus*) voor een inundatieperiode van 42 dagen zonder extra toegevoegde OS. *A. chlorotica* overleefde de inundatieperiode, maar ging in aantal sterk achteruit, evenals *L. rubellus*. *A. caliginosa* leek niet te worden beïnvloedt door de inundatie, hun aantal bleef stabiel.

Bij een serie van onderzoeken specifiek gericht op de wormenpopulaties van akkerbouwsystemen op zavelgronden bleken de gewone grauwworm (*A. caliginosa*) en de gewone blauwkopworm (*L. rubellus*) het meest voor te komen (Marinissen, 1995). *A. caliginosa* is een bodembewoner die zelden of nooit aan het bodemoppervlak komt en zich uitsluitend voedt met bodemdeeltjes. De soort ontsnapt ongunstige omstandigheden door dieper de bodem in te trekken (tot ca. 25 cm) (Marinissen, 1995; Zorn et al., 2008). Of *A. caliginosa* met deze strategie ook inundatie met toegevoegde OS en het ontstaan van toxische vetzuren kan overleven is onbekend. *L. rubellus* komt vooral voor in de bovenste 10 cm van de bodem en voedt zich op organische resten en mest. Juvenielen en volwassenen zijn gevoelig voor verstering. De cocoonen waarin deze soort zijn eieren afzet zijn veel toleranter voor ongunstige omstandigheden (Edwards & Lofty, 1977). Ook in dit geval is het echter niet bekend of deze structuren inundatie met toevoeging van OS en het ontstaan van toxische vetzuren kan overleven.

4 Inundatie als ziekte- en plaagbestrijding

Het hoofddoel van inundatie voor telers is het sterk terugdringen of zelfs saneren van het perceel van bodemgebonden pathogenen, plagen, onkruiden en gewasopslag. Hoewel een dure maatregel is inundatie ook breed werkend, waardoor naast het doelorganisme ook de populaties van veel andere ziekten, plagen en onkruiden worden teruggedrongen.

4.1 Uitvoering van de maatregel

De basis voor inundatie, uitgevoerd ziekte- en plaagbestrijdende maatregel blijft een duur van 12 weken bij een bodemtemperatuur van minimaal 16 °C gedurende het gehele proces. Gebaseerd op de vragen zoals gesteld in de inleiding van dit rapport zijn er bepaalde aanvullende richtlijnen te geven voor uitvoeren van de inundatie:

- **Is het wel of niet zinvol om extra organische stof aan te voeren?**
Ja, dat is zinvol. Het versnelt zowel het initiële zuurstofgebruik (waardoor de daling van het redoxpotentiaal sneller verloopt) als dat het hogere concentraties van toxische vetzuren oplevert.
- **Zo ja, welke criteria moeten er worden gesteld aan de (kwaliteit van) de organische stof?**
De extra aangevoerde organische stof moet voldoende eiwit bevatten en moet relatief makkelijk afbreekbaar zijn. Vers gras of groenbemesters zijn goede bronnen, stro kan ook maar is minder effectief. Groenafval uit natuurgebieden (maaisel en snoeiafval) zijn vaak lastig afbreekbaar en daardoor minder geschikt. Bermmaaisel is vaak divers van samenstelling en kwaliteit, als er veel houtige delen in voorkomen kan het net zoals groenafval uit natuurgebieden ongeschikt zijn. Verder komt in bermmaaisel vaak vervuiling met plastic voor. Of slootmaaisel (vaak samen met slib) een goede bron is, is twijfelachtig. Het is mogelijk te stikstofrijk en kan lokaal verontreinigd zijn met allerlei stoffen.
- **Hoeveel organische stof is zinvol? Te veel levert immers alleen extra uitspoeling van mineralen en uitstoot stikstofproducten op.**
Hier is nog geen eenduidig antwoord op te geven. Van inundatie als beheersingsmaatregel is bekend dat 40 ton/ha vers gras goed werkt, maar het is nog niet duidelijk wat dit precies betekent voor de uitstoot van broeikasgassen, in het bijzonder voor lachgas en methaan.
- **Wat is de beste manier om een perceel op inundatie voor te bereiden?**
Wat in ieder geval nadelig is voor de werking van de inundatie zijn storende lagen in het bodemprofiel. Plekken waar het water niet goed bij kan blijven zuurstofrijker, behouden daarmee hun redoxpotentiaal en worden minder blootgesteld aan opgeloste metalen en de ontstane toxische vetzuren. Het is dus aan te raden bekende storende lagen of problemen met de bodemstructuur eerst op te lossen, alvorens te inunderen.

Wat in ieder geval nadelig is voor de vorming en uitstoot van broeikasgassen is een overmaat aan minerale stikstof in de bodem bij de start van de inundatie. Als het gras of de groenbemester op het te inunderen perceel zelf geteeld wordt, is het aan te raden deze te bemesten al naar gelang de behoefte van het gewas, maar niet meer. Wat deze bemesting precies inhoudt (kunstmest of organisch, een enkele gift of juist verspreide giften) kan niet op basis van de informatie die in deze studie is verzameld worden bepaald.

- **Wat is de beste manier om na inundatie het bodemleven weer te herstellen?**

Bij deze vraag spelen drie aspecten: het herstel van de biodiversiteit (welke soorten komen voor in welke aantallen), het herstel van het mineralisatievermogen (in welke mate voert het bodemleven zijn taken t.b.v. het beschikbaar maken van nutriënten voor de plant uit) en het herstel van de bodemweerbaarheid (in welke mate biedt het aanwezige bodemleven bescherming tegen ziekten en plagen).

Tussen deze gebieden zit veel overlap, en met name over het herstel van de biodiversiteit en het mineralisatievermogen is nog nauwelijks onderzoek gedaan naar de effecten van inundatie. Daar waar wel onderzoek gedaan is, betreft het vaak onderzoek aan overstromingen of inundatie zonder toegevoegde OS, hetgeen waarschijnlijk een ander en mogelijk minder drastisch effect heeft. Dit zijn dus nog openstaande vragen.

Voor wat betreft de bodemweerbaarheid weten we in ieder geval dat het microbiom na afloop van de inundatie in grove lijnen herstelt (er is bijvoorbeeld geen bewijs voor het verdwijnen van complete klassen of orden). Of dit ook geldt voor individuele soorten is niet bekend. Naast de diversiteit herstellen ook de hoeveelheden micro-organismen zich vaak tot gelijksoortige niveaus als voor de inundatie. Al naar gelang van wat voor 'voedsel' (bijvoorbeeld in de vorm van organische bemesting) je het microbiom aanbiedt kan dit een of enkele jaren duren.

Meer specifiek voor de pathogenen weten we dat met name soorten die saprofytisch en/of qua concurrerend vermogen zwak zijn zich kort na inundatie sterk kunnen uitbreiden. Het stimuleren van de groei van micro-organismen die kunnen concurreren om de nutriënten afkomstig uit de OS kan helpen de pathogenen terug te dringen. Dit kan met name door het aanbieden van rijpe OS (compost) waarin weinig of geen gemakkelijk beschikbare nutriënten aanwezig zijn. Hierop zullen saprofytisch sterke micro-organismen zich kunnen vermeerderen ten nadele van de pathogenen.

4.2 Werking

De ontsmettende werking van inundatie is afkomstig van een aantal verschillende processen/eigenschappen die tegelijkertijd verlopen zolang het perceel volledig onder water staat en zuurstofloos blijft:

- Zuurstofloosheid (anaërobie): in de geïnundeerde bodem bevindt zich al zeer snel (vaak binnen 48 uur) geen zuurstof meer, mits het water niet door storende lagen wordt tegengehouden.
- Laag redoxpotentiaal: het redoxpotentiaal in geïnundeerde bodems weer zeer laag (tot -400 millivolt), waardoor elektronen makkelijk uitwisselbaar zijn en een zeer reductieve omgeving ontstaat.
- Hoog (potentieel toxisch) gehalte aan opgeloste metalen: door lage redoxpotentiaal gaan metalen zoals ijzer, mangaan, aluminium, bismut, lood en koper in hoge mate in oplossing.
- Verhoogde concentratie toxische stoffen: bij toevoeging van extra OS ontstaan bij de anaërobe afbraak (fermentatie) hiervan verschillende toxische vetzuren, waarvan propionzuur en boterzuur het meest giftig zijn, en vluchtige gassen (bijvoorbeeld waterstofsulfide) die ook giftig zijn.
- Potentieel antagonisme vanuit agressieve groei van obligaat anaërobe bacteriën, hiervoor kon ten tijden van dit schrijven echter geen informatie worden gevonden in de wetenschappelijke literatuur.

4.3 Effectiviteit van inundatie

Tabel 3 Overzicht van de effectiviteit van inundatie op verschillende soorten gewasopslag, onkruiden, aaltjes, bodemschimmels en bacteriën, oömyceten, protisten. Werking is aangegeven als volgt: + (bewezen effectief, saneert), +/- (bewezen effectief, geen sanering), * (perspectiefvol, maar meer onderzoek is nodig), - (bewezen niet effectief)

Naam (Nederlands)	Naam (Latijn)	Effectiviteit
Gewasopslag		
Aardappel	<i>Solanum tuberosum</i>	+
Anemoon	<i>Anemone</i> spp.	+
Brodiaea	<i>Brodiaea</i> spp.	+
Freesia	<i>Freesia</i> spp.	+/-
Gladiol (kralen)	<i>Gladiolus</i> spp.	+/-
Goudlook	<i>Allium moly</i>	+/-
Hyacint	<i>Hyacinthus</i> spp.	+
Iris	<i>Iris</i> spp.	+/-
Krokus	<i>Crocus</i> spp.	+/-
Narcis	<i>Narcissus</i> spp.	+
Sterhyacint	<i>Scilla</i> spp.	+/-
Tulp	<i>Tulipa</i> spp.	+
Vogelmelk	<i>Ornithogalum</i> spp.	+/-
Zigeunerbloem	<i>Sparaxis</i> spp.	+
Onkruiden		
Akkerdistel	<i>Cirsium arvense</i>	+
Akkerkers	<i>Rorripa sylvestris</i>	+/-
Heermoes	<i>Equisetum arvense</i>	-
Klein hoefblad	<i>Tussilago farfara</i>	+
Knolcyperus	<i>Cyperus esculentus</i>	-
Kweek	<i>Elymus repens</i>	+
Paardenstaartachtigen	<i>Equisetum</i> spp.	-
Zaadonkruiden	Diverse geslachten	-
Plagen		
Gevlekte akkerslak	<i>Deroceras reticulatum</i>	*
Roodstip	<i>Blaniulus guttulatus</i>	*
Springstaart	<i>Onychiurus armatus</i>	*
Wortelduizendpoot	<i>Scutigerella immaculata</i>	+/-
Aaltjes		
Bedrieglijk maiswortelknobbelaaltje	<i>Meloidogyne fallax</i>	+
Geel aardappelcysteaaltje	<i>Globodera rostochiensis</i>	+
Graanwortellesieaaltje	<i>Pratylenchus crenatus</i>	+
Graswortelknobbelaaltje	<i>Meloidogyne naasi</i>	-
Maiswortelknobbelaaltje	<i>Meloidogyne chitwoodi</i>	+
Noordelijk wortelknobbelaaltje	<i>Meloidogyne hapla</i>	+
Paratylenchus spp.	<i>Paratylenchus</i> spp.	+
Rotylenchus spp.	<i>Rotylenchus</i> spp.	+
Stengelaaltje	<i>Ditylenchus dipsaci</i>	+
Vrijlevende wortelaaltjes	(<i>Para</i>) <i>Trichodorus</i> spp.	+/-
Gewoon wortellesieaaltje	<i>Pratylenchus penetrans</i>	+
Wit aardappelcysteaaltje	<i>Globodera pallida</i>	+
Wit bietencysteaaltje	<i>Heterodera schachtii</i>	-

Schimmels

Fusarium (uien)	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cepae</i>	*
Rhizoctonia (bieten)	<i>Rhizoctonia solani</i> AG 2-2IIIB	-
Rhizoctonia (aardappel)	<i>Rhizoctonia solani</i> AG 3	+
Rhizoctonia (tulpen)	<i>Rhizoctonia tuliparum</i>	+
Sclerotinia	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	+
Sclerotinia	<i>Sclerotinia bulborum</i>	+
Verticillium	<i>Verticillium dahliae</i>	*
Verticillium (kruisbloemigen)	<i>Verticillium longisporum</i>	*
Witrot	<i>Sclerotium cepivorum</i>	-

Oömyceten

Pythium	<i>Pythium ultimum</i> (groep)	-
---------	--------------------------------	---

Virussen

Tabaksratelvirus (TRV)		-
------------------------	--	---

5 Openstaande en nog niet volledig beantwoorde vragen

Ondanks dat inundatie en de erbij betrokken processen in recente jaren weer volop in de belangstelling staan bij onderzoekers, adviseurs en telers, zijn er een aantal vragen waarop nog geen of geen volledig antwoord is gevormd. Sommige van deze vragen zijn meer algemeen (reactie microbioom, welke geslachten bacteriën en archaea zijn nu precies betrokken?), en andere zijn meer specifiek voor de Nederlandse akkerbouwgronden (wat is een goed bemestingsadvies na inundatie, hoe en hoe snel verloopt het herstel van de bodemweerbaarheid?). Deze vragen worden in dit hoofdstuk benoemd, daar waar mogelijk met de reeds beschikbare informatie.

5.1 Bemestingseffect & -advies

Goede bemestingsadviezen voor teeltjaren voor en na inundatie is vooralsnog lastig te geven doordat er met name over de uitspoeling gevoeligheid van in oplossing gaande nutriënten weinig bekend is. Het is bekend dat de stikstof die in minerale vorm aanwezig is bij de start van de inundatie in grote mate in enige vorm zal vervluchtigen. Na inundatie zou er door de werking van heroxidatie, adsorptie en uitspoeling een tekort kunnen zijn ontstaan aan bepaalde nutriënten.

Verder is er weinig bekend of welke reacties de in oplossing zijnde nutriënten ondergaan wanneer de bodem weer opdroogt. Het is theoretisch bijvoorbeeld goed mogelijk dat fosfaat en ijzer bij het weer opdrogen en heroxideren van de bodem ijzerfosfaat vormen, waardoor dit fosfaat vrijwel permanent wordt vastgelegd.

Ook over kalium bestaan nog vragen, in het bijzonder op lichte zandgronden (weinig OS en een laag lutumgehalte). Wat er precies gebeurt met kalium in gronden waarbij weinig of geen lutum aanwezig is, spoelt deze dan uit? En de beschikbaarheid van kalium, neemt die ook af als er geen kleiplaatjes zijn om de kalium van te wisselen?

Voorts is de invloed van verschillende concentraties ijzer (die in Nederland behoorlijk kan variëren) onvoldoende duidelijk. Het enige onderzoek wat hieraan is uitgevoerd in Nederland zelf vond namelijk plaats met monsters van oude veenweiden, die niet alleen heel OS-, maar ook zeer ijzerrijk waren. Het is belangrijk deze invloed goed te kennen, omdat reactie met ijzer bij het weer opdrogen en heroxideren kan leiden tot de vorming van zeer slecht oplosbare moleculen, waardoor nutriënten semipermanent kunnen worden vastgelegd.

5.2 Vorming en uitstoot van broeikasgassen

De uitstoot van broeikasgassen door inundatie is nog verre van volledig in beeld. Wat bekend is, is dat van de stikstof die bij de start van de inundatie in minerale vorm aanwezig is (N_{min}) een groot deel zal vervluchtigen (Deenik et al., 2013) onder invloed van de denitrificatie- en Anammox- (Anaerobe Ammonium Oxidatie) processen. Een ander deel zou mogelijk uit kunnen spoelen. Voor deze vormen van stikstofuitstoot zijn echter geen harde cijfers beschikbaar. De uitstoot van ammoniak (NH_3) door landbouwgronden is evenwel onwaarschijnlijk, omdat voor voldoende vorming hiervan zeer grote hoeveelheden OS nodig zijn, veel meer dan de ca. 40 ton/ha vers materiaal die doorgaans voor een inundatie wordt aangeraden. Hier kan op gestuurd worden door het gras zelf te telen en niet meer te bemesten dan de gewasbehoefte. Wat deze minimale bemesting precies inhoudt (kunstmest of organisch, een enkele gift of juist verspreide giften), kan niet op basis van de informatie die in deze studie is verzameld worden bepaald.

Nog veel lastiger zijn de vorming en uitstoot van lachgas (N₂O) en methaan (CH₄), omdat dit geen typische eindproducten van anaerobe afbraak zijn. Lachgas is vaak een intermediair product en ook methaan kan worden geproduceerd en direct weer worden gebruikt (gerecycled) voor nieuwe reacties. De mate waarin dit gebeurt is sterk afhankelijk van het type en hoeveelheid OS, de overige beschikbare elektronacceptoren (zwavel, ijzer en andere metalen) en omvang en mate van activiteit van het microbiom (zowel bacteriën als archaea). Het is daarom niet zinvol hier theoretische waarden voor te geven, zonder dat er waarnemingen uit de praktijk zijn om de uitkomsten te staven.

Tot slot zal moeten worden bedacht wat het referentiekader wordt voor de uitstoot van broeikasgassen door inundatie. Welk niveau van uitstoot is acceptabel voor het verkregen effect? Mag de uitstoot van volveldse inundatie met extra toegevoegde OS bijvoorbeeld gelijk staan aan die van volveldse bemesting met drijfmest via mestinjecteurs? Of zou de eis voor inundatie veel lager moeten zijn, bijvoorbeeld omdat er in theorie veel minder stikstof wordt ingebracht?

5.3 Invloed op bodemgezondheid & herstel van weerbaarheid

Van Os (2003) onderzocht de weerbaarheid van gronden tegen *Pythium ultimum* na inundatie (8 weken) in pot- en veldproeven. De proeven werden uitgevoerd op of met grond van percelen die van nature met *P. ultimum* waren besmet. Zij vond dat inundatie geen invloed had op de inoculumdichtheid van *P. ultimum*, maar dat de aantasting wel toenam. Een teeltseizoen later (narcis, geen waardplant) was het aantastingsniveau van *P. ultimum* in het toetsgewas iris weer terug op het niveau van voor de inundatie. Blijkbaar had de bodemweerbaarheid zich hersteld.

Er zijn steeds meer aanwijzingen dat vluchtige organische verbindingen (VOC's) van microbiële oorsprong een belangrijke rol spelen bij de natuurlijke onderdrukking van bodem-gebonden ziekteverwekkers. Van Agtmaal et al. (2015) onderzocht het effect van anaerobe grondontsmetting (ASD) op de productie van *Pythium*-onderdrukkende VOC's en de onderdrukking van *Pythium* in biotoetsen met hyacint. De ASD-behandeling (6 weken) resulteerde in een verlies van *Pythium*-onderdrukkende VOC's en verlies van *Pythium*-onderdrukking. GC/MS-analyse identificeerde verschillende VOC's, waaronder verbindingen waarvan bekend is dat ze een schimmelremmende werking hebben, die werden geproduceerd in de onbehandelde bodems, maar niet in de ASD-bodems. Deze verbindingen werden 15 maanden na de ASD-behandeling opnieuw geproduceerd.

Het onderzoek toont aan dat bodems die worden blootgesteld aan ASD tijdelijk de onderdrukkende eigenschappen van ziekteverwekkers kunnen verliezen en dat zowel het verlies als de terugkeer van deze onderdrukkende eigenschappen samenvallen met verschuivingen in de samenstelling van de bodembacteriegemeenschap. Deze gegevens ondersteunen het gesuggereerde belang van microbiële VOC's in de natuurlijke onderdrukking van bodempathogenen (Van Agtmaal et al, 2015).

In een grote praktijkproef (Visser et al., 2021) werd zowel vooraf als achteraf middels biotoetsen de weerbaarheid van de bodem tegen *Rhizoctonia solani* 2-2IIIB en *P. ultimum* bepaald in veertien geïnundeerde percelen. Dertien van de veertien percelen hadden noch voorafgaand noch na de inundatie weerbaarheid tegen *R. solani* (90-100% van de planten aangetast). Slechts één perceel bleek vooraf enige weerbaarheid tegen *R. solani* te hebben (40% van de planten aangetast). Direct na de inundatie was deze weerbaarheid verdwenen (90-100% van de planten aangetast), maar in juni het jaar erop leek de weerbaarheid weer (deels) terug te komen (77% van de planten aangetast). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de inundatie op het betreffende perceel zeer laat was uitgevoerd, waardoor de temperatuur lager was dan in het gebruikelijke advies wordt aangeraden. Hierdoor is het proces waarschijnlijk suboptimaal verlopen. Desalniettemin is dit een aanwijzing dat ook specifieke bodemweerbaarheid zich mogelijk weer kan herstellen na inundatie.

Voor *P. ultimum* was de aantasting in de percelen in de Wieringermeer (Wm) door de natuurlijke besmetting 25 tot 30%. De al aanwezige aantasting in de grond van perceel NOP-M was veel hoger en lag op ruim 75%. Ook direct na de inundatie was de aantasting door de natuurlijke infectie op dit perceel nog hoog, bijna 80% aangetaste planten. Ook op de andere percelen was de aantasting na inundatie vergelijkbaar met die van voor de inundatie. Op één perceel (Wm-M), was de aantasting kort na inundatie iets lager dan voor de inundatie. Wanneer tijdens de biotoets *P. ultimum* aan de grond werd toegevoegd, nam de aantasting toe. In de niet geïnundeerde grond varieerde het percentage aangetaste planten van bijna 40% (Wm-D) tot circa 75% (Wm-M). Op alle percelen verloor de bodem door de inundatie de ziektevering tegen *Pythium*. De *Pythium*-aantasting was bij alle percelen na de inundatie significant hoger dan voor de inundatie (ruim 80% van de planten aangetast).

Anders dan voor bovengenoemde onderzoeken is er weinig onderzocht aan specifieke organismen en het herstel van weerbaarheid in de bodem. De (grove) samenstelling van het microbiom lijkt hetzelfde te blijven, maar hoe de samenstelling door inundatie precies verandert en of dit invloed heeft op de biologische activiteit van de bodem is beperkt onderzocht. Ook voor de bodemfauna (mijten, springstaarten en regenwormen) is nog niet goed duidelijk welk effect een inundatie, uitgevoerd met toevoeging van extra OS, precies heeft. Met name soorten die niet over het bodemoppervlak maar via de bodem zelf terug het perceel in migreren kunnen er lang over doen om geïnundeerde bodems te herkoloniseren (K. van Rozen, persoonlijke communicatie).

De kern van het verhaal in vraag en antwoord

Fysisch

- **Wat bepaalt of de bodemstructuur van een perceel verbetert of verslechtert? Is dit afhankelijk van de grondsoort, zoutgehalte van het water, uitgangssituatie van het perceel, grondbewerking kort voor inundatie?**

Alle hierboven genoemde factoren spelen een rol bij de invloed van inundatie op de bodemstructuur van een perceel. Zandgronden lopen met name risico op een verslechtering van de structuur als er snel veel water wordt toegevoerd terwijl de grond droog is. Percelen met een relatief hoog organische stof (OS)-gehalte lopen wat minder risico, omdat OS als 'cement' tussen de zandkorrels fungeert. Kleigronden kunnen al naar gelang de mineralensamenstelling (kleitype) krimpen of zwellen. Inunderen met zout water op zware bodems heeft tot gevolg dat de klei 'vlokkerig' en zeer kneedbaar wordt, waardoor gemakkelijk verslemping op kan treden. Op zandgronden speelt risico op verslemping minder, maar dient wel rekening te worden gehouden (bijvoorbeeld in de gewaskeuze) met het zout dat achterblijft nadat het water weer is afgelaten.

- **Welke maatregelen kun je nemen om de negatieve effecten te beperken of de positieve effecten te versterken?**

De sanerende werking van inundatie wordt sterk teniet gedaan als de bodem niet goed zuurstofloos wordt door bijvoorbeeld storende lagen of insluiting van zuurstof. Verhelp bestaande structuurproblemen dus eerst zoveel mogelijk voordat je inundatie toepast, en laat het water langzaam op en af vanaf het laagste deel van het perceel, dat komt zowel de werking van de inundatie als de bodemstructuur ten goede.

Chemisch

- **Wat gebeurt er met fosfaat, kalium, magnesium, zwavel en sporenelementen?**

Onder invloed van de zuurstofloze omstandigheden en de daaraan gekoppelde daling van het redoxpotentiaal gaan al deze stoffen in oplossing. Een deel daarvan is afkomstig vanuit de OS, een deel zat gebonden aan metalen, en op kleigronden is ook een deel afkomstig van de buitenste laag van kleiplaatjes (lutum). Een klein deel hiervan spoelt vermoedelijk uit, maar het merendeel blijft in oplossing zolang de bodem zuurstofloos en waterverzadigd blijft. Droogt de grond op en komt er weer zuurstof in, dan slaan fosfaat en zwavel weer neer in verbindingen met metalen, of raken weer gebonden aan OS of kleiplaatjes.

- **In welke mate spoelt stikstof uit of verdwijnt naar de lucht en in welke vorm?**

Doordat de bodem bij inundatie zuurstofloos wordt, kan het nitrificatieproces niet meer plaatsvinden. Het denitrificatieproces, waardoor nitraat en nitriet uiteindelijk worden omgezet naar lachgas en stikstofgas, kan wel plaatsvinden. Dit proces gaat met name op voor de bij de start van de inundatie aanwezige minerale stikstof, die makkelijk in oplossing komt en dus beschikbaar is voor bacteriën. Een klein deel zal uitspoelen, maar het overgrote deel zal in de loop van de inundatieperiode als lachgas of stikstofgas ontsnappen uit de bodem. Een zeer beperkte mate van ammoniakvorming is mogelijk, maar hier is zeer veel OS voor nodig, en het is dan ook bijzonder onwaarschijnlijk dat uit geïnundeerde percelen ammoniak vrijkomt.

- **Welke van de ontstane gassen zijn broeikasgassen en hoe moet deze emissie worden gewogen?**

Hoewel er bij inundatie natuurlijk koolstofdioxide vrijkomt, zijn met name ammoniak, lachgas en methaan sterke broeikasgassen. Een zeer beperkte mate van ammoniakvorming is mogelijk, maar hier is zeer veel OS voor nodig en het is dan ook bijzonder onwaarschijnlijk dat uit geïnundeerde percelen ammoniak vrijkomt. Methaan wordt ook in navenant hele kleine hoeveelheden gevormd, maar wel in hogere concentraties dan van nature in de buitenlucht voorkomt. De omvang van de emissie van lachgas is onbekend. Er is momenteel ook nog geen goed referentiekader voor de uitstoot van broeikasgassen door inundatie, maar gezien de verwachte hoeveelheden stikstof en OS is de uitstoot waarschijnlijk heel beperkt.

- **Welke maatregelen kunnen worden genomen om de negatieve aspecten zoveel mogelijk te beperken?**

Als het bij inundatie op de vorming en uitstoot van broeikasgassen aankomt, geldt dat overdaad schaadt. Een overmaat aan minerale stikstof bij aanvang van de inundatie levert extra uitstoot op. Teel je het gewas bestemd voor een eventuele extra OS-gift op het betreffende perceel, of teel je nog een ander te oogsten gewas voor de inundatie, stem de bemesting af op de behoefte van het gewas en bemest niet ruimer.

Biologisch

- **Mechanismen: hoe komt de doding van bodempathogenen, nematoden en onkruiden tot stand?**

Bij inundatie spelen verschillende processen die waarschijnlijk samen leiden tot het verzwakken en afdoden van ziekten, plagen en onkruiden. Deze processen zijn, in chronologische volgorde van plaatsvinden tijdens het inunderen : 1) het zuurstofloos worden van de bodem, 2) het dalen van het redoxpotentiaal (stoffen worden reactiever), 3) metalen en elementaire stoffen zoals zwavel gaan in oplossing en stijgen naar toxische concentraties, en 4) bacteriën die de OS fermenteren, produceren hierbij toxische vetzuren als bijproduct.

- **Met welke maatregelen kun je de mechanismen ondersteunen?**

Een consistente en snelle daling van het redoxpotentiaal is nodig om de mechanismen van afdoding te bewerkstelligen. Insluiting van zuurstof, een traag verbruik van de reeds aanwezige zuurstof, en een teveel aan nitraat in de bodem vertragen dat proces. Verhelp dus eerst structuurproblemen, laat het water langzaam op, overweeg om extra verse OS aan te voeren (dat bevordert bacteriegroei, waardoor de aanwezige zuurstof snel verbruikt wordt) en bemest van tevoren niet meer dan nodig zodat er minimaal N achterblijft na de laatste teelt.

- **Waarom overleven sommige ziekten, plagen en onkruiden overleven een inundatie?**

Niet alle ziekten, plagen en onkruiden worden afgedood door inundatie, of de afdoding is hoog, maar niet volledig (er vindt geen sanering plaats). De redenen hiervoor zijn divers. Zo zijn sommige onkruiden aangepast aan deels onder water staan, kunnen bepaalde insecten in een ruststand gaan waardoor ze nauwelijks zuurstof nodig hebben, en schermen de ruststructuren van bepaalde schimmels zich zo goed af van de buitenwereld dat ze niet beschadigd raken. Ook sommige nematodensoorten (bijvoorbeeld bietencysteetjes) en onkruiden (met name zaadonkruiden) zijn niet of nauwelijks gevoelig voor inundatie. Ook kan een ziekte, plaag of onkruid in heel lage aantallen de inundatie overleven en vervolgens, bij gebrek aan concurrentie om ruimte of nutriënten, zich explosief vermeerderen als de inundatie voorbij is. Het netto effect op zo'n organisme is dan negatief.

- **Wat gebeurt er met het niet-pathogene microbiële bodemleven?**

Dat is afhankelijk van hoe goed ze met de zuurstofloze (anaerobe) omstandigheden overweg kunnen. De echt anaerobe organismen (bacteriën die kunnen fermenteren) nemen sterk in aantal toe, terwijl de bacteriën die niet kunnen fermenteren (de aerobe en zogenaamde facultatief aerobe) zeer sterk in aantal afnemen, maar niet verdwijnen. Ze overleven in taaie structuren (sporen) of in hoekjes of delen van de bodem waar nog wel wat zuurstof aanwezig is. Afhankelijk van de nazorg van een geïnundeerd perceel is het niet-pathogene microbiële bodemleven na een tot enkele jaren na de inundatie weer ongeveer gelijk aan hoe het was voor de inundatie. Er is geen bewijs voor het verdwijnen van volledige ordes of klassen bacteriën door inundatie. Wat de exacte invloed is van inundatie op de diversiteit aan schimmels in de bodem is nog grotendeels onbekend.

- **Wat gebeurt er met het de bodemfauna (wormen, springstaarten)?**

Bodemdieren en -insecten zullen aanvankelijk proberen het water te ontsnappen. Hierbij zullen de soorten die aan het bodemoppervlak voorkomen vooral zijwaarts (richting perceelsranden) proberen te komen, terwijl soorten die echt in de bodem wonen zichzelf in de diepte in veiligheid proberen te brengen. Lukt dat niet, dan zijn vooral de volwassen exemplaren kwetsbaar. Eieren en larven zijn veel beter bestand tegen de zuurstofloze omstandigheden, omdat ze voorzien zijn van extra beschermende lagen of omdat ze in een soort rusttoestand kunnen gaan waarin ze weinig zuurstof gebruiken. De meeste kennis hierover is beschikbaar van waarnemingen bij overstromingen, het is dus mogelijk dat inundatie eventueel met extra OS een andere werking heeft. Zou een bepaalde soort in een perceel helemaal verdwijnen door inundatie, dan kan het in het bijzonder voor soorten die zich door de bodem heen bewegen lang (jaren) duren voordat ze het perceel hebben herkoloniseerd.

- **Wat gebeurt er met het antagonistisch potentieel van een bodem (specifieke weerbaarheid) en wat met de algemene weerbaarheid. Is herstel mogelijk en hoe lang neemt dat in beslag?**

Bodems met een specifieke weerbaarheid (bodems waarin bepaalde ziekten wel voorkomen maar door de invloed van het microbiële bodemleven weinig schade doen) zijn zeldzaam. Voor wat betreft algemene weerbaarheid zien we dat de weerbaarheid kort na inundatie vaak niet meer aanwezig is, waarschijnlijk omdat het bodemleven dat ervoor verantwoordelijk was nog slechts in zeer lage aantallen aanwezig is. Met de juiste nazorg, bijvoorbeeld in de vorm van een gift compost of strorijke stalmest, herstelt deze weerbaarheid zich weer, soms al binnen één jaar. Ook specifieke weerbaarheid verdwijnt vaak bij inundatie, en het is nog niet duidelijk op welke termijn deze zich weer herstelt.

Consequenties

Gebaseerd op de resultaten van dit literatuuronderzoek worden de adviezen voor de uitvoering van inundatie al dan niet aangepast om zo doelmatig mogelijk te zijn met minimalisatie van negatieve neveneffecten.

- **Is het wel of niet zinvol om extra organische stof aan te voeren?**

Ja, het is zinvol. Het versnelt het begin van de processen die bijdragen aan de afdoding van de te bestrijden ziekten, plagen en onkruiden.

- **Zo ja, welke criteria moeten er worden gesteld aan de (kwaliteit van) de organische stof?**

Het organisch materiaal moet makkelijk afbreekbaar zijn, zodat bacteriën er goed op kunnen groeien. Een (navenant de samenstelling) voldoende hoog eiwitgehalte van de OS draagt voorts bij aan de productie van voldoende toxische vetzuren als de fermentatie eenmaal op gang gekomen is. Lastig te verteren OS (bijvoorbeeld stro, snoeiafval met veel hout, of uitgerijpte compost) zijn niet geschikt. Berm- en slootmaaisel zijn vaak divers van samenstelling en kunnen lokaal verontreinigd zijn met allerlei stoffen, waaronder plastic en metaal, en het gebruik hiervan is daarom niet aan te raden.

- **Hoeveel organische stof is zinvol? Teveel levert immers alleen extra uitspoeling van mineralen en uitstoot van stikstofproducten op.**

Een gebruikelijk advies is 40 ton/ha vers gras, bijvoorbeeld Engels of Italiaans raaigras, waarvan de mengsels vaak op onder andere eiwitgehalte zijn samengesteld. Een groenbemester die flink wat massa produceert zoals bladrammenas, gele mosterd of bladkool kan ook.

- **Wat is de beste manier om een perceel op inundatie voor te bereiden?**

Bewerk de grond voldoende om te zorgen dat deze goed los is. Bemest in ieder geval ook niet meer dan het gewas kan opnemen, want een overdaad aan minerale stikstof bij aanvang van de inundatie betekent meer vorming en uitstoot van broeikasgassen.

Wat is de beste manier om na inundatie het bodemleven weer te herstellen?

Na een inundatie is veel van het bodemleven in veel lagere aantallen aanwezig dan voor de inundatie. Vrijwel alle bodembewonende organismen (van bacteriën tot springstaarten) zijn dan gebaat bij voldoende voedselaanbod in de vorm van organische bemesting. Een gift compost of storrijke stalmest helpt het bodemleven weer op gang en brengt ook weer nieuw bodemleven in, waardoor het herstel bevorderd wordt.

Literatuur

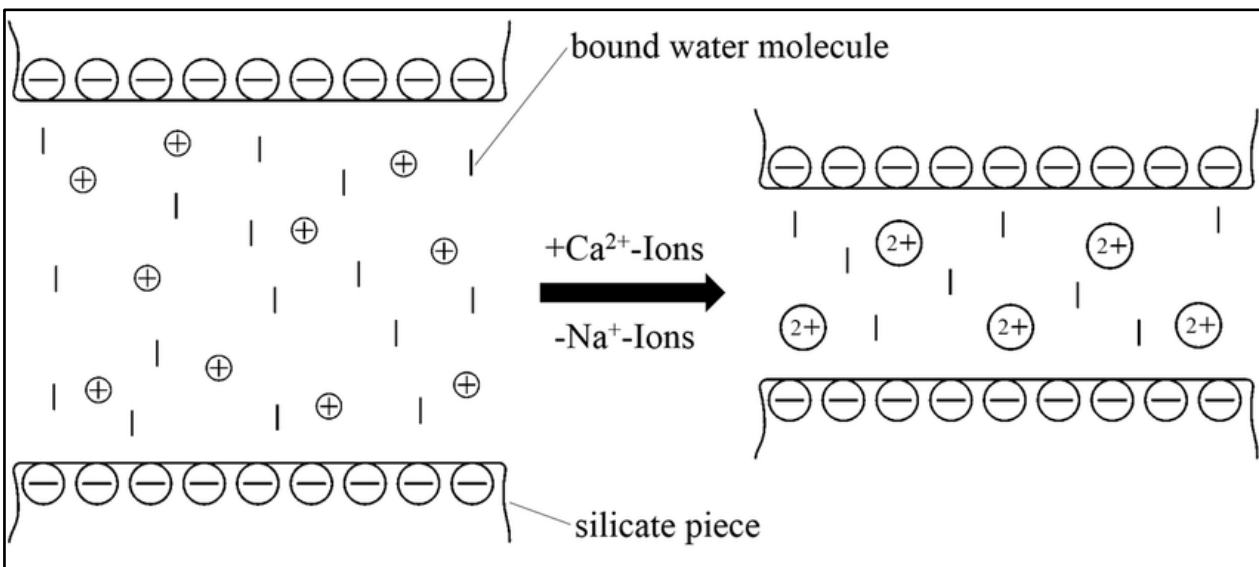
- Alewel, C., Paul, S., Lischeid, G., & Storck, F. R. (2008). Co-regulation of redox processes in freshwater wetlands as a function of organic matter availability? *Science of the Total Environment*, 404(2–3), 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.001>
- Ausden, M., Sutherland, W. J., & James, R. (2001). The effects of flooding lowland wet grassland on soil macroinvertebrate prey of breeding wading birds. *Journal of Applied Ecology*, 38(2), 320–338. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00600.x>
- Baeyens, J., & Applemans. (1947). Studies of the inundation of polder lands in Belgium, second report: vegetation tests in 1946. *Agricoltura*, 122 pp.
- Bakker, D. (1950). De flora en fauna van Walcheren en andere inundatiegebieden tijdens en na de inundatie. In *Verslag Landbouwkundig Onderzoek No. 56.17*. TNO.
- Cho, D. Y., & Ponnamura, F. N. (1971). INFLUENCE OF SOIL TEMPERATURE ON THE CHEMICAL KINETICS OF FLOODED SOILS AND THE GROWTH OF RICE. *Soil Science*, 12(3), 184–194.
- Chowdhury, M. T. A., Meharg, A. A., Price, A. H., & Norton, G. J. (2021). Geochemical variability in the soils of Bangladesh as affected by sources of irrigation water and inundation land types. *SN Applied Sciences*, 3(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04269-1>
- de Graaf, M., Costaz, T., van Rozen, K., & Huiting, H. (2024). *Inundatie ritnaalden*. <https://doi.org/10.18174/646959>
- de Jong, A. E. E., Guererro-Cruz, S., van Diggelen, J. M. H., Vaksmaa, A., Lamers, L. P. M., Jetten, M. S. M., Smolders, A. J. P., & Rasigraf, O. (2020). Changes in microbial community composition, activity, and greenhouse gas production upon inundation of drained iron-rich peat soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107862>
- Deenik, J. L., Penton, C. R., & Bruland, G. (2013). *Nitrogen Cycling in Flooded Taro Agriculture*.
- Desiredy, S., & Pothanamkandathil Chacko, S. (2021). A review on metal oxide (FeOx/MnOx) mediated nitrogen removal processes and its application in wastewater treatment. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 20, Issue 3, pp. 697–728). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09581-1>
- Drzymala, S., Spychalski, W., & Rybczinsky, P. (2000). Effect of soil inundation on its properties in the region of Swiecko during summer flooding. *Acta Agrophysica*, 35, 61–67.
- Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, K. H., & Stackebrandt, E. (2006a). *The Prokaryotes - Volume II - Ecophysiology and Biochemistry: Vol. II*. Springer Science + Business Media, LLC.
- Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, K., & Stackebrandt, E. (2006b). *The Prokaryotes - Volume IV: Bacteria: Firmicutes, Cyanobacteria* (M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.-H. Schleifer, & E. Stackebrandt, Eds.). Springer US. <https://doi.org/10.1007/0-387-30744-3>
- Edwards, C. A., & Lofty, J. R. (1977). Biology of Earthworms. In *Biology of Earthworms*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3382-1>
- Favre, F., Bogdal, C., Gavillet, S., & Stucki, J. W. (2006). Changes in the CEC of a soil smectite-kaolinite clay fraction as induced by structural iron reduction and iron coatings dissolution. *Applied Clay Science*, 34(1–4), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.04.010>
- Favre, F., Tessier, D., Abdelmoula, M., Génin, J. M., Gates, W. P., & Boivin, P. (2002). Iron reduction and changes in cation exchange capacity in intermittently waterlogged soil. *European Journal of Soil Science*, 53(2), 175–183. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00423.x>
- Gotoh, S., & Patrick Jr, W. H. (1974). Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potential and pH. *Soil Scientific Society of the American Proclamation*, 38, 66–71.
- Greses, S., Tomás-Pejó, E., & González-Fernández, C. (2021). Short-chain fatty acids and hydrogen production in one single anaerobic fermentation stage using carbohydrate-rich food waste. *Journal of Cleaner Production*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124727>
- Hanson, B. R. (2006). How Water Quality Affects Infiltration. In *Agricultural Salinity and Drainage* (pp. 47–51).
- Hissink, D. J. (1933a). Bodemkundige vraagstukken die zich voordoen bij het in cultuur brengen van de jonge Zuiderzeegronden. *Chemisch Weekblad*, 30(42).

- Hissink, D. J. (1933b). Bodemkundige vraagstukken die zich voordoen bij het in cultuur brengen van de jonge Zuiderzeegronden. *Chemisch Weekblad*, 30(42).
- Hissink, D. J., Zuur, A. J., & Spitzen, D. G. W. (1954). De voorgeschiedenis van de verbetering van door zeewater bedorven gronden door een bemesting met gips (zwavelzure kalk). *Langs Gewonnen Velden*, 58–64.
- Huang, X., Liu, L., Wen, T., Zhang, J., Wang, F., & Cai, Z. (2016). Changes in the soil microbial community after reductive soil disinfestation and cucumber seedling cultivation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(12), 5581–5593. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7362-6>
- Huang, X., Liu, L., Wen, T., Zhu, R., Zhang, J., & Cai, Z. (2015). Illumina MiSeq investigations on the changes of microbial community in the *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* infected soil during and after reductive soil disinfestation. *Microbiological Research*, 181, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.08.004>
- Huang, X. Q., Liu, L. L., Zhao, J., Zhang, J. B., & Cai, Z. C. (2019). The families Ruminococcaceae, Lachnospiraceae, and Clostridiaceae are the dominant bacterial groups during reductive soil disinfestation with incorporated plant residues. *Applied Soil Ecology*, 135, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.011>
- Huang, X. Q., Wen, T., Zhang, J. B., Meng, L., Zhu, T. B., & Cai, Z. C. (2015). Toxic organic acids produced in biological soil disinfestation mainly caused the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *BioControl*, 60(1), 113–124. <https://doi.org/10.1007/s10526-014-9623-6>
- Jaffar, N. S., Jawan, R., & Chong, K. P. (2023). The potential of lactic acid bacteria in mediating the control of plant diseases and plant growth stimulation in crop production - A mini review. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1047945>
- Katyal, J. C. (1977). Influence of organic matter on the chemical and electrochemical properties of some flooded soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 9(4), 259–266. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717\(77\)90032-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717(77)90032-3)
- Kirk, G. J. D. (2004). *The biogeochemistry of submerged soils*. Wiley.
- M. Boerma, Js. R. (1991). Het effect van inundatie op zeef- en sorteergrond. In *HLB Rapportnr 918*.
- Maas, P. W. T. (1987). Physical methods and quarantine. In: *RH Brown & BR Kerry (Eds) Principles and Practice of Nematode Control in Crops*. New York, Acad. Press, Pp. 265-291.
- Majumder, S., Chandra, B., Viswavidyalaya, K., Saha, D., & Debnath, T. (2018). K-Dynamics in a Continuously Submerged Limed and the Corresponding Unlimed Soil Subjected to One and Two Cycles of Drying. *American Journal of Applied Chemistry*, 6(6), 189–196. <https://doi.org/10.11648/j.ajac.20180606.11>
- Marinissen, J. C. Y. (1995). *Earthworms, soil-aggregates and organic matter decomposition in agro-ecosystems in The Netherlands*. Wageningen University & Research.
- Muller, P. J., & Vink, P. (1985). Research on the effects of flooding of bulb soils on the persistence of pests, diseases and weeds. *Jaarverslag LBO*.
- Naveen, L., & Moossa, P. P. (2019). Dynamics of potassium fractions under submergence in characteristic sandy clay and loamy sand rice soils of Kerala. ~ 1492 ~ *International Journal of Chemical Studies*, 7(2), 1492–1496.
- Nachreiner, A. E. (1938). THE BIOLOGY OF THE GARDEN CENTIPEDE, SCUTIGERELLA IMMACULATA. In *A Journal of Agricultural Science Published by the California Agricultural Experiment Station VOLUME* (Vol. 11).
- Plum, N. (2005). TERRESTRIAL INVERTEBRATES IN FLOODED GRASSLAND: A LITERATURE REVIEW. In *WETLANDS* (Vol. 25, Issue 3).
- Ponnamperuma, F. N. (1972). The chemistry of submerged soils. In *Advances in Agronomy* (Vol. 24, pp. 29–93). Academic Press Inc.
- Pullman, G. S., & DeVay, J. E. (1981). Effect of soil flooding and paddy rice culture on the survival of *Verticillium dahliae* and incidence of *Verticillium* wilt in cotton. *Phytopathology*, 71(12), 1285–1289.
- Rowaan, P. A. (1951). *Overzicht van inundatieonderzoek in Nederland tot 1944* (Issue 23511). Rijksoverheid.
- Runia, W., Molendijk, L., Regeer, H., & Venhuizen, A. (2013). Effectiviteit inundatie voor de bestrijding van *Globodera pallida* en *Verticillium dahliae*. *PA Rapport Project 3250224101*.
- Runia, W. T., & Molendijk, L. P. G. (2010). Physical Methods for Soil Disinfestation in Intensive Agriculture: Old Methods and New Approaches. *Acta Horticulturae*, 883, 249–258.

- Sahrawat, K. L. (1976). Organic matter accumulation in submerged soils. In *Advances in Agronomy* (Vol. 81, pp. 169–201). Academic Press Inc. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)81004-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81004-0)
- Saraiva, A. L. da R. F., Bhering, A. da S., do Carmo, M. G. F., Andreote, F. D., Dias, A. C. F., & Coelho, I. da S. (2020). Bacterial composition in brassica-cultivated soils with low and high severity of clubroot. *Journal of Phytopathology*, 168(11–12), 613–619. <https://doi.org/10.1111/jph.12941>
- Schanz, T., Tripathy, S., & Sridharan, A. (2018). Volume change behaviour of swelling and non-swelling clays upon inundation with water and a low dielectric constant fluid. *Applied Clay Science*, 158, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.03.031>
- Sevenants, A. (1960). Verslagen van landbouwkundige onderzoeken en hun resultaten in Nederland (1945–1958). In *Literatuuroverzichten* (Issue 63.001.5 (492)). Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie.
- Starr, M. P., Stolp, H., Trüper, H. G., Balows, A., & Schlegel, H. G. (1981). *The Prokaryotes - Volume I - Habitat, isolation and identification: Vol. I*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmnH. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-13187-9>
- Stover, R. H. (1979). Flooding of Soil for Disease Control. *Developments in Agricultural and Managed-Forests Ecology*, 6, 19–28.
- Tadepalli, R. (1991). *The collapse behavior of a compacted soil during inundation*.
- Thompson, A. (2017). *Biogeochemical Response of Multiple Iron Redox Oscillations: Laboratory and Field Investigations Landscape Evolution Observatory View project Scaling Up of Dynamic Soil Properties in space and time using Ecological Sites, Soil Taxonomy, Land-use and Land cover in the Southern Coastal Plain United States View project*. <https://www.researchgate.net/publication/277997911>
- Van Beekom, C. W. C., Westerhof, J. J., & Van Zaltbommel, L. K. (1961). *Herstelmaatregelen, onderzoek en voorlichting - Deel II: Onderzoek zoutwaterinundatie*. Rijksoverheid.
- Van Os, G. (2003). *Ecology and control of Pythium root rot in flower bulb culture E UB*.
- Visser, J. H. M., Postma, J., Brinkman, P., van Geel, W., & Molendijk, L. P. G. (2021). *Effectiviteit van inundatie voor de bestrijding van Meloidogyne chitwoodi: Onderzoek naar de effectiviteit van inundatie op praktijkpercelen: Onderzoek naar effect van inundatie-duur, temperatuur en toevoegen van organisch materiaal op de effectiviteit van inundatie*. <https://doi.org/10.18174/561880>
- Wagenin Livestock Research. (2020). Handboek Melkveehouderij 2020 - H1: Bodem en Water. In *Handboek Melkveehouderij 2020* (pp. 1–24).
- Westerhof, J. J., van Beekom, C. W. C., Prummel, J., van der Paauw, F., & Staatsdrukkerij. (1951). *De inundaties gedurende 1944-1945 en hun gevolgen voor de landbouw*. Ministerie van Landbouw, Visserij en Voedselvoorziening.
- Yao, H., Conrad 1*, R., Wassmann, R., & Neue, H. U. (1999). Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy. In *~ Biogeochemistry* (Vol. 47, Issue 9). KluwerAcademic Publishers.
- Zhang, Z., & Furman, A. (2021). Soil redox dynamics under dynamic hydrologic regimes - A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 763). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143026>
- Zorn, M. I., Van Gestel, C. A. M., & Eijsackers, H. (2005). Species-specific earthworm population responses in relation to flooding dynamics in a Dutch floodplain soil. *Pedobiologia*, 49(3), 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2004.08.004>
- Zorn, M. I., Van Gestel, C. A. M., Morrien, E., Wagenaar, M., & Eijsackers, H. (2008). Flooding responses of three earthworm species, *Allolobophora chlorotica*, *Aporrectodea caliginosa* and *Lumbricus rubellus*, in a laboratory-controlled environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3), 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.028>

Bijlage 1 Invloed zout water op kleigronden

In het Handboek Melkveehouderij (Wageningen Livestock Research, 2020) wordt beschreven dat alle water met een C-cijfer (aantal grammen keukenzout (NaCl)/100 gram grond) volledig onbruikbaar is voor de landbouw. Op basis van de gegevens van (Hissink, 1933b) hadden de jonge, nog niet ontwaterde poldergronden van de zuidelijke Flevopolder een C-cijfer van 12-16. Ter vergelijking: brak water heeft een C-cijfer van rond de 7 en zeewater 25-30. De structuur van deze nog door zeewater natte gronden wordt omschreven als 'vlokkerig en plastisch/kneedbaar'. Na 3 jaar van afwatering, uitlogen van zouten en oxidatie aan de lucht daalt het C-cijfer naar 0,6-1,8. Verder wordt tijdens dit proces een deel van de organische stof omgezet, waarbij koolzuur wordt gevormd. Dit koolzuur reageert met de aanwezige koolzure kalk (CaCO_3) tot calciumbicarbonaat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). De kationen van het opgeloste calcium (Ca^{2+}) verdringen de natrium kationen (Na^+) (Afb. 10).



Figuur 10 Schematische weergave van het effect van de uitwisseling van Na-kationen en Ca-kationen op de binding tussen kleiplaatjes. Uit: (Kong, D-J. et al., 2017)

Het verschil in het effect dat deze uitwisseling heeft op de structuur van de kleigrond is uitstekend beschreven in (Hanson, 2006):

"Omdat enkelwaardige natriumionen minder sterk worden aangetrokken door de negatieve lading van de kleiplaatjes dan calciumionen, strekt de laag natriumionen zich verder van de kleiplaatjes uit. Hierdoor wordt de afstand tussen aangrenzende kleiplaatjes groter en zwelt de bodem meer op.

Tweewaardige calciumionen worden sterker aangetrokken door de negatieve lading van de kleiplaatjes en als gevolg daarvan strekt de ionenlaag zich minder ver van de kleiplaatjes uit. Dit betekent een kleinere scheidingsafstand tussen de plaatjes en minder zwelling van de bodem.

Het vervangen van uitwisselbaar natrium door calcium kan dus de zwelling verminderen en de infiltratie verbeteren. Door de relatief hogere concentratie van ionen in de buurt van de kleiplaatjes heeft het infiltrerende water ook de neiging om in de ruimten tussen de plaatjes te stromen, waardoor deze steeds verder uit elkaar komen te liggen. Als de ruimte tussen de kleiplaatjes te groot wordt, treedt dispersie op, waarbij de kleiplaatjes met het infiltrerende water meegevoerd kunnen worden en vast kunnen komen te zitten in grote bodemporiën, wat een verdere verlaging van de infiltratie veroorzaakt."



better
Together



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research

Open Teelten

Edelhertweg 1

Postbus 430

8200 AK Lelystad

T (+31)320 29 11 11

www.wur.nl/openteelten

info.openteelten@wur.nl

Rapport WPR-OT 1062

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.