rivm

Briefrapport 607050003/2008
J. Claessens | A. van der Wal

Verkenning effecten hoogwaterstanden op de bodemkwaliteit in het landelijke en stedelijke gebied

rivm

RIVM Briefrapport 607050003/2008

Verkenning effecten hoogwaterstanden op de bodemkwaliteit in het landelijke en stedelijke gebied

Jacqueline Claessens, RIVM
Annemieke van der Wal, RIVM

Contact:
Piet Otte
Laboratorium voor Ecologische Risicobeoordeling
PF.Otte@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, in het kader van het RIVM project M/607050/08, LMV Bodemkwaliteit Leefomgevingskwaliteit

© RIVM 2008
Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

rivm

Rapport in het kort

Verkenning effecten hoogwaterstanden op de bodemkwaliteit in het landelijke en stedelijke gebied

Klimaatverandering kan in Nederland leiden tot een stijgende zeespiegel, grootschalige overstromingen of extreme neerslag en vormen een mogelijk risico voor mens en milieu als er geen maatregelen worden getroffen. In dit rapport worden de mogelijke effecten van hoogwaterstanden op de huidige situatie van bodemverontreiniging en bodemkwaliteit in Nederland geïnventariseerd op basis van wetenschappelijke literatuur. In het landelijke gebied wordt het effect van overstroming op de bodemkwaliteit aan de hand van ecosysteemdiensten in landbouw- en natuurgebieden onderzocht, en in het stedelijke gebied het effect op de (al aanwezige) bodemverontreiniging. De effecten van een overstroming worden verder ingedeeld in vernatting met zoet en met zout water op verschillende bodemtypen. Naast een inschatting van de risico's op de huidige situatie van de Nederlandse bodemkwaliteit bij grootschalige overstromingen, worden er in dit rapport maatregelen en aanbevelingen gegeven om in te spelen op toekomstige overstromingen.

Trefwoorden:
Overstroming, bodemverontreiniging, bodemkwaliteit, ecosysteemdiensten, landelijk gebied, stedelijk gebied, zoet water, zout water

Inhoud

Samenvatting **5**

1 Inleiding **7**

2 Effect van overstroming in landelijk gebied **11**
2.1 Effect van overstroming op de bodemvruchtbaarheid 13
2.1.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei) 13
2.1.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen) 15
2.2 Effect van overstroming op milieufuncties van de bodem 17
2.2.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei) 18
2.2.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen) 18
2.3 Effect van overstroming op de biodiversiteit 19
2.3.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei) 19
2.3.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen) 20
2.4 Effecten van overstroming op mobiliteit van zware metalen 20
2.4.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei) 20
2.4.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen) 21

3 Effect van overstroming in stedelijk gebied **23**
3.1 Verspreiding van diffuse verontreiniging 23
3.2 Verspreiding van bestaande verontreinigingspluimen 24
3.3 Nieuwe bodemverontreiniging 25
3.4 Verslechterde waterkwaliteit 25
3.5 Verdichting, draagkracht en afdekking van stedelijk gebied 26

4 Conclusies en aanbevelingen **27**
4.1 Gevolgen van overstromingen 27
4.2 Maatregelen en aanbevelingen 30
4.2.1 Waterbergend vermogen van landelijk en stedelijk gebied 30
4.2.2 Ruimtelijke samenhang natuurgebieden 30
4.2.3 Bescherming kwetsbare gebieden (landelijk gebied) 31
4.3 Vervolgonderzoek in risicogebieden 31
4.3.1 Landelijk gebied 31
4.3.2 Stedelijk gebied 32

Referenties **33**

rivm

Samenvatting

Het klimaat op aarde is aan het veranderen. In Nederland kunnen die veranderingen zich manifesteren in een stijgende zeespiegel, grootschalige overstromingen of extreme neerslag en vormen een mogelijk risico voor mens en milieu als er geen maatregelen worden getroffen. In dit rapport worden de mogelijke effecten van hoogwaterstanden op de huidige situatie van bodemverontreiniging en bodemkwaliteit in Nederland geïnventariseerd op basis van wetenschappelijke literatuur. In het landelijke gebied wordt het effect van overstroming op de bodemkwaliteit aan de hand van ecosysteemdiensten in landbouw- en natuurgebieden onderzocht, en in het stedelijke gebied het effect op de (al aanwezige) bodemverontreiniging. De effecten van een overstroming werden verder ingedeeld in vernatting met zoet water en vernatting met zout water.

Effect van hoogwaterstanden in het landelijke gebied
De bodemstructuur, de groei van planten en de levering en retentie van nutriënten aan planten staat onder druk bij een overstroming. Het is echter afhankelijk van de duur van de overstroming en de condities van de bodem hoe de bodemvruchtbaarheid zich zal herstellen. Bij een overstroming met zout water zijn de effecten groter dan met zoet water, omdat het zout achterblijft na verdamping van water. Het herstel van veen en zeeklei gebieden die zijn overstroomd met zout water, duurt waarschijnlijk langer dan zand en rivierklei gebieden die zijn overstroomd met zoet water.

Als de overstroming niet langer duurt dan een aantal weken, kan de biodiversiteit van soorten zich herstellen mits er genoeg individuen van elke soort overgebleven zijn die de overstroming hebben overleefd. Verzilting van de bodem kan echter grote en langdurige effecten hebben op de samenstelling van de vegetatie.

Effect van hoogwaterstanden in het stedelijke gebied
Door overstromingen kunnen diffuse verontreinigingen verspreiden, zoals lood dat vaak voorkomt in oude binnensteden. Ook kunnen de gehalten aan arseen toenemen door veranderingen in de fysisch-chemisch condities van de bodem. Een ander risico van overstromingen in het stedelijke gebied is het ontstaan van nieuwe verontreinigingspluimen. Bij overstromingen kunnen giftige stoffen uit opslagtanks in het milieu terecht komen.

De waterkwaliteit van het beschikbare water na een overstroming kan zijn aangetast door een verontreiniging met giftige stoffen en ziekteverwekkende organismen. Bij direct contact met dit water kan dat leiden tot (gezondheids)problemen. Het verontreinigde water kan ook een groot gebied diffuus verontreinigen.

Afdekking van de bodem in het stedelijke gebied leidt tot het verlies van waterdoorlatend en het waterbergende vermogen, wat een probleem kan zijn in het geval van extreme neerslag of overstromingen. Aangezien het stedelijke gebied in de Randstad voornamelijk is gebouwd op veen en zeeklei, zijn deze bodems gevoelig voor verdichting. Ook de

draagkracht van de bodem vermindert door overstromingen, wat grote gevolgen kan hebben voor de bebouwing in het stedelijke gebied.

Conclusies landelijk gebied
De effecten van overstromingen op de landbouw kunnen leiden tot effecten op de voedselproductie. De hersteltijd van de bodemkwaliteit is afhankelijk van de duur van overstroming en de kwaliteit van het overstromende water (zoet/zout en eventueel verontreinigd). Het is belangrijk om een beeld te krijgen van de mogelijke opkomst van ziekten en plagen. Ook dient er ingezoomd te worden op de reactie van individuele gewassen op regio niveau om een genuanceerd beeld te krijgen wat het effect van overstroming zal zijn op de voedselproductie.

Een goede ruimtelijke samenhang tussen natuurgebieden is nodig om de migratie van soorten mogelijk te maken wanneer hun geschikte habitat onder water is gelopen. Daarnaast is het vergroten van leefgebieden gunstig voor de kolonisatie van nieuwe gebieden. Hierbij kan met de planning van ruimte in het landelijke gebied rekening mee worden gehouden. De meest kwetsbare landbouw- en natuurgebieden voor overstromingen moeten extra in bescherming worden genomen door preventieve maatregelen, zoals het ophogen van dijken. Ook kan het preventief overgaan op een bodemgebruik dat bodembeluchting en -drainage stimuleert een goede maatregel zijn.

Conclusies stedelijk gebied
Verspreiding van bestaande grondwaterpluimen en uitspoeling van zware metalen, nutriënten en bestrijdingsmiddelen door overstromingen kunnen leiden tot problemen in nabijgelegen waterwingebieden. In het geval van een overstroming met zout water in West Nederland kan het gevaar ook ontstaan dat niet voldoende zoet water meer aanwezig is om de bevolking van drinkwater te voorzien.

Ruimte bieden aan de grotere dynamiek van de waterhuishouding, is een maatregel om in te spelen op overstromingen. Ook meer openbaar groen en minder afdekking in stedelijk gebied zijn maatregelen om infiltratie en waterbergende vermogen van de bodem te verhogen.

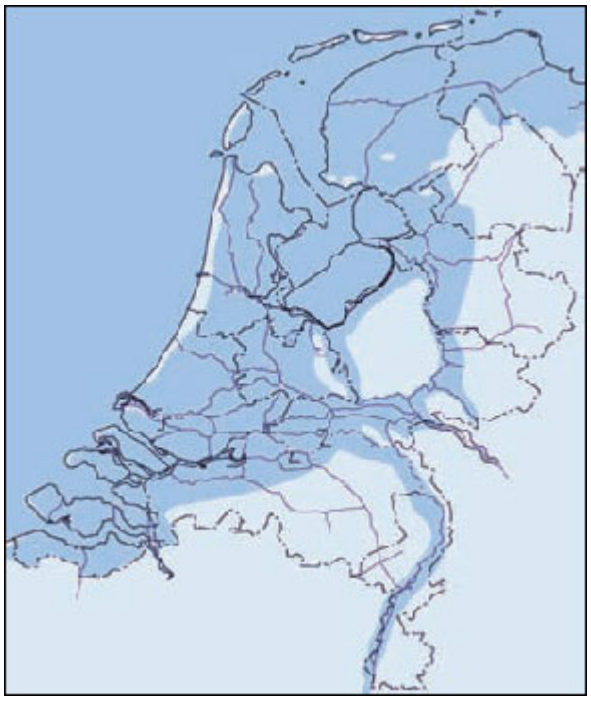
Op dit moment is het onduidelijk onder welke omstandigheden bij een grootschalige overstroming opslagtanks lek slaan waardoor giftige stoffen kunnen verspreiden in het milieu. Het in kaart brengen van de opslagplaatsen van giftige stoffen geeft inzicht in de locatie en verspreiding van de stoffen en kan helpen bij de beoordeling van de risico’s bij hoogwaterstanden voor mens en milieu.

1 Inleiding

Het klimaat op aarde is aan het veranderen. Temperatuurstijgingen van 2°C zijn voorspeld en brengen al grote veranderingen in het klimaat met zich mee. In Nederland kunnen die veranderingen zich manifesteren in een stijgende zeespiegel, grootschalige overstromingen of extreme neerslag (website KNMI, 2008) en vormen een mogelijk risico voor mens en milieu als er geen maatregelen worden getroffen. In een recent uitgebracht rapport van de Deltacommissie wordt de zeespiegelstijging geschat op 0,65 – 1,3 meter in 2100 en 2 – 4 meter in 2200 (Deltacommissie, 2008). Twee soorten overstromingen kunnen worden onderscheiden:

- overstroming van de Randstad doordat de Noordzee wordt opgestuwd door zeer zware storm
- overstroming van Nederlandse rivieren en meren door extreem zware regenval of veel smeltwater uit de Alpen
- Of beide, wat het meest gevaarlijk is aangezien het water uit de rivieren dan niet naar zee kan (Figuur 1)

Figuur 1: Risicogebieden voor overstroming vanuit zee of rivier.
Bron: Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Daarnaast kan langdurig zware regenval op elke plaats in Nederland voor wateroverlast zorgen. Wateroverlast kan een risico vormen voor bestaande ecosystemen. Verontreinigd water kan zich uitspreiden over het land en diffuse bodemverontreiniging veroorzaken. Ook kunnen toxische stoffen uit ondergelopen afvalstortplaatsen zich mogelijk verspreiden via het water. Het grond- en oppervlaktewater kan vervuild worden door uitspoeling van nutriënten, gewasbeschermingsmiddelen en zware metalen. Een langdurig hogere waterstand op bodems kunnen de ecologische processen verstoren en op deze manier het huidige landgebruik aantasten. Overstroming van land verandert de bodemstructuur en zorgt voor zuurstofarme condities. Overstroming vanuit de zee zorgt bovendien voor de toevoer van zout water, wat weer een extra stress factor kan zijn voor organismen en van invloed is op de chemische processen in de bodem.

In dit onderzoek worden mogelijke effecten van hoogwaterstanden en extreme hoeveelheden neerslag op de huidige situatie van bodemverontreiniging en bodemkwaliteit in Nederland geïnventariseerd op basis van de wetenschappelijke literatuur. Het gaat hierbij om de risico's op de bodem in heel Nederland, deze risico's kunnen een direct en indirect effect hebben op de mens maar ook op ecosystemen.

We maken een onderscheid tussen de risico's van hoogwater in het landelijke (Hoofdstuk 2) en het stedelijke gebied (Hoofdstuk 3) omdat in de stedelijk gebieden andere aspecten belangrijk zijn dan in het landelijke gebied. Daarnaast onderscheiden we de effecten naar het type grondsoort (zie Kader 1). Op verschillende grondsoorten spelen andere bodemprocessen een rol. Op zandbodems kan het water gemakkelijk wegzijgen, maar op de lager gelegen veengebieden niet. De effecten van een overstroming zullen verder ingedeeld worden in vernatting met zoet water en vernatting met zout water. Overstroming met zout water vormt vooral een risico voor gebieden gelegen langs de kust, en overstroming met zoet water vormt vooral een risico voor gebieden langs rivieren. In Hoofdstuk 4 geven we een samenvatting van de mogelijke effecten van hoogwaterstanden in het landelijke en stedelijke gebied. Bovendien geven we vervolgonderzoek voor de risicogebieden aan en worden er mogelijke maatregelen genoemd. De resultaten van dit rapport zijn besproken met Tineke Troost (Deltares) en Claudette Spiteri (Deltares).

rivm

Kader 1
Beschrijving grondsoorten en bodemgebruik

In Figuur 2 staan de vier belangrijkste grondsoorten en bodemgebruik van Nederland weergegeven. Het bedekte oppervlak bestaat voornamelijk uit stedelijk gebied.

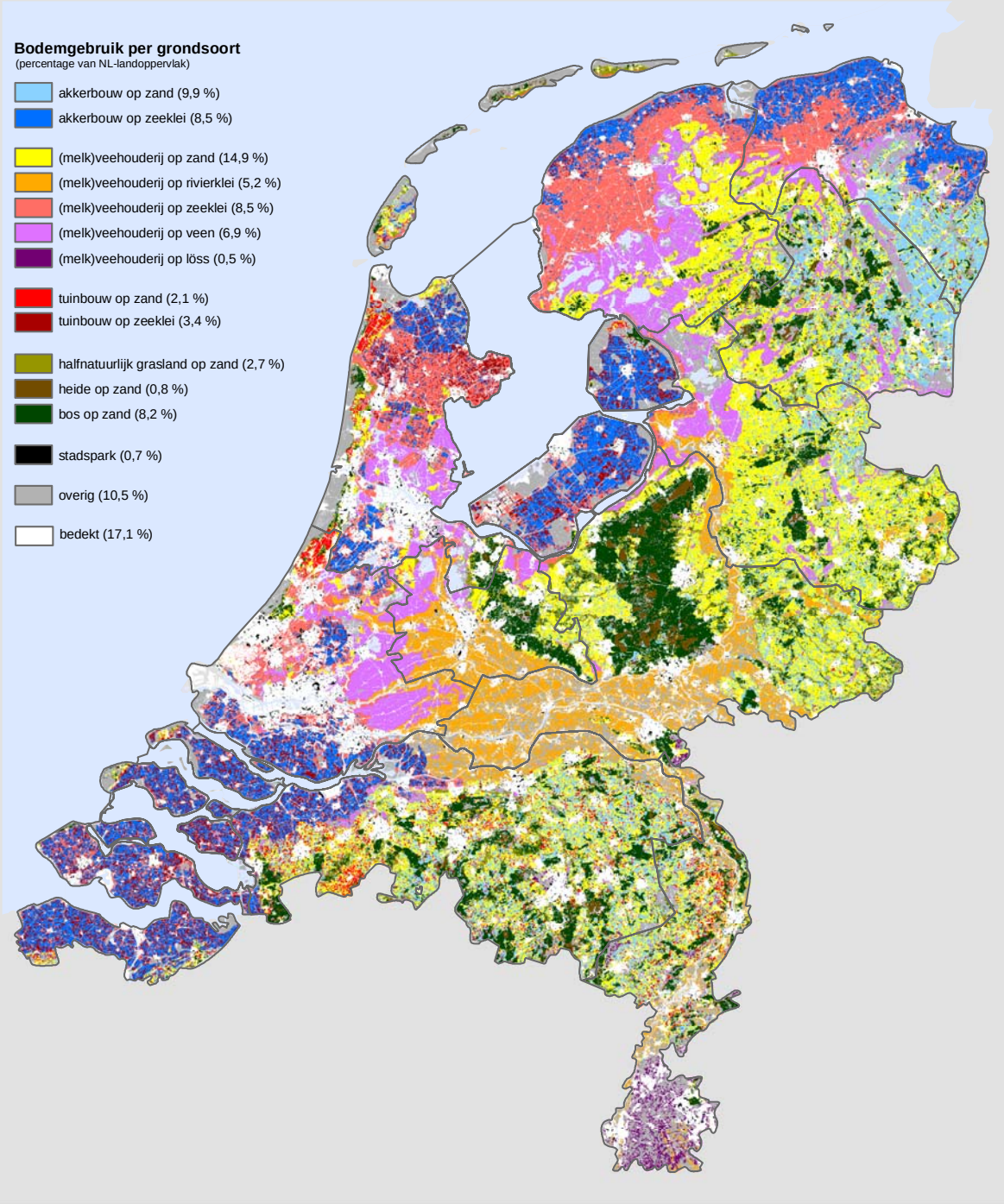
Zand
Zandgronden komen vooral voor in de hoger gelegen delen van Nederland, in delen van Drenthe, Overijssel, Gelderland, Utrecht, Brabant, Limburg, de kusstroken en de Waddeneilanden. Zand bestaat uit zeer kleine stukjes steen en mineralen (63 µm- 2 mm) en is waterdoorlatend. De zandgebieden in Nederland worden voornamelijk gebruikt voor akkerbouw, melkveehouderij, tuinbouw, bos, heide en halfnatuurlijke graslanden.

Rivierklei
De rivierkleigebieden bevinden zich langs de Rijn, de Maas en de IJssel en liggen dus lager maar worden omringd door hoger gelegen gebieden. Rivierklei bestaat uit fijne korrels en wordt gebruikt voor het maken van stenen. De rivierklei gebieden in Nederland worden voornamelijk gebruikt voor melkveehouderij en boomgaarden.

Zeeklei
Gronden met zeeklei komen voornamelijk voor in de lager gelegen delen van Nederland; in Groningen en Friesland, in Flevoland, in Zeeland, in Zuid-Holland en in de kop van Noord-Holland. Kleideeltjes zijn kleiner dan 2 µm en kleigronden zijn, vergeleken met zandgronden, slecht waterdoorlatend. Hierdoor hebben kleigronden ook minder last van uitspoeling van nutriënten en zijn ze voedselrijk. Zeeklei bevat minder organische stof en meer kalk dan rivierklei. De zeeklei gebieden in Nederland worden voornamelijk gebruikt voor akkerbouw, melkveehouderij en tuinbouw.

Veen
De laagveengebieden van Nederland bevinden zich in Noord- en Zuid Holland en in het noorden van Nederland. De laagveengebieden zijn ontstaan door hoge grondwaterstanden. Hoogveen heeft zich gevormd op de hoger gelegen gronden in gebieden met een ondoorlatende laag in de ondergrond (leem of klei). Hoogveen komt echter bijna niet meer voor in Nederland omdat een groot deel in de 19de eeuw is afgegraven voor brandstofvoorziening. Veengebieden in Nederland worden voornamelijk gebruikt voor melkveehouderij en halfnatuurlijke, natte graslanden.

Figuur 2: Bodemgebruik en grondsoorten van Nederland



2 Effect van overstroming in landelijk gebied

Een goede kwaliteit van de bodem kenmerkt zich door goed functionerende ecosysteemdiensten van de bodem die vooral van belang zijn in het landelijke gebied (landbouw en natuur gebieden), maar kunnen ook van belang zijn in het stedelijke gebied (stadsparken). Ecosysteemdiensten zijn ecologische processen die door de gebruiker benut kunnen worden. Voorbeelden van ecosysteemdiensten zijn nutriëntenlevering van de bodem, weerstand tegen stress en afbraak van stoffen tot onschadelijke verbindingen (Kader 2). Het hangt dus af van het bodemgebruik welke ecosysteemdiensten relevant zijn voor de gebruiker (Rutgers et al., 2005). Een boer zal bijvoorbeeld meer belang hechten aan de vruchtbaarheid van de bodem, terwijl een natuurbeheerder de biodiversiteit van het ecosysteem belangrijk acht. Bodemorganismen spelen een belangrijke rol in de ecologische processen van de bodem. Een aantasting van de bodemorganismen kan er dus tot leiden dat bepaalde ecologische processen niet goed meer kunnen verlopen, en een negatief effect hebben op het gebruik van de bodem.

Kader 2: Ecosysteemdiensten

Voor het landelijke gebied zullen de effecten worden beschreven aan de hand van de ecosysteemdiensten zoals die door (Rutgers et al., 2007) zijn onderscheiden:

Bodemvruchtbaarheid
De bodemvruchtbaarheid is essentieel voor de productie van flora en fauna in natuurlijke en landbouwgebieden. De bodem is het substraat voor planten en indirect voor andere organismen. Deelaspecten van bodemvruchtbaarheid zijn:

- Nutriënten retentie en levering: het leveren en vasthouden van voedingsstoffen voor planten. Een goede nutriëntenkringloop is gekenmerkt door activiteit van het bodemleven en voldoende organische stof.
- Bodemstructuur: een goede bodemstructuur draagt bij aan de regulatie van water, het vasthouden van nutriënten en een goede doorworteling voor planten. Een goede structuur is gekenmerkt door voldoende aggregaatstabiliteit, porositeit en organische stof. Vooral regenwormen vormen stabiele macroporiën.
- Het natuurlijke vermogen van de bodem om ziekten en plagen te weren. Dit is vooral belangrijk in de landbouw.

Weerstand tegen stress en adaptatie
De bodem wordt vaak eenzijdig gebruikt. Om de continuïteit van het gebruik te behouden, moet de bodem in staat zijn om weerstand te bieden tegen bedreigingen, en zich redelijk snel kunnen herstellen na stress veroorzaakt door de natuur of door de mens. Ook dient de bodem flexibel te zijn, zoals de aanpassing van de bodem aan een ander gebruik. Deze ecosysteemdienst is niet eenvoudig te meten, en wordt vaak bepaald aan de hand van de biodiversiteit van bodemorganismen of het landgebruik (vruchtwisseling).

Milieufuncties
Het bodemecosysteem is een onderdeel van onze leefomgeving waarin lucht, oppervlaktewater, grondwater en transport in de bodem een rol spelen. Belangrijke processen in de bodem zijn hieraan gekoppeld:

- Fragmentatie en afbraak van organisch materiaal en het behoud van een relatief stabiele fractie van organische stof in de bodem. Een indicator hiervoor is een actief bodemleven en de kwaliteit en hoeveelheid organische stof.
- Het zelfreinigende vermogen van de bodem, zoals het onschadelijk maken van verontreinigende stoffen en afbraak van milieu-eigen stoffen.
- Waterretentie, het vermogen van de bodem om water vast te houden voor opname van planten.
- Het bufferen van het klimaat, zoals het bufferen van vocht en temperatuur, maar ook de vastlegging van broeikasgassen.

Biodiversiteit
De bodem vorm een habitat voor organismen. De bescherming van de structurele, genetische en functionele biodiversiteit kan niet direct gekoppeld worden aan een dienst, maar wordt toch belangrijk gevonden omdat we nu nog niet weten wat het nut is van vele organismen en hun ecologische diensten. Vaak wordt aangenomen dat een gezonde bodem correleert met een hoge biodiversiteit.

2.1 Effect van overstroming op de bodemvruchtbaarheid

De bodemvruchtbaarheid is essentieel voor de productie van flora en fauna in natuurlijke en landbouwgebieden. De bodem is het substraat voor planten en indirect voor andere organismen. Onderstaande paragrafen geven een puntsgewijs overzicht van de effecten van hoogwater op de bodemvruchtbaarheid.

2.1.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei)

Verstoring van de bodemstructuur
Zandgrond loopt het risico tot verslemping van de bodem bij zware regenval. Door verdichting van de bodem is er een slechtere doorluchting, afwatering en wortelgroei (Faber et al., 2008). Verdichting door zware regenval is een minder groot probleem op akkers en graslanden met voldoende organische stof waar weinig grondbewerking heeft plaatsgevonden. Door de aanwezigheid van regenwormen hebben deze gronden een betere weerstand tegen compactie. Ook zorgt een organische laag voor bescherming tegen inslag van het vallende water. Bij zware regenval kan de bodem dichtslaan, vooral wanneer de bodem braak ligt of net is ingezaaid. De schade kan bestaan uit slechte kieming van gewassen, slechte en ondiepe beworteling, plasvorming en denitrificatie (Lipiec & Stepniewski, 1995). Deze schade is moeilijk te herstellen. Slechte infiltratie van water kan ook resulteren in afspoeling, waardoor grond en nutriënten verloren gaan.

Verminderde opname van nutriënten door mycorrhiza schimmels
De meeste planten gebruiken schimmels om nutriënten op te nemen. De wortels van planten vormen daarbij een associatie met mycorrhiza schimmels. De plant voorziet de schimmel in koolstof, en de schimmel voorziet de plant in een verhoogde capaciteit om nutriënten en water op te nemen. Veel waterplanten vormen een associatie met mycorrhiza's tijdens de droge seizoenen. Hierbij zien we een relatief grotere kolonisatie van mycorrhiza in vochtige bodems vergeleken met zeer droge of overstroomde bodems. De sporen van mycorrhiza zijn op het land in overvloed aanwezig maar komen relatief veel minder voor in natte gebieden en zijn zeldzaam of afwezig in water (Stevens & Peterson, 1996). Deze sporen kiemen slechter bij lage zuurstofconcentraties. Het lijkt er dus op dat planten op het land die een bestaande associatie hebben met mycorrhiza's negatief beïnvloed kunnen worden door een overstroming, en hun wortels niet gemakkelijk opnieuw gekoloniseerd worden zolang er nog water op het land staat.

Verlies van stikstof door nitraat reducerende omstandigheden
Naast het verlies van mycorrhiza's, heeft overstroming van land nog een ander effect op de nutriënten cyclus. Als een zuurstofrijk sediment overstroomt, kunnen de zuurstofrijke omstandigheden overgaan in nitraatreducerende omstandigheden. Onder nitraatreducerende omstandigheden wordt nitraat omgezet in N_2 wat verloren gaat naar de atmosfeer (Olde Venterink et al., 2003). Dit heeft als gevolg dat planten geen nitraat meer

tot hun beschikking hebben, en langzamer gaan groeien. Op den duur zal denitrificatie ook geremd worden, omdat er geen nitraat meer beschikbaar is. De beschikbare stikstof kan dan verschuiven van nitraat- naar ammoniumvorm (Sival et al., 2002).

Overstromingen zullen echter vaak leiden tot aanvoer van stikstof omdat veel oppervlaktewater in Nederland verhoogde stikstof concentraties heeft. Het sediment wordt dan juist aangerijkt in stikstof. Vaak zijn overstromingsgebieden niet zuurstofrijk en hebben een hoge denitrificatiecapaciteit (Forshay en Stanley, 2004). Overstromingen met nitraatrijk water uit de rivieren kunnen dan leiden tot relatief grote verliezen van N_2 naar de atmosfeer. De denitrificatie in het sediment wordt bepaald door de hoeveelheid nitraat die wordt aangevoerd door het overstromende water (Olde Venterink et al., 2003, Forshay en Stanley, 2004).

Verstoorde groei door anaerobe condities

Tolerantie van planten tegen anaerobe condities kan variëren van een paar uur, tot een paar dagen of een paar weken en is afhankelijk van de soort, maar ook van de leeftijd van de plant, de kwaliteit van het water en omgevingskenmerken. Inundatie die langer duurt dan een paar weken is voor de meeste hogere plantensoorten dus dodelijk. Er zijn echter wel planten die mechanismen hebben om langdurige inundatie te overleven, zoals rijst (Vartapetian & Jackson, 1997). Bij inundatie is de groei van wortels en mycorrhiza's meer gereduceerd dan groei van de bladeren. Als het water zich weer terugtrekt, zijn planten minder tolerant voor verdroging, vanwege hun gereduceerde wortelstelsel. De kwaliteit van vruchten is gereduceerd door een veranderde chemische samenstelling en de vruchten zijn kleiner (Kozlowski. 1997).

Vorming van sulfiden en mobilisatie van fosfaat

De laatste jaren zijn concentraties fosfaat in rivierwater sterk afgenomen en overstromingen zullen dus waarschijnlijk niet leiden tot een verhoogde input van fosfaat (Loeb et al., 2007, Lamers et al., 1998). Wel is rivierwater nog steeds verontreinigd met sulfaat. Onder sulfaatreducerende omstandigheden worden dan sulfiden gevormd. De vorming van sulfiden kan twee effecten hebben op natuurgebieden (Loeb et al., 2007). (1) Onder ijzerloze omstandigheden worden vrije sulfiden gevormd die toxisch kunnen zijn voor verschillende organismen. Vaak zijn de ijzerconcentraties in de overstromingsgebieden echter vrij hoog (Loeb et al., 2008). (2) Onder ijzerrijke omstandigheden worden dan ijzer-sulfiden complexen gevormd. De vorming van deze complexen resulteert in de afbraak van ijzer-fosfaat mineralen met als gevolg mobilisatie van fosfaat (Lamers et al., 1998).

Toxiciteit van ijzer en mangaan

Naast de mobilisatie van fosfaat kunnen de reducerende omstandigheden leiden tot ijzertoxiciteit voor verschillende organismen (Loeb et al., 2008). Het in oplossing gaan van ijzer en mangaan kan ook een negatief effect hebben op planten. Het wortelstel kan afsterven door langdurige overstroming, met als gevolg dat de productie van planten stagneert. De aanwezigheid van toxische stoffen in overstromingsgebieden, zoals ijzer, sulfide en ammonium, wordt in grote mate bepaald door de beschikbaarheid van organisch stof (Loeb et al., 2007). De aanwezigheid van organisch stof bepaalt namelijk het verloop

van de verschillende reductieprocessen waarbij deze stoffen vrijkomen.

Herstel van vochtgehalte in land- en natuurbodems
Het effect van inundatie op het vochtgehalte is sterker op zware kleigrond dan op zandgrond (Sival et al., 2002). Een zandgrond droogt sneller op na een overstroming, zodat zuurstofarme condities minder lang duren dan op een kleigrond. Een bodem die van nature drassig is, zal minder last ondervinden van inundatie dan een van nature drogere bodem. Drassige bodems en de vegetatie zijn al meer aangepast aan anaerobe milieus dan drogere systemen. Droge graslanden op rivierklei zijn slecht bestand tegen een zomeroverstroming, maar verdragen wel een winteroverstroming. Twintig of meer dagen leidt tot een achteruitgang van het aantal plantensoorten in het rivierengebied. Een slechte oppervlaktewaterkwaliteit kan leiden tot eutrofiering, en een negatief effect hebben op de vegetatie van voedselarme natuurgebieden.

Ziekten en plagen
Overstromingen kunnen leiden tot wortelrot, en een toename in de gevoeligheid van de plant. Sommige pathogene schimmels kunnen lage zuurstofconcentraties verdragen, en de wortels aantasten (Kozlowski, 1997). De aardappel is erg gevoelig voor vernatting, en wanneer het veld meerdere dagen onder water staat, treden grote verliezen op door verrotting van de knol (Blom et al., 2008).
De microbiële gemeenschap verandert bij overstroming (Bossio & Scow, 1998), en kan daardoor van invloed zijn op de natuurlijke onderdrukking van de bodem tegen ziekten en plagen.

2.1.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen)

Verstoring van de bodemstructuur
Overstroming op kleigronden verandert de bodemstructuur, aggregaten vallen uit elkaar, zuurstof verdwijnt en CO_2 hoopt zich op (Kozlowski, 1997, Van Dam et al., 2007). Akkers met een goede stand van regenwormen en een goede bodemstructuur met veel poriën kunnen grote hoeveelheden water nog verwerken. Gewassen lopen echter het risico tot verdrinking in natte tijden.

Weinig of geen zuurstof in de poriën van de bodem kan veroorzaakt worden door compactie van de bodem door overstromingswater en intensieve grondbewerking. Dit heeft negatieve gevolgen voor de gewassen die er op groeien. Zware compactie van zeeklei leidt tot afname van de koolstof- en stikstofmineralisatie. Denitrificatie treedt op, waardoor planten minder nutriënten kunnen opnemen door wortels (Jensen et al., 1996; Arvidsson, 1999).

Verminderde opname van nutriënten door planten
Het effect van overstroming en zout water op planten gedurende 3 weken leidt tot een reductie van hun netto CO_2 assimilatie en van opname van stikstof en fosfaat (Hartmond et al., 1987). Kolonisatie met mycorrhiza's had geen invloed hierop, waaruit geconcludeerd kan worden dat mycorrhiza's geen extra tolerantie tegen zout of

overvloedig water bieden. Planten met mycorrhiza's hadden een hoger chloride gehalte in hun bladeren, terwijl planten zonder mycorrhiza's een hoger chloride gehalte hadden in hun wortels. Te hoge concentraties van chloride kunnen schadelijk zijn voor de groei van gewassen, zoals aardappels en tomaten.

Afname plantengroei door zout

Zout remt kieming van zaden, remt reproductie en verandert de morfologie van planten. Een combinatie van overstroming en zout remt de groei en overleving van planten meer dan de stressfactoren afzonderlijk. Zout remt ook de vorming van vruchten en reduceert de groei van bladeren meer dan de groei van wortels. De fotosynthese wordt geremd door watergebrek en directe schade van toxische ionen. Zouttolerante planten hebben zich aangepast door zout te tolereren door osmotische aanpassingen of te vermijden door het uitscheiden van zout of zout te verdunnen in de plant (Kozlowski. 1997). Bedektzadigen (bloemplanten) zijn gevoeliger voor overstromingen dan naaktzadigen (coniferen). Verzilting van grondwater wordt veroorzaakt door ionen, namelijk natrium (Na^+), kalium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) en chloor (Cl^-). Deze zoutionen hopen op in grondwater wanneer planten water opnemen, en bemoeilijken vervolgens de verdere opname van water door de plant (Van Dam et al., 2007). Vaak blijven zouten door irrigatie en de resulterende stijging van de grondwaterspiegel in de wortelzone aanwezig. Door verzilting raken bodems en vegetatie beschadigd. Een oplossing zou kunnen zijn om op overstroomde gebieden zoutminnende planten te telen, zoals zeekraal, maar er zijn niet zoveel soorten eetbaar en de verbouwing van deze gewassen is nog in ontwikkeling. Verzilting vormt niet alleen een risico voor landbouwgewassen in de kustgebieden, maar ook voor klei- en veengebieden in Noord- en Zuid-Holland (Blom et al., 2008). Exacte gegevens over zouttolerantie van verschillende plantensoorten onder fluctuerende zoutgehaltes zijn nodig om het risico van verzilting goed in te schatten.

Verzilting kan een bedreiging maar ook mogelijkheden bieden voor natuurwaarden. Op basis van de gevoeligheid van natuurdoeltypen voor verzilting, is bepaald dat natte heide gevoelig is, maar bloemrijk grasland op zand en veen lijken minder gevoelig (Paulissen et al., 2007a). Verzilting kan kansen bieden aan natuurdoeltypen als binnendijkse zilte graslanden. Dit betekent echter niet dat de hersteltijd na verzilting kort is.

Overstromingen met zout water leidt bovendien tot verslechtering van de waterkwaliteit. Boeren kunnen na de overstroming het water niet meer als irrigatiewater gebruiken. Verversing van het water is normaalgesproken erg moeilijk.

Beschikbaarheid van stikstof

Of de beschikbaarheid van stikstof toe- of afneemt onder invloed van verzilting is niet eenvoudig te bepalen. Zeewater is vaak stikstof gelimiteerd (Howarth, 1988) waardoor de stikstof in het sediment niet wordt aangerijkt. De nitrificatie en denitrificatie van het sediment nemen echter af als gevolg van verzilting (Rysgaard et al., 1999). Tijdens nitrificatie wordt ammonium omgezet in nitraat. Door de hoge NaCl concentraties in zout water vindt kationenuitwisseling plaats tussen Na en ammonium (Canavan et al., 2006; Baldwin et al., 2006) waardoor de adsorptie en dus de beschikbaarheid van ammonium afneemt in het sediment. Door verminderde beschikbaarheid van ammonium en een fysiologisch effect op microorganismen neemt de nitrificatie af. Ook het proces van

omzetting van nitraat tot N_2 (denitrificatie) verloopt langzamer. Op deze manier gaat onder invloed van verzilting minder stikstof verloren naar de atmosfeer. Daar komt nog bij dat hoewel denitrificatie afneemt, dissimilatieve nitraatreductie tot ammonium kan toenemen, waardoor de totale nitraatreductie gelijk blijft (Canavan et al., 2007, Laverman et al., 2007). Het stikstof blijft dan in het sediment beschikbaar in een anorganische vorm (ammonium).

Beschikbaarheid van fosfaat

Onder invloed van verzilting wordt fosfaat gemobiliseerd (Spiteri et al., 2008). In de bodem is fosfaat voornamelijk geadsorbeerd aan of gecomplexeerd met ijzeroxiden. De binding van fosfaat aan ijzeroxiden is een pH afhankelijk proces. De binding neemt af bij hogere pH's. Als de bodem overstroomt met zout water zal over het algemeen de pH toenemen omdat zout water meestal een wat hogere pH heeft met als gevolg mobilisatie van fosfaat. Door verzilting komen er ook meer anionen in de bodem, zoals sulfaat. Sulfaat kan net als fosfaat binden aan ijzeroxiden. De competitie tussen fosfaat en sulfaat voor bindingsplaatsen aan ijzeroxiden bepaalt de mobiliteit van deze stoffen. Over het algemeen geldt dat hoe meer sulfaat in de bodem komt, hoe meer fosfaat wordt gemobiliseerd.

De aanwezigheid van sulfaat kan bovendien leiden tot reductie van ijzeroxiden. Door sulfaatreductie worden sulfiden gevormd die vervolgens ijzeroxiden reduceren (Canavan et al., 2006; Roelofs, 1991; Lucassen et al., 2000). Als de ijzeroxiden in het sediment worden gereduceerd, wordt het gecomplexeerde fosfaat ook gemobiliseerd. De reductie van ijzeroxiden leidt tot vrijkomen van Fe(II) in oplossing. Fe(II) kan samen met fosfaat slecht oplosbare neerslagen vormen (Baldwin et al., 2006). Op deze manier wordt fosfaat juist vastgelegd in het sediment. Over het algemeen kan echter worden geconcludeerd dat verzilting van het sediment leidt tot mobilisatie van fosfaat door (1) verhoging van de pH, (2) competitie met sulfaat en (3) reductie van ijzeroxiden (Spiteri et al., 2008).

Toxiciteit van ijzer en mangaan

Verzilting leidt tot een toename van oplosbaarheid van bepaalde mineralen, reductie van ijzer en mangaan, anaerobe decompositie van organisch materiaal en formatie van toxische componenten, zoals sulfides, oplosbaar ijzer en mangaan, en ethyleen wat gevormd wordt door overstroomde planten. De aerobe organismen worden vervangen door anaerobe bacteriën, die denitrificatie en reductie van mangaan, ijzer en zwavel kunnen veroorzaken.

2.2 Effect van overstroming op milieufuncties van de bodem

Het bodemecosysteem is een onderdeel van onze leefomgeving waarin lucht, oppervlaktewater, grondwater en transport in de bodem een rol spelen. Belangrijke processen in de bodem zijn hieraan gekoppeld. Onderstaande paragrafen geven een puntsgewijs overzicht van de effecten van hoogwater op de milieufuncties van de bodem.

2.2.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei)

Uitspoeling van nutrienten
Na omvorming van landbouw in natuur spoelt nitraat uit naar het grond- of oppervlaktewater of nitraat wordt via denitrificatie omgezet tot N_2 en vervluchtigt. De gift van fosfaat uit het verleden is echter zeer groot waardoor grote fosfaatreserves in de bodem zijn opgeslagen. Fosfaat bindt zich over het algemeen goed aan de bodemdeeltjes onder droge omstandigheden, en spoelt dus niet zomaar uit. Na vernatting neemt echter het gehalte aan beschikbaar fosfaat enorm toe en hoopt zich op in de bovenstaande waterlaag (Lamers et al., 2005). Vernatting van ex-landbouwbodems zal dan dus leiden tot eutrofiëring, met als gevolg sterke algenbloei en snelgroeiende planten zoals pitrus die de vegetatie zullen domineren. Dit proces zal vooral spelen op bodems waarin de ijzergebonden fosfaatfractie groot genoeg is. In kalkrijke bodems waarin maar een kleine hoeveelheid fosfaat aan ijzer is gebonden, zal weinig eutrofiëring optreden.

Een vernattingsproef in Brabant (Vredepeel) toonde aan dat het infiltrerende water een sterke invloed heeft op de kwaliteit van het grondwater (De Vos et al., 2006). Afhankelijk van de concentraties van stoffen (zoals nitraat en fosfaat) in het infiltrerende water kan er verdunning of juist een verhoging van concentraties van stoffen in het grondwater zijn. Ook kan vernatten leiden tot een risico voor uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen (Blom et al., 2008).

Waterretentie
Regenwormen dragen bij aan waterinfiltratie in bodems van akkers, graslanden en bossen (Schütz, 2008). Bodems met een goede waterinfiltratie kunnen gebruikt worden voor de productie van drinkwater. Intensieve overstromingen van bodems kunnen regenwormen negatief beïnvloeden, maar korte overstromingen van maximaal 10 dagen met tussenliggende herstelperiodes werken zelfs in het voordeel van regenwormen. Het effect van de overstroming op bijvoorbeeld waterwingebieden is dus afhankelijk van de duur van de hoogwaterstanden.

2.2.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen)

Broeikasgassen
Verhoging van het waterpeil op veenbodems kan de CO_2 uitstoot verlagen tot nul, terwijl de uitstoot van CH_4 dan juist zeer sterk toeneemt. CH_4 is een 23 keer sterker broeikasgas dan CO_2. Toch leidt de ontwikkeling van natte natuur op voormalig agrarisch veengebied over het algemeen tot een netto afname van de totale uitstoot van broeikasgas als de grondwaterstand wordt verhoogd tot aan het maaiveld (Van den Bos, 2003).

2.3 Effect van overstroming op de biodiversiteit

De bodem is een habitat voor organismen. De bescherming van de structurele, genetische en functionele biodiversiteit kan niet direct gekoppeld worden aan een dienst. Biodiversiteit wordt echter toch belangrijk gevonden omdat we nu nog niet weten wat het nut is van vele organismen en hun ecologische diensten. Vaak wordt aangenomen dat een gezonde bodem correleert met een hoge biodiversiteit. Onderstaande paragrafen geven een puntsgewijs overzicht van de effecten van hoogwater op de milieufuncties van de bodems uit de wetenschappelijke literatuur.

2.3.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei)

Het effect van een hoger grondwaterniveau kan van invloed zijn op de soorten die er voorkomen. Uiterwaarden van rivieren zijn gekenmerkt door periodieke overstromingen. Overstromingen van zoet water zijn dus een natuurlijk, vaak voorkomend fenomeen. Grotere dieren zijn in staat om tijdelijk uit het overstroomde gebied te migreren, en weer terug te keren als het waterniveau weer afneemt. Kleinere dieren die minder mobiel zijn, kunnen dit echter niet. Voorbeelden van kleinere dieren zijn mijten en springstaarten. Zij kunnen zich niet over lange afstanden verplaatsen in korte tijd en worden daardoor gemakkelijk beïnvloed door overstromingen. Welke soorten springstaarten overleven, hangt af van de duur van de overstroming en kan van jaar tot jaar variëren (Russell et al., 2004). Springstaarten kunnen maximaal een aantal dagen in onder water gelopen gebieden overleven (Zinkler & Rüssbeck, 1986). Het uitkomen van eitjes die de overstroming hebben overleefd, draagt bij aan de rekolonisatie en is een strategie voor springstaarten en mijten om overstromingen te overleven (Tamm, 1984; Gauer, 1997). In tegenstelling tot springstaarten kunnen mijten wel langer overleven onder water, vooral in de organische strooisellaag waar nog lucht aanwezig is. De verspreiding en reproductie van mijten is echter wel lager dan die van springstaarten, en hun rekolonisatie na verstoring is daardoor lager.

De ruimtelijke samenhang van de Ecologische Hoofdstructuur is belangrijk om soorten te kunnen laten ontsnappen, of soorten de gelegenheid te geven om vanuit naastliggende gebieden de overstroomde gebieden weer te herkoloniseren na het terugtrekken van het water. Er zijn echter ernstige ruimtelijke knelpunten tussen grote eenheden natuur, en die liggen vooral op de hogere zandgronden (Blom et al., 2008). Natuurtypen die gevoelig zijn voor overstroming van oppervlaktewater uit rivieren of beken bevinden zich vooral in hoog Nederland, op de zandgronden en in het heuvelland. Het laagveengebied bevat ongevoelige natuurtypen zoals rietlanden, maar ook gevoelige natuur zoals trilvenen, veenmosrietlanden en elzenbroekbossen.

2.3.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen)

In veengebieden leidt een verlaging van het waterniveau tot meer, en een verhoging van het waterniveau tot minder bodemorganismen (Laiho et al., 2001). Springstaarten en potwormen zijn het meest intolerant voor een hoog waterniveau (> 20 cm). De mesofauna in veengebieden is dus zeer gevoelig voor veranderingen in het waterniveau en kan van invloed zijn op de ecosysteemdiensten (zie kader 1).

Zoetwaterafhankelijke laagveenmoerassen zijn waarschijnlijk zeer gevoelig voor verzilting (Blom et al., 2008). In de module 'Natuur-Terrestrisch', dat ontwikkeld is in het programma 'Waternood' (Stowa, 2006), worden de optimale condities gegeven voor de Natuurdoeltypen, Natura 2000-habitattypen en een groot aantal plantengemeenschappen (http://www.synbiosys.alterra.nl/waternood/). Van veel natuurdoeltypen en habitatrichtlijnsoorten is echter niet bekend hoe gevoelig ze zijn voor verzilting (Paulissen et al., 2007b). Voor bijna alle onderzochte soorten ligt de optimale chlorideconcentratie in het zoete bereik (<150 mg l^{-1}). Zoetwaterafhankelijke organismen zijn in staat tot enige aanpassing aan verhoogde zoutconcentraties in het milieu. Ze zijn echter niet bestand tegen fluctuaties in het zoutgehalte zoals die in brakke milieus voorkomen. De soortenrijkdom in brakke milieus is mogelijk daarom laag. Het effect van verzilting is niet op elke natuurdoeltype even groot, en is afhankelijk van de lokale hydrologie en de zouttolerantie van de aanwezige soorten. Laagveengebieden en rivierengebieden neigen naar dominantie van voor verzilting gevoelige natuurdoeltypen. Een lage geschatte gevoeligheid voor verzilting betekent overigens ook niet dat de hersteltijd van natuurdoeltypen kort is. Hersteltijden voor weinig gevoelige natuurdoeltypen zijn soms meer dan 50 jaar (Paulissen et al., 2007b).

2.4 Effecten van overstroming op mobiliteit van zware metalen

2.4.1 Overstroming met zoet water (zand en rivierklei)

Het gedrag van zware metalen is complex en wordt bepaald door verschillende parameters zoals de pH, aanwezigheid organisch stof en mineralen en de redox omstandigheden (Calmano et al., 1993). Over het algemeen wordt de mobiliteit van metalen in de bovengrond gereguleerd door de pH en organisch stof. In de meer gereduceerde ondergrond wordt de mobiliteit van metalen gereguleerd door neerslag reacties van gereduceerde mineralen (bijvoorbeeld sulfiden). Periodieke wisselingen van droge en natte perioden leiden tot minder stabiele vormen van metaalneerslagen (Calmano et al., 1993), en dus tot een verhoogde mobilisatie van metalen. De belasting van de bodem met metalen is over het algemeen schadelijk voor organismen en de ecosysteemdiensten.

Uitspoeling van zware metalen

Door overstromingen met rivierwater kunnen verhoogde concentraties metaal aangevoerd worden via verontreinigd water en slib. In Nederland zijn veel bodems diffuus verontreinigd met zware metalen. Als gevolg van een overstroming kan deze diffuse

verontreiniging toenemen. Ook kan extreme neerslag op goed doorlatende gronden leiden tot een grotere uit- en afspoeling van metalen naar het grond- en oppervlaktewater. Hierdoor kan de belasting in water met metalen zodanig groot worden, dat het leidt tot overschrijdingen van normen of risico's. Met modelberekeningen kunnen voorspellingen worden gedaan van verhoogde grondwaterbelasting als gevolg van extreme neerslag.

In Nederland is slib vaak ernstig verontreinigd met bijvoorbeeld zware metalen. Als het slib tijdens een overstroming op de kant van een rivier wordt afgezet, wordt de bodem verontreinigd met zware metalen. Het op het land afgezette sediment is onderhevig aan veranderingen in de physisch-chemische omstandigheden, waardoor de beschikbaarheid en mobiliteit kan veranderen (van den Berg et al., 1999). Volgens een studie van Prokop et al. (2003) neemt de beschikbaarheid en mobiliteit van cadmium en zink toe. Tijdens en kort na een overstroming kunnen dan toxische effecten optreden op organismen. Als het slib is afgezet op goed doorlatende gronden, zullen deze toxische effecten afnemen omdat de metalen uitspoelen naar het grondwater (Prokop et al., 2003). Belasting van het grondwater kan dan echter een probleem worden.

De vorming van sulfiden in overstromingsgebieden heeft ook een grote invloed op de mobiliteit van zware metalen (Poot et al., 2007). Zware metalen kunnen worden vastgelegd in slecht oplosbare sulfiden. Alleen onder zuurstofrijke omstandigheden kunnen de metalen weer worden gemobiliseerd en leiden tot verhoogde en mogelijk toxische concentraties in de bodemoplossing.

Mobilisatie van arseen

Arseen komt in de bodem voor als oxyanion. Onder zuurstofrijke omstandigheden wordt de mobiliteit van arseen bepaald door de aanwezigheid van ijzeroxiden (Spijker, 2008). In beekdalen in Oost Nederland is het voorkomen van arseen vaak geassocieerd met ijzeroer. IJzeroer zijn sedimentlagen met een hoog gehalte aan ijzeroxiden, die een grote bindingscapaciteit voor arseen hebben. Als tijdens overstromingen deze arseenhoudende sedimenten worden gereduceerd, kunnen grote hoeveelheden arseen worden gemobiliseerd. De concentraties arseen kunnen zodanig hoog worden dat dit leidt tot ecologische of humane risico's.

2.4.2 Overstroming met zout water (zeeklei en veen)

Uitspoeling van zware metalen

Door overstromingen met zout water kunnen in de bovengrond de omstandigheden meer zuurstofloos worden en kan door de aanvoer van sulfaat sulfaatreductie optreden. Als gevolg van sulfaatreductie worden sulfiden gevormd, die slecht oplosbare neerslagen met zware metalen vormen. Onder invloed van vernatting en verzilting zullen sulfaatreducerende omstandigheden een grotere rol gaan spelen en daardoor in toenemende mate de mobiliteit van zware metalen bepalen (Canavan et al., 2006). Wel dient te worden opgemerkt dat tussen het gedrag van de verschillende metalen grote verschillen kunnen optreden. Zo wordt bijvoorbeeld nikkel minder goed vastgelegd in sulfiden dan andere metalen (Canavan et al., 2006), wat leidt tot een grotere mobiliteit.

Het gedrag van zware metalen in het sediment wordt in grote mate bepaald door de speciatie van metalen. Deze speciatie is van een groot aantal factoren afhankelijk zoals bijvoorbeeld de zuurgraad, de aanwezigheid van zuurstof, organisch stof en andere metalen. Veranderingen in de fysisch-chemisch omstandigheden in het sediment kunnen leiden tot de vorming van bepaalde metaalspecies die erg giftig zijn. Een voorbeeld hiervan is de vorming van methylkwik onder zuurstofloze omstandigheden (Harmon et al., 2008). Of bepaalde giftige species daadwerkelijk gevormd worden, is afhankelijk van de lokale omstandigheden.

Mobilisatie van arseen

In West Nederland komt arseen voor gecomplexeerd met ijzeroxiden. Als tijdens overstromingen zuurstofrijke arseenhoudende sedimenten worden gereduceerd, kan arseen worden gemobiliseerd. De concentraties arseen kunnen zodanig hoog worden dat dit leidt tot ecologische of humane risico's.

Als onder invloed van vernatting en verzilting sulfaatreducerende omstandigheden een rol gaan spelen, kan arseen worden vastgelegd in sulfiden. Arseen houdende sulfiden komen veel voor in West Nederland in zuurstofloze sedimenten. Deze sulfiden spelen een belangrijke rol in de beschikbaarheid van arseen in het sediment. Echter, het kan ook zijn dat arseen niet neerslaat met de sulfiden (Burton et al., 2008). In deze studie wordt aangetoond dat overstroming van zure sulfaatrijke sedimenten leidt tot mobilisatie van ijzer en arseen door reductie processen van ijzeroxiden. De vrijgekomen ijzer slaat uiteindelijk neer als sulfiden samen met de zware metalen mangaan, nikkel en zink, maar niet met arseen.

3 Effect van overstroming in stedelijk gebied

In het stedelijke gebied zijn andere bodemfuncties van belang. Zo speelt de bodem een belangrijke rol als ondergrond voor bebouwing. De draagkracht van de bodem is cruciaal voor het stedelijke gebied, vooral in West Nederland. Ook de infiltratiecapaciteit en het waterbergende vermogen van de bodem in het stedelijke gebied is erg belangrijk. Het zorgt ervoor dat water afkomstig van neerslag niet op de straten blijft liggen, maar wordt afgevoerd. Het openbaar groen in stedelijk gebied, zoals stadsparken, is dus niet alleen belangrijk voor recreatieve doeleinden maar heeft ook een functie als afvoer van overtollig water. In de oudere stedelijke gebieden is de bodem en het grondwater vaak in meer of mindere mate verontreinigd door historische activiteiten. De bodemkwaliteit moet in bepaalde gevallen beheerd worden om er weer op te kunnen wonen. In het stedelijke gebied zijn ook industriegebieden aanwezig met eventueel opslag van gevaarlijke, giftige stoffen. In het geval van calamiteiten, zoals overstroming, bestaat het risico voor verspreiding van deze stoffen in het milieu en mogelijk ook in drinkwaterwingebieden.

De Randstad is een groot stedelijk gebied in Nederland waar ongeveer 7 miljoen mensen wonen. Een overstroming van dit gebied kan leiden tot onacceptabele humane en ecologische (stadsparken) risico's. Om een beeld te kunnen krijgen van de gevolgen van een overstroming op bodemverontreiniging in Nederland in het stedelijke gebied, hebben we gezocht in de literatuur naar de gevolgen van de orkaan Katrina op de bodemkwaliteit en bodemverontreiniging in New Orleans. New Orleans is in augustus 2005 getroffen door de orkaan Katrina. Als gevolg van dijkdoorbraken liep 80% van New Orleans enkele meters onder water. Grote delen van het gebied zijn waarschijnlijk ernstig vervuild.

3.1 Verspreiding van diffuse verontreiniging

Het stedelijke gebied in Nederland is vaak diffuus verontreinigd met zware metalen en PAK (Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen). Ook het slib van rivieren en ander oppervlaktewater is vaak ernstig verontreinigd met zware metalen en pesticiden. Door overstromingen kan verontreinigd slib in het stedelijk gebied afgezet worden en kan al bestaande diffuse bodemverontreiniging verder worden verspreid.

Na het terugtrekken van het water zijn in New Orleans verschillende bodemonderzoeken uitgevoerd. Voor lood en arseen zijn uitloogconcentraties aangetroffen boven de drinkwaterstandaarden (Adams et al., 2007) en voor chroom en kwik boven de norm voor ecologische risico's (Harmon et al., 2008). Voor lood, arseen en cadmium zijn geen directe effecten op regenwormen en nematoden aangetoond maar wel bioaccumulatie van deze stoffen (Harmon et al., 2008). Daarmee bestaat dus het risico voor doorvergiftiging. Omdat er ook veel sulfaat aanwezig is, bestaat onder zuurstofloze omstandigheden ook het risico voor vorming van methyl-kwik verbindingen wat vele malen giftiger is dan kwik. Dit zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren tijdens een nieuwe overstroming (Harmon et al., 2008).

Ook afzetting van verontreinigd slib in huizen van het overstroomde gebied kan leiden tot humane risico's (Ashley et al., 2008). De blootstellingsniveaus voor huiseigenaren die terugkeerden naar hun huis na het terugtrekken van het water in New Orleans zijn vaak onderschat. Het betreft voornamelijk de stoffen arseen, cadmium, vanadium, dieldrin en andere vluchtige organische componenten.

Mobilisatie van arseen
Arseen wat vaak van nature voorkomt in het sediment heeft in New Orleans geleid tot problemen tijdens de overstroming (Ashley et al., 2008, Pardue et al., 2005). In New Orleans komt arseen voor gebonden aan ijzeroxiden. Reductie van deze zuurstofrijke sedimenten leidt tot afbraak van ijzeroxiden en de mobilisatie van arseen. Bovendien moet bij herstel van het gebied rekening worden gehouden onder welke redoxomstandigheden deze sedimenten terecht komen (Ashley et al., 2008). Als deze arseenhoudende sedimenten onder zuurstofloze omstandigheden worden hergebruikt, kan arseen in grote hoeveelheden worden gemobiliseerd en leiden tot normoverschrijdingen in bodem en grondwater. De situatie in New Orleans is vergelijkbaar met die in West Nederland. Daar komt arseen voor gebonden aan ijzeroxiden (zuurstofrijke omstandigheden) en gebonden aan sulfiden (zuurstofloze omstandigheden). Met name het arseen gecomplexeerd met ijzeroxiden vormt een gevaar bij overstromingen omdat deze sedimenten worden gereduceerd. Ook het hergebruik van deze sedimenten is een belangrijk aandachtspunt.

Diffuse loodverontreiniging
In veel stedelijke gebieden is het diffuus voorkomen van lood in de bovengrond een probleem. In sommige gevallen zijn de concentraties lood zodanig hoog dat het leidt tot humane risico's voor vooral kinderen. In verschillende studies is onderzocht wat de gevolgen waren van de orkaan Katrina op het (diffuus) voorkomen van lood in de bodem (bv Mielke et al., 2006). Een leeflaag van 15 cm, aangebracht op een aantal percelen met een ernstige loodverontreiniging, is niet geheel verstoord door de orkaan. De loodconcentraties na de orkaan vergeleken met de concentraties van voor de orkaan zijn echter wel hoger.

3.2 Verspreiding van bestaande verontreinigingspluimen

De Randstad is een stedelijk gebied waar veel historische verontreiniging aanwezig is. De historische verontreinigingen bestaan vaak uit een bron van verontreiniging in de (boven)grond en een grondwaterpluim. Sommige van deze grondwaterpluimen zijn al in kaart gebracht en worden gesaneerd of beheerd. Van andere pluimen is de omvang nog niet duidelijk. Grootschalige overstromingen kunnen de geohydrologie en chemie van deze grondwaterpluimen beïnvloeden.

Veranderingen in de verspreiding van deze grondwaterpluimen en eventueel aanwezige drijf- of zaklagen worden veroorzaakt door veranderingen in het verhang van het grondwater. Overstromingen zorgen niet perse voor een verandering in het verhang en als gevolg daarvan zal de verspreiding van de grondwaterpluimen dan ook niet veranderen. Tot nu toe is echter weinig onderzoek gedaan naar het effect van

overstromingen op de geohydrologie van deze grondwaterpluimen. Geohydrologische modelering zou kunnen aantonen wat de effecten zijn van overstromingen op grondwaterpluimen.

Tijdens grootschalige overstromingen kan over het algemeen worden gezegd dat het grondwater zuurstofarmer wordt. Door de druk van het water vanuit de zee zal er meer kwel optreden. Door kwel worden de grondwaterpluimen in West Nederland zuurstofarmer. Voor bijvoorbeeld verontreinigingen van chloorhoudende oplosmiddelen kan dit gunstig zijn omdat natuurlijke afbraak plaatsvindt onder zuurstofloze omstandigheden. Voor aromaten verontreinigingen is dit juist ongunstig omdat aromaten beter afbreken onder zuurstofrijke omstandigheden. Geohydrologische modelering zou kunnen aantonen of deze effecten significant zijn voor grondwaterpluimen.

In West Nederland zijn ook een aantal verontreinigingen ingedamd. De vraag is of de damwanden bestand zijn tegen de druk van het water bij een grootschalige overstroming. Ook de effecten van overstromingen op stortplaatsen is op dit moment niet duidelijk maar leidt waarschijnlijk wel tot risico's, voornamelijk als het gaat om chemisch afval.

3.3 Nieuwe bodemverontreiniging

Een ander risico van overstromingen is het lek slaan van opslagtanks met giftige stoffen. In de Randstad is veel industrie aanwezig met de bijbehorende opslag van giftige stoffen. Ook zijn in West Nederland veel BRZO (besluit risico's zware ongevallen) bedrijven aanwezig. Voor deze bedrijven geldt de Seveso richtlijn ter voorkoming van het verspreiden van giftige stoffen in het milieu. Bij calamiteiten (zoals overstromingen) kunnen echter toch extreem toxische stoffen in het milieu terecht komen. Of en welke opslagplaatsen giftige stoffen zullen lekken naar het milieu tijdens een overstroming is niet duidelijk. In de literatuur is echter een studie gevonden die de gevolgen beschrijft van het lek slaan van een olieopslagtank op een woonwijk tijdens Katrina. Een olieopslagtank van ongeveer 40 000 m^3 die lek geslagen is tijdens de orkaan heeft ruwe olie verspreid (Stout et al., 2007). De ruwe olie heeft zich met het water verspreid naar onder andere woongebieden. Na het terugtrekken van het water is een groot gebied verontreinigd met deze olie. Ook blijkt uit dit onderzoek dat in veel grondmonsters koolwaterstoffen aanwezig zijn afkomstig van de brandstof in voertuigen in het overstroomde gebied. Ruwe olie kan tot zowel ecologische als humane risico's leiden in het stedelijk gebied.

3.4 Verslechterde waterkwaliteit

Een ander groot probleem tijdens overstromingen is dat ondanks het vele water er bijna geen water beschikbaar is van een goede kwaliteit. De waterkwaliteit van het overstromende water in New Orleans was slecht (Presley et al., 2006, Pardue et al., 2005). In het water zijn pathogene organismen (*E. Coli*) maar ook toxische stoffen (aldrin, arseen, lood en semivluchtige organische componenten) aangetroffen met concentraties die leiden tot humane risico's. Vooral pathogene organismen kunnen bij contact met dit

water tot directe risico's leiden. Voor toxische stoffen zullen eventuele effecten pas later duidelijk worden.

Op het moment dat het water is teruggetrokken is het probleem echter niet opgelost. Het verontreinigde water kan een groot gebied diffuus verontreinigen. Dat deze stoffen potentieel in hoge concentraties in de bodem voorkomen, moet worden meegenomen bij de planning van werkzaamheden en de bescherming van werklieden. Volgens Pardue et al. (2005) zijn de concentraties stoffen niet echt verhoogd maar schuilt het risico in de grote contactmogelijkheden van mensen met dit verontreinigde water.

3.5 Verdichting, draagkracht en afdekking van stedelijk gebied

De bodem in het stedelijk gebied is over het algemeen grotendeels afgedekt door verharding en bebouwing. Afdekking van de bodem leidt tot het verlies van waterdoorlatend en waterbergend vermogen. In het geval van extreme neerslag of overstromingen is dit nadelig omdat het water dan minder goed afgevoerd kan worden. Rekening houdend met vernatting in de toekomst zou in het stedelijke gebied voldoende water moeten kunnen infiltreren bijvoorbeeld door voldoende openbaar groen.

Het stedelijk gebied in de Randstad is voornamelijk gebouwd op veen en zeeklei. Deze bodems zijn gevoelig voor verdichting. Door verdichting neemt het infiltratievermogen van de bodem af. Tijdens overstromingen of extreme neerslag blijft het water dan langer op de bodem staan. Ook de draagkracht van de bodem vermindert. Door een verhoging van de grondwaterstand als gevolg van vernatting kan de draagkracht afnemen. Afnemende draagkracht van de bodem kan grote gevolgen hebben voor de bebouwing in het stedelijk gebied.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Gevolgen van overstromingen

In tabel 4.1 staan de directe effecten van overstromingen op landbouw, natuur en het stedelijke gebied samengevat zoals weergegeven in hoofdstuk 2 en 3. Vervolgens worden een aantal indirecte gevolgen besproken.

Het landelijke gebied
De bodemstructuur, de groei van planten en de levering en retentie van nutriënten aan planten staan onder druk bij een overstroming. Het is echter afhankelijk van de duur van de overstroming en de condities van de bodem hoe de bodemvruchtbaarheid zich zal herstellen. Als het water binnen een week zich weer terugtrekt, lijkt het erop dat de gevolgen niet heel groot zullen zijn, vooral op bodems met voldoende organische stof en een actief bodemleven. Gewassen kunnen wel sterven als de overstroming langer duurt dan een aantal weken en ziekten en plagen kunnen toenemen. Een overstroming van zout water is echter risicovoller, omdat het water verdampt of wordt afgevoerd maar het zout achterblijft. Het herstel van veen en zeeklei gebieden die zijn overstroomd met zout water, duurt waarschijnlijk langer dan zand en rivierklei gebieden die zijn overstroomd met zoet water. Bovendien hebben kleigronden een hogere adsorptiecapaciteit dan zandgronden waardoor zoutionen beter geadsorbeerd worden. Dit heeft een effect op de mobilisatie van de al aanwezige nutriënten en op de duur van verversing van het water. Natuurgebieden op veen lopen het risico om verrijkt te worden met fosfaat. In landbouwgebieden zal verzilting tot opbrengstverliezen en afname van de kwaliteit van de producten kunnen leiden.

Het risico op verlies van nutriënten in zandbodems is aanwezig door uitspoeling. Het herstel van deze gebieden is waarschijnlijk wel sneller dan op zee- en rivierklei, aangezien de bodem sneller opdroogt. Het aantal plantensoorten in natuurgebieden op zand zal na een overstroming afnemen, maar kan zich mogelijk redelijk snel herstellen als de overstroming niet langer duurt dan een aantal weken en in de winter plaatsvindt. Op zee- en rivierklei zal het herstel waarschijnlijk langzamer verlopen.

Het effect van een overstroming op de milieufuncties van de bodem zal beperkt zijn als de overstroming niet langer duurt dan een aantal weken. Wel is er een risico voor uitspoeling van nutriënten. Vernatting op veengebieden kan mogelijk zelfs een positief effect hebben, en verklinking en uitstoot van CO_2 tegengaan.

De biodiversiteit van soorten kan ernstig aangetast worden door een overstroming. Als de overstroming echter niet te lang duurt, en er genoeg individuen van elke soort overgebleven zijn die de overstroming hebben overleefd, zal de biodiversiteit van sommige soorten zich kunnen herstellen. Zeer grootschalige overstromingen vormen wel een risico voor grotere dieren, zij hebben dan geen tijd gehad om te ontsnappen. Het effect

van verzilting van de bodem kan op de samenstelling van de vegetatie grote effecten hebben. Vooral zoetwaterafhankelijke soorten zijn zeer gevoelig en kunnen verdwijnen.

Het effect van overstromingen op het gedrag van metalen is moeilijk te voorspellen. Het gedrag van zware metalen in het sediment wordt in grote mate bepaald door de speciatie van metalen. Deze speciatie is van een groot aantal factoren afhankelijk zoals de zuurgraad, de aanwezigheid van zuurstof, organisch stof en andere metalen. Veranderingen in de fysisch-chemisch omstandigheden in het sediment (door bijvoorbeeld overstromingen) kunnen leiden tot de vorming van bepaalde metaalneerslagen waardoor de beschikbaarheid van de metalen afneemt.

Het stedelijke gebied

Overstromingen kunnen verschillende effecten hebben op de kwaliteit van het stedelijke gebied. Zo kunnen door overstromingen reeds aanwezige diffuse verontreinigingen verspreiden, zoals lood dat vaak voorkomt in oude binnensteden. Ook kunnen de gehalten aan arseen toenemen door veranderingen in de fysisch-chemisch condities van de bodem.

Door een overstroming kan de geohydrologische situatie veranderen. Dit kan een effect hebben op de verspreiding en de chemie van grondwaterverontreinigingspluimen in het stedelijke gebied. Het effect van overstromingen op de geohydrologische situatie is nog weinig onderzocht.

Een ander risico van overstromingen in het stedelijke gebied is het ontstaan van nieuwe verontreinigingspluimen. In het stedelijke gebied is vaak industrie gevestigd met de opslag of het gebruik van giftige stoffen. Bij calamiteiten (zoals overstromingen) kunnen giftige stoffen in het milieu terecht komen. Of en welke opslagplaatsen giftige stoffen zullen lekken naar het milieu tijdens een overstroming is niet duidelijk.

De waterkwaliteit van het beschikbare water bij een overstroming is meestal niet goed. Vaak is het water verontreinigd met giftige stoffen en ziekteverwekkende organismen. Bij direct contact met dit water kan dat leiden tot (gezondheids)problemen. Maar ook na terugtrekking van het water is het probleem niet opgelost. Het verontreinigde water kan een groot gebied diffuus verontreinigen.

De bodem in het stedelijke gebied is over het algemeen grotendeels afgedekt door verharding en bebouwing. Afdekking van de bodem leidt tot het verlies van waterdoorlatend en het waterbergende vermogen, wat een probleem kan zijn in het geval van extreme neerslag of overstromingen. Aangezien het stedelijke gebied in de Randstad voornamelijk is gebouwd op veen en zeeklei, zijn deze bodems gevoelig voor verdichting. Ook de draagkracht van de bodem vermindert, wat grote gevolgen kan hebben voor de bebouwing in het stedelijke gebied.

Tabel 1: Gevolgen en effecten van overstroming met zout en zoet water op het landelijke en stedelijke gebied. L=landbouw, N=natuur en SG= stedelijk gebied. Nul (0) is geen effect, min (-) is een negatief effect en plus (+) is een positief effect op gebiedsniveau.

Oorzaak	**Gevolg**	**Effect**	**Score op gebiedsniveau**		
			L	**N**	**SG**
Zoet water (zand en rivierklei)	Verslemping	Afname bodemstructuur (slechte doorluchting, afwatering en kieming van zaden)	-	-	-
	Afname zuurstof	Verlies mycorrhiza's	0/-	-	0
		Toename denitrificatie	-	-	0
		Mogelijke toename ziekten en plagen	-	?	0
		Verandering microbiële gemeenschap	?	?	0
		Mogelijke mobilisatie arseen	-	-	-
	Aanrijking N door verontreinigd rivierwater	N aanrijking in sediment	0	-	0
	Mobilisatie P	eutrofiering	0	-	0
	Lek slaan opslagtanks door druk water	Verspreiding giftige stoffen	-	-	-
	Aanvoer metalen door verontreinigd water	Diffuse metalen verontreiniging	-	-	-
	Verhoogde oplosbaarheid van bepaalde mineralen	Verhoogde concentraties ijzer en mangaan	-	-	0
	Mogelijke veranderingen in de geohydrologie	Verspreiding van bestaande grondwaterverontreinigingspluimen	?	?	?
	Uitspoeling nutriënten, metalen, bestrijdingsmiddelen	Verslechtering grondwaterkwaliteit	?	-	?
	Verdrinken organismen	Mogelijke afname biodiversiteit	-	-	0
Zout water (zeeklei en veen)	Verslemping	Afname bodemstructuur (slechte doorluchting, afwatering en kieming van zaden)	--	--	--
	Afname zuurstof	Afname CO_2 uitstoot	?	?	+
		Mogelijke mobilisatie arseen	-	-	-
		Vorming sulfiden -> mogelijke vastlegging metalen	?	?	?
	Toename zout	Stagnering groei planten	-	-	0
		Verandering plantengemeenschap	?	?	0
		Afname geadsorbeerd ammonium- >afname nitrificatie en denitrificatie	?	?	0
		Afname zoet water voorraden	-	-	-
	Mobilisatie P	eutrofiering	0	-	0
	Verhoogde oplosbaarheid van bepaalde mineralen	Verhoogde concentraties ijzer en mangaan	-	-	0

De effecten van overstromingen op het landelijke en stedelijke gebied zullen indirect leiden tot effecten met mogelijk humane en/of ecologische risico's als gevolg:

Voedselproductie
De effecten van overstromingen op de landbouw kunnen leiden tot risico's voor de voedselproductie. Als landbouwgebieden grootschalig overstromen kan de voedselproductie voor korte tijd (enkele maanden) of langere tijd (jaren) in gevaar komen. De hersteltijd is afhankelijk van de duur van overstroming en de kwaliteit van het overstromende water (zoet/zout en eventueel verontreinigd). Daarnaast is het belangrijk om een beeld te krijgen van de opkomst van ziekten en plagen. Ook dient er ingezoomd te worden op de reactie van individuele gewassen op regio niveau om een genuanceerd beeld te krijgen wat het effect van overstroming zal zijn op de voedselproductie.

Waterwinning
Verspreiding van bestaande grondwaterpluimen en uitspoeling van zware metalen, nutriënten en bestrijdingsmiddelen door overstromingen kunnen leiden tot problemen in waterwingebieden. Ook het risico voor nieuwe verontreinigingen als gevolg van het lekken van opslagtanks kunnen grote invloed hebben op de waterkwaliteit van waterwingebieden. In het geval van een overstroming met zout water in West Nederland kan het gevaar ook ontstaan dat niet voldoende zoet water meer aanwezig is om de bevolking van drinkwater te voorzien.

4.2 Maatregelen en aanbevelingen

4.2.1 Waterbergend vermogen van landelijk en stedelijk gebied

Ruimte bieden aan de grotere dynamiek van de waterhuishouding, is een maatregel om in te spelen op overstromingen. Bevorderen van het watervasthoudende vermogen van de bodem en vergroten, herstellen van natuurlijke overstromingsgebieden zijn voorbeelden hiervan. Ook meer openbaar groen en minder afdekking in stedelijk gebied zijn maatregelen om infiltratie en waterbergende vermogen te verhogen.

4.2.2 Ruimtelijke samenhang natuurgebieden

Een goede ruimtelijke samenhang tussen natuurgebieden is nodig om het verschuiven van soorten mogelijk te maken wanneer hun geschikte habitat onder water is gelopen als gevolg van klimaatverandering (Blom et al., 2008). Daarnaast is het vergroten van leefgebieden gunstig voor de opvang van fluctuaties en de kolonisatie van nieuwe gebieden, omdat er meer individuen beschikbaar zijn. Hierbij kan met de planning van ruimte in het landelijke gebied rekening mee worden gehouden. Het vergroten van de ecologische veerkracht door het vergroten van de interne heterogeniteit van gebieden kan een andere maatregel zijn om in te spelen op klimaatveranderingen. Als er voldoende

diversiteit binnen functionele groepen aanwezig zijn, is de veerkracht van het ecosysteem als reactie op extreme weersomstandigheden groter.

4.2.3 Bescherming kwetsbare gebieden (landelijk gebied)

De meest kwetsbare kustgebieden voor overstromingen zijn Flevoland, Zuid-West Friesland en Noord-Oost Groningen (Blom et al., 2008). Vooral de landbouwgebieden zijn kwetsbaar omdat die de grootste ruimte in beslag nemen. Veengebieden in Utrecht en Noord-Holland, en boomgaarden op rivierklei zijn ook zeer kwetsbaar. Natte heide en hoogveen op zandgronden en in het laagveen en zeekleigebied zijn het meest gevoelig, samen met zoete stilstaande wateren op zeeklei. De eerst genoemde zijn vooral gevoelig door overstroming met oppervlaktewater, de laatst genoemde vooral door verzilting (Blom et al., 2008). Bij overstromingen moet er dus rekening worden gehouden dat deze typen gebieden als eerste verloren gaan/verwoest raken. Deze gebieden moeten daarom extra in bescherming worden genomen door preventieve maatregelen, zoals het ophogen van dijken. Ook kan het preventief overgaan op een landgebruik dat bodembeluchting en -drainage stimuleert een goede maatregel zijn.

4.3 Vervolgonderzoek in risicogebieden

Uit tabel 4.1 blijkt dat het effect van overstromingen op bepaalde gebieden nog niet duidelijk is. Nader onderzoek hiernaar zou kunnen aantonen dat effecten bij overstromingen wel of niet significant zijn.

4.3.1 Landelijk gebied

Door de afname van zuurstof, kunnen plantenziekten en plagen de kop op steken. Het is echter onduidelijk in hoeverre dit een probleem kan zijn in natuurgebieden, en hoe groot het effect zal zijn op landbouwgewassen, en daarmee op de voedselproductie. Daarnaast zal de microbiële gemeenschap in de bodem veranderen; van een gemeenschap die gebaat is bij zuurstof, naar een gemeenschap die goed functioneert onder anaerobe condities. In hoeverre dit de ecosysteemdiensten zal beïnvloeden in het landelijke gebied, stadsparken en tuinen, zal nader onderzocht moeten worden.

Door toename van de zoutconcentratie kan de plantengemeenschap veranderen in het landelijke gebied. De effecten hiervan op de ecosysteemdiensten zijn onduidelijk. Mogelijk kunnen andere gewassen geteeld worden die tolerant zijn voor hoge zoutconcentraties. In natuurgebieden zullen andere natuurdoeltypen nagestreefd moeten worden.

In veengebieden kan een overstroming met zout water leiden tot een afname van de CO_2 uitstoot. Dit is gunstig voor het stedelijke gebied, maar de gevolgen voor het landelijke gebied kunnen moeilijk ingeschat worden. Waarschijnlijk zal een afname van

de CO_2 uitstoot in veengebieden geen grote effecten hebben op de groei van planten, aangezien er geen drastische tekorten aan CO_2 concentraties zullen ontstaan. Een verhoogd waterpeil heeft echter wel enorme effecten op de ecosystemen die daar nu bestaan. Landbouw is daar dan niet meer mogelijk; een mogelijkheid is om de gebieden om te vormen tot natte natuurgebieden. Ook kan een verhoging van het grondwaterpeil grote gevolgen hebben voor de draagkracht van de bodem met betrekking tot bebouwing in het stedelijke gebied.

Het effect van overstromingen op de hoeveelheid stikstof in het sediment is onduidelijk. Enerzijds kan een aanrijking van stikstof worden verwacht door hoge nitraat concentraties in rivierwater. Anderzijds neemt de nitraatreductie toe omdat meer anaerobe condities zullen optreden. Het precieze effect kan locatiespecifiek zijn.

Afname van zuurstof door overstroming met zout water kan ook leiden tot de vorming van sulfiden. In hoeverre dit effect zal hebben op het vastleggen van metalen is onduidelijk. Ook het toxische effect van sulfiden en andere stoffen op organismen is moeilijk in te schatten. Mogelijk kan na het terugtrekken van het water een verhoogde metalenconcentratie ontstaan in het bodemwater.

Een overstroming zal tot uitspoeling van nutriënten, metalen en bestrijdingsmiddelen leiden naar het grondwater, wat ook doorwerkt in het stedelijke gebied. Dit leidt in het algemeen tot een verslechtering van de grondwaterkwaliteit. De omvang en de gevolgen hiervan zijn moeilijk te voorspellen. Het effect op de voedselproductie en waterwinning is moeilijk in te schatten. Dit kan vergaande consequenties hebben en daarom is vervolgonderzoek noodzakelijk.

4.3.2 Stedelijk gebied

Het effect van giftige stoffen die zich in het milieu verspreiden bij calamiteiten met opslagtanks of andere containers tijdens overstromingen is moeilijk in te schatten. Op dit moment is het onduidelijk onder welke omstandigheden bij een grootschalige overstroming opslagtanks lek slaan waardoor giftige stoffen kunnen verspreiden in het milieu. Deze verspreiding wordt in grote mate bepaald door wat er met het terugtrekkende water gebeurt. Het in kaart brengen van de opslagplaatsen van giftige stoffen geeft inzicht in de locatie en verspreiding van de stoffen en kan helpen bij de beoordeling van de risico’s bij hoogwaterstanden voor mens en milieu. Afhankelijk van het gebruik van de bodem (woonfunctie, natuurgebied, landbouw, industrie, etc.) kan dit leiden tot grote humane en/of ecologische risico’s.

Veranderingen in de geohydrologie kunnen mogelijk optreden, maar dit is niet zeker. Ook is onduidelijk of, en in welke mate, dit effect zal hebben op de kwaliteit van het grondwater en de verspreiding van bestaande verontreinigingen in het grondwater.

rivm

Referenties

Adams, C.G., Witt, E.C., Wang, J., Shaver, D.K., Summers, D., Filali-Meknassi, Y.,Shi, H., Luna, R., Anderson, N. 2007. Chemical quality of depositional sediments and associated soils in New Orleans and the Louisiana peninsula following Hurricane Katrina. Environmental Science and Technology 41: 3437-3443.

Arvidsson, J. 1999. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. Plant and Soil 208: 9-19.

Ashley, N.A., Valsaraj, K.T., Thibodeaux, L.J. 2008. Elevated in-home sediment contaminant concentrations – The consequence of a particle settling–winnowing process from Hurricane Katrina floodwaters. Chemosphere 70: 833-840.

Baldwin, D.S., Rees, G.N., Mitchell, A.M., Watson, G., Williams, J. 2006. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment form a freshwater wetland. Wetlands 26(2): 455-464.

Blom, G., Paulissen, M., Vos, C., Agricola, H. 2008. Effecten van klimaatverandering op landbouw en natuur : nationale knelpuntenkaart en adaptatiestrategieën. Alterra Rapport 182.

Bossio, D.A., Scow, K.M. 1998. Impacts of Carbon and Flooding on Soil Microbial Communities: Phospholipid Fatty Acid Profiles and Substrate Utilization Patterns. Microbial Ecology 35: 265-278.

Burton, E.D., Bush, R.T., Sullivan, L.A., Johnston, S.G., Hocking, R.K. 2008. Mobility of arsenic and selected metals during re-flooding of iron- and organic-rich acid-sulfate soil. Chemical Geology 253: 64-73.

Calmano, W., Hong, J., Förstner, U. 1993. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments effected by pH and redox potential. Water Science and Technology 28 (8-9): 223-235.

Canavan R.W. 2006. Biogeochemical Cycling of Nutrients and Trace Metals in the Sediment of Haringvliet Lake: Response to Salinization. Proefschrift. Universiteit Utrecht.

Canavan, R.W., Laverman, A.M., Slomp, C.P. 2007. Modeling nitrogen cycling in a coastal fresh water sediment. Hydrobiologia 584: 27-36.

Deltacommissie, 2008. Samen werken met water: Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie 2008.

De Vos, J.A., Sival, F.P., Clevering, O.A., Kleef, J. 2006. Van Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden: veldexperimenten Vredepeel. Alterra rapport 1392.

Faber, J.H., Jagers op Akkerhuis, G.A.J.M., Bloem, J., Lahr, J., Diemont, W.H., Braat, L.C. Maatregelen bodembiologische kwaliteit: voor betere benutting van ecosysteemdiensten. Conceptrapport Alterra.

Forshay, K.J., Stanley, E.H. 2005. Rapid nitrate loss and denitrification in a temperate river floodplain. Biogeochemistry 75: 43-64.

Gauer, U. 1997. Collembola in Central Amazon inundation forests - Strategies for surviving floods. Pedobiologia 41: 69-73.
Harmon, S.M., Wyatt, D.E. 2008. Evaluation of post-Katrina flooded soils for contaminants and toxicity to the soil invertebrates *Eisenia fetida* and *Caenorhabditis elegans* Chemosphere 70: 1857-1864.
Hartmond, U., Schaesberg, N., Graham, J., Syvertsen, J. 1987. Salinity and flooding stress effects on mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus rootstock seedlings. Plant and Soil 104: 37-43.
Howarth R.W. 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. Annual review of ecology and systematics 19: 89-110
Jensen, L.S., McQueen, D.J., Shepherd, T.G. 1996. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. I. Field measurements. Soil and Tillage Research 38: 175-188.
Kozlowski, T.T. 1997. responses of woody plants to flooding and salinity. Tree Physiology Monograph 1: 1-29.
Laiho, R., Silvan, N., Carcamo, H., Vasander, H. 2001. Effects of water level and nutrients on spatial distribution of soil mesofauna in peatlands drained for forestry in Finland. Applied Soil Ecology 16: 1-9.
Lamers, L., Lucassen, E., Smolders, F., Roelofs, J. 2005. Fosfaat als adder onder het gras bij 'nieuwe natte natuur'. H_2O 17: 28-30
Lamers, L.P.M., Tomassen, H.B.M., Roelofs, J.G.M. 1998. Sulfate induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands. Environmental Science and Technology 32: 199-205.
Laverman, A.M., Canavan, R.W., Slomp, C.P., Van Cappellen, P.V. 2007. Potential nitrate removal in a coastal freshwater sediment (Haringvliet Lake, The Netherlands) and response to salinization. Water Research 41: 3061-3068.
Lipiec, J., Stepniewski, W. 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. Soil and Tillage Research 35: 37-52.
Loeb, R., Van Daalen, E., Lamers, L.P.M., Roelofs, J.G.M. 2007. How soil characteristics and water quality influence the biogeochemical response to flooding in riverine wetlands Biogeochemistry 85: 289-302.
Loeb, R., Lamers, L.P.M., Roelofs, J.G.M. 2008. Effects of winter versus summer flooding and subsequent dessication on soil chemistry in a riverine hay meadow. Geoderma 145: 84-90.
Lucassen E., Smolders, A., Roelofs, J. 2000. De effecten van verhoogde sulfaatgehalten op grondwatergevoede ecosystemen. H2O 25/26: 28-31.
Mielke, H.W., Powell, E.T., Gonzales, C.R., Mielke, Jr, P.W. 2006. Hurricane Katrina's impact on New Orleans soils treated with low lead Mississippi river alluvium. Environmental Science and Technology 40: 7623-7628.
Olde Venterink, H., Hummelink, E, Van den Hoorn, M.W. 2003. Denitrification potential of a river floodplain during flooding with nitrate-rich water: grasslands versus reedbeds. Biogeochemistry 65: 233-244.
Pardue, J.H., Moe, W.M., Mcinnis, D., Thibodeaux, L.J., Valsaraj, K.T., Maciasz, E., van Heerden, I., Korevec, N., Yuan, Q.Z. 2005. Chemical and microbiological parameters in New Orleans floodwater following Hurricane Katrina. Environmental Science and Technology 39: 8591-8599.

Paulissen, M.P.C.P., Schouwenberg, E.P.A.G., Wamelink, G.W.W. 2007a. Hoe gevoelig is de Nederlandse natuur voor verzilting? H_2O 18: 40-44.

Paulissen, M.P.C.P., Schouwenberg, E.P.A.G., Wamelink, G.W.W. 2007b. Zouttolerantie van zoetwatergevoede natuurdoeltypen: verkenning en kennislacunes. Alterra rapport 1545.

Poot, A., Gillissen, F., Koelmans, A.A. 2007. Effects of flow regime and flooding on heavy metal availability in sediment and soil of a dynamic river system. Environmental Pollution 148: 779-787.

Presley, S.M., Rainwater, T.R., Austin, G.P., Platt, S.G., Zak, J.C., Cobb, G.P., Marsland, E.J., Tian, K., Zhang, B., Anderson, T.A., Cox, S.B., Abel, M.T., Leftwich, B.D., Huddleston, J.R., Jeter, R.M., Kendall, R.J. 2006. Assessment of pathogens and toxicants in New Orleans, LA following Hurricane Katrina. Environmental Science and Technology 40: 468-474.

Prokop, Z., Vangheluwe, M.L., Van Sprang, P.A., Janssen, C.R., Holoubek, I. 2003. Mobility and toxicity of metals in sandy sediments deposited on land, Ecotoxicology and Environmental Safety 54: 65-73.

Roelofs, J. 1991. Inlet of alkaline river water into peaty lowlands: effects on water quality and *Stratiotes aloides L.* stands. Aquatic Botany 39: 267-293.

Russell, D.J., Hauth, A., Fox, O. 2004. Community dynamics of soil Collembola in floodplains of the Upper Rhine Valley. Pedobiologia 48: 527-536.

Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A.J., Bloem, J., Bogte, J.J., Breure, A.M., Brussaard, L., De Goede, R.G.M., Faber, J.H., Jagers op Akkerhuis, G.A.J.M., Keidel, H., Korthals, G.W., Smeding, F.W., Ten Berg, C., Van Eekeren, N. 2007. Typeringen van bodemecosystemen in Nederland met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit. RIVM rapport 607604008

Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A.J., Bogte, J.J., Breure, A.M., Bloem, J., Jagers op Akkershuis, G.A.J.M., Faber, J.H., van Eekeren, N., Smeding, F.W., Keidel, H., De Goede, R.G.M., Brussaard, L. 2005. Typeringen van bodemecosystemen. Duurzaam bodemgebruik met referenties voor biologische bodemkwaliteit. RIVM rapport 607604007

Rysgaard, S., Thastum, P., Dalsgaard, T., Christensen P.B., Sloth, N.P. 1999. Effects of salinity on NH4+ adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments. Estuaries 22: 21-30.

Schütz, K., Nagel, P., Dill, A., Scheu, S. 2008. Structure and functioning of earthworm communities in woodland flooding systems used for drinking water production. Applied Soil Ecology 39: 342-351.

Sival, F.P., Jansen, P.C., Nijhof, B.S.J., Heidema, A.H. 2002. Overstroming en vegetatie. Literatuurstudie over de effecten van overstroming op voedselrijkdom en zuurgraad. Alterra rapport 335.

Spijker, J. 2008. Arseen in Nederlands grondwater: oorzaak van verhoogde arseenconcentraties. RIVM briefrapport 607300009/2008.

Spiteri, C., Van Cappellen, P., Regnier, P. 2008. Surface complexation effects on phosphate adsorption to ferric iron oxyhydroxides along pH and salinity gradients in estuaries and coastal aquifers. Geochimica et Cosmochimica Acta 72: 3431-3445.

Stevens, K.J., Peterson, R.L. 1996. The effect of a water gradient on the vesicular-arbuscular mycorrhizal status of Lythrum salicaria L. (purple loosestrife). Mycorrhiza 6: 99-104.
Stout, S.A., Liu, B., Millner G.C., Hamlin, D., Healey, E. 2007. Use of chemical fingerprinting to establish the presence of spilled crude oil in a residential area following Hurricane Katrina, St. Bernard Parish, Louisiana. Environmental Science and Technology 41: 7242-7251.
Stowa. 2006. Waternood natuur-terrestrische versie 3; voorstudie naar uitbreiding module natuur-terrestrisch. Stichting toegepast onderzoek water, rapport nummer 2006/22, Utrecht.
Tamm, J.C. 1984. Surviving long submergence in the egg stage-a successful strategy of terrestrial arthropods living on flood plains (Collembola, Acari, Diptera). Oecologia 61: 417-419.
Van Dam, A.M., Clevering, O.A., Voogt, W., Aendekerk, T.G.L., Van der Maas, M.P. 2007. Zouttolerantie van landbouwgewassen: deelrapport Leven met zout water. PPO nr. 3234019400.
Van den Berg, G.A., Meijers, G.G.A., Van der Heijdt, L.M., Zwolsman, J.J.G. 2001. Dredging related mobilisation of tracé metals: A case study in The Netherlands. Water Research 35: 1979-1986.
Van den Bos, R. 2003. Invloed van de mens op koolstof-fluxen in kustveengebieden; process-analyse, kwantificering en voorspelling. Proefschrift VU
Vartapetian, B.B., Jackson, M.B. 1997. Plant adaptations to anaerobic stress. Annals of Botany 79: 3-20.
Zinkler, D. and Rüssbeck, R. 1986. Ecophysiological adaptations of Collembola to low oxygen concentrations In: R. Dallai, (Ed.), Second International Seminar on Apterygota. University of Sienna, Siena, pp. 123-127.

RIVM

Rijksinstituut
voor Volksgezondheid
en Milieu

Postbus 1
3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl