

## SKB

De Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem draagt zorg voor kennisontwikkeling en kennisoverdracht die eigenaren en beheerders van percelen en terreinen nodig hebben om de kwaliteit van de bodem op een effectieve wijze in overeenstemming te brengen of te houden met het beoogde gebruik. SKB ondersteunt de ontwikkeling en demonstratie van nieuwe vormen van samenwerking, nieuwe aanpakken en technieken voor het verbeteren van de afstemming tussen bodemgebruik en bodemkwaliteit en bevordert een brede acceptatie hiervan in de maatschappij.

## SKB Cahiers

SKB Cahiers zijn cahiers waarin op een beknopte en bondige wijze belangrijke onderwerpen over de bodem aan de orde komen. De SKB Cahiers zijn gericht op een breed publiek en leesbaar en toegankelijk geschreven. Op basis van toepassingsgerichte praktijkvoorbeelden moeten de lezers met het onderwerp in hun eigen beroepspraktijk aan de slag kunnen.

*De titels die in deze reeks zijn verschenen, kunt u vinden op [www.skbodem.nl](http://www.skbodem.nl). Hier kunt u deze ook bestellen.*



**Stichting  
Kennisontwikkeling  
Kennisoverdracht  
Bodem**

Postbus 420  
2800 AK Gouda  
Tel. (0182) 54 06 90  
Fax (0182) 54 06 91  
[programmabureau@skbodem.nl](mailto:programmabureau@skbodem.nl)  
[www.skbodem.nl](http://www.skbodem.nl)



SKB Cahier

Bodemecologie, wat is het en wat kun je ermee?

# Bodem- ecologie

*Wat is het en wat kun je ermee?*



# Bodemleven



Doen en laten in de bodem

# Bodemecologie

*Wat is het en wat kun je ermee?*



Stichting  
Kennisontwikkeling  
Kennisoverdracht  
Bodem

# Inhoud

Introductie en leeswijzer	6	4. Hoe wordt stress door bodemverontreiniging vastgesteld?	53
1. Inleiding	9	4.1 Algemeen	53
1.1 Bodemfuncties	9	4.2 Ecosysteemdiensten	53
1.2 Ecosysteemdiensten	11	4.3 Effecten van bodemverontreiniging op het bodemleven	56
1.3 Wettelijk kader en toepassing in de praktijk van sanering en beheer van de bodem	14	4.4 Triade	58
2. Bodemecologie aan het werk	21	4.4.1 Uitvoering Triade	58
2.1 De werking van het systeem	21	4.4.2 Monsternamen	59
2.2 De belangrijkste kringlopen	26	4.4.3 Keuze meetmethoden	61
2.2.1 De koolstofkringloop	27	4.4.4 Beoordeling Triade	66
2.2.2 De stikstofkringloop	28	4.4.5 Conclusie volgend uit het Triade onderzoek	67
2.2.3 De zwavelkringloop	30	5. Financiële lasten van ecologische risicobeoordelingen	71
2.3 Het zelfreinigend vermogen van de bodem	31	5.1 Algemeen	71
2.4 Ecologie in de stad	33	5.2 Kosten	71
3. Gestrest bodemleven	37	5.3 Tijdsduur	76
3.1 Inleiding	37	5.4 Saneren, is dat wel ecologisch verantwoord?	76
3.2 Stress door bodemverontreiniging	39	6. De toekomst van bodemecologisch onderzoek	81
3.2.1 Beschikbaarheid van bodemverontreiniging	42	6.1 Het belang van bodemecologisch onderzoek	81
3.2.2 Bioaccumulatie van bodemverontreiniging	43	6.2 Nieuwe ontwikkelingen	82
3.3 Bodemstress ten gevolge van landbouw	47	7. Benutten versus beschermen	85
3.4 Bodemstress in de stad	49	8. Literatuurlijst	86

## Introductie en leeswijzer

**De bodem. Elke dag gebruiken we de bodem, soms bewust maar meestal onbewust. De bodem leeft en is van essentieel belang voor ons. Denk maar aan het produceren van voedsel, het zuiveren van water maar ook het bouwen van huizen en infrastructuur. We kunnen niet zonder de bodem. Correctie, we kunnen niet zonder een gezonde, vitale bodem. Wat leeft er nou allemaal in die bodem en wat maakt een bodem tot een gezonde, vitale bodem? Hoe functioneert het bodemecosysteem en hoe kunnen we dat meten?**

In dit cahier wordt in gegaan op het belang van het bodemleven voor het gebruik van de bodem. Wat is de rol van het bodemleven bij ons dagelijks gebruik van de bodem? Welke vormen van stress of negatieve beïnvloeding bestaan er en wat is de invloed hiervan op het bodemleven en het functioneren van de bodem? Verontreiniging in de bodem wordt als aparte stress factor nader uitgewerkt omdat verontreiniging een belangrijke rol inneemt in het Nederlandse bodembeleid.

In hoofdstuk 1 wordt beschreven welke vormen van bodemgebruik gedefinieerd zijn en welke functies, ook wel ecosysteemdiensten, de bodem heeft. Ook het wettelijk kader wordt in dit hoofdstuk behandeld waarbij ook wordt ingegaan op de rol van ecologische normstelling binnen de bodem normering.

Het bodemleven zelf komt aan de orde in hoofdstuk 2. In dit hoofdstuk wordt de werking van het bodemecosysteem beschreven evenals de belangrijkste kringloopprocessen in de bodem. In een gezond ecosysteem zijn de verschillende organismen en processen in balans. Maar door effecten van buitenaf kan de balans verstoord worden.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op verstoringen en wat de effecten daarvan zijn op het bodemleven. Er wordt ingegaan op verschillende vormen van verstoringen.

Hoofdstuk 4 gaat in op de mogelijkheden om de bodemecologie en de effecten van stress hierop in beeld te krijgen. Ook wordt saneren op basis van ecologische risico's beschreven waarbij wordt gekeken naar de ecologische risico's ten gevolge van een bodemverontreiniging enerzijds en de effecten van de sanering anderzijds.

De kosten en baten van ecologische risicobeoordelingen zijn samengevat in hoofdstuk 5 aan de hand van een aantal praktijkvoorbeelden. In hoofdstuk 6 tenslotte wordt een doorkijk gegeven naar de toekomstige ontwikkelingen met betrekking tot bodemecologisch onderzoek. In hoofdstuk 7 volgt tenslotte een reflectie.

Aan het eind van de hoofdstukken worden enkele soortgroepen organismen beschreven in een intermezzo. In deze intermezzo's wordt het belang van deze soortgroepen voor het functioneren van de bodem uitgelegd.

Tenslotte is achterin dit cahier een uitgebreide literatuurlijst toegevoegd. Literatuurverwijzingen worden in de tekst aangegeven als (getal). Dit getal correspondeert met het getal in de referentielijst.



## 1



## Inleiding

Iedere dag gebruiken we bewust, maar vaker onbewust, de bodem. De bodem levert een aantal verschillende nuttige functies en biologische diensten ofwel ecosysteemdiensten. Ecosysteemdiensten zijn processen of eigenschappen binnen het ecosysteem die van nut zijn voor de mens (3). Bodems verlenen die ecosysteemdiensten vanzelf. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op die verschillende functies en diensten. Daarnaast wordt ingegaan op de rol die bodemecologie speelt binnen de Nederlandse bodemwetgeving.

### 1.1 Bodemfuncties

Er zijn verschillende vormen van bodemgebruik. In de Wet Bodembescherming en de Circulaire Bodemsanering 2009 worden zeven vormen van bodemgebruik onderscheiden die zijn geclusterd tot drie hoofdgroepen. Voor al deze vormen van bodemgebruik heeft de bodem één of meerdere specifieke functies voor de mens (draag-, productie- en/of regulatiefunctie). In tabel 1.1 worden de verschillende vormen van bodemgebruik in relatie tot de bodemfuncties beschreven.

**Tabel 1.1**

*Vormen van bodemgebruik en de functies die de bodem heeft bij de betreffende vorm van bodemgebruik (aangegeven met x).*

Hoofdgroep bodemgebruik	Bodemgebruik	Draag-functie	Productie-functie	Regulatie-functie
Wonen	Wonen met tuin	x	[x]	x
	Plaatsen waar kinderen spelen			x
	Groen met natuurwaarden		[x]	x
Industrie	Ander groen, bebouwing, infrastructuur en industrie	x	[x]	x
Overig	Moestuinen, volkstuinten	[x]	x	x
	Landbouw		x	x
	Natuur		x	x

**Draagfunctie**

In relatie tot de draagfunctie wordt de bodem gebruikt om op te bouwen en wegen en leidingen aan te leggen. Ook gebruiken we de bodem voor het aanleggen van tunnels en parkeergarages. De functie van de bodem die hiervoor gebruikt wordt noemen we de draagfunctie. De vormen van bodemgebruik waarvoor deze functie belangrijk is, zijn bebouwing, infrastructuur en industrie.

**Productiefunctie**

Met productiefunctie bedoelen we de productie van landbouwproducten en de winning van gas, olie en keukenzout. Ook de winning van zand, grind en klei voor het gebruik in bouwmaterialen maakt onderdeel uit van de productiefunctie van de bodem. Daarnaast wordt een deel van ons drinkwater uit de bodem gehaald. Tevens worden enzymen van bodemorganismen gebruikt voor allerlei nuttige toepassingen zoals zeep, medicijnen en antibiotica. Veel bodemorganismen kunnen waterstofgas ( $H_2$ ) aanmaken en kunnen daarmee een bijdrage leveren aan de oplossing van het energieprobleem (42). Tenslotte kan de bodem gebruikt worden om energie in op te slaan (koude-warmte opslag) of om energie uit te winnen, de zogenaamde geothermie of aardwarmte (de energie die ontstaat door het temperatuurverschil tussen de aardoppervlakte en diep in de aarde gelegen warmtereservoirs).

De productiefunctie van de bodem is vooral van belang bij natuur, landbouw, moestuinen, volkstuinen en eventueel ook bij wonen met tuin en groen met natuurwaarden en ander groen. Indirect is deze functie overigens voor alle vormen van bodemgebruik van belang en heeft de productiefunctie ook relaties met de draagfunctie van de bodem.

**Regulatiefunctie**

De regulatiefunctie van de bodem is van groot belang voor het ecologisch evenwicht van ecosystemen. Belangrijk binnen de regulatiefunctie is bijvoorbeeld het vasthouden van water waardoor wateroverlast wordt beperkt en het tijdelijk opslaan van warmte en koude, een energiebesparende regulatiefunctie van de bodem voor de klimaatbeheersing

in gebouwen. De stofkringlopen vallen ook onder de regulatiefunctie van de bodem (zie paragraaf 2.2) zoals het vasthouden van koolstof, vooral in het licht van de klimaatverandering. Belangrijk om te onthouden is dat een gezonde bodem veerkrachtig is en daardoor negatieve invloeden van buitenaf kan bufferen. De regulatiefunctie is direct en indirect van belang voor alle vormen van bovengenoemd bodemgebruik.

**Informatiefunctie**

Tenslotte kan de bodem ook gezien worden als een historisch archief en heeft deze daardoor een informatiefunctie. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de aanwezigheid van archeologische resten. De opbouw van de bodem leert ons veel over de klimaatveranderingen uit het verleden. Deze functie van de bodem is niet direct van belang voor de in tabel 1.1 genoemde vormen van bodemgebruik maar wel indirect. We kunnen veel leren uit het verleden, ook in de vorm van bodemgebruik.

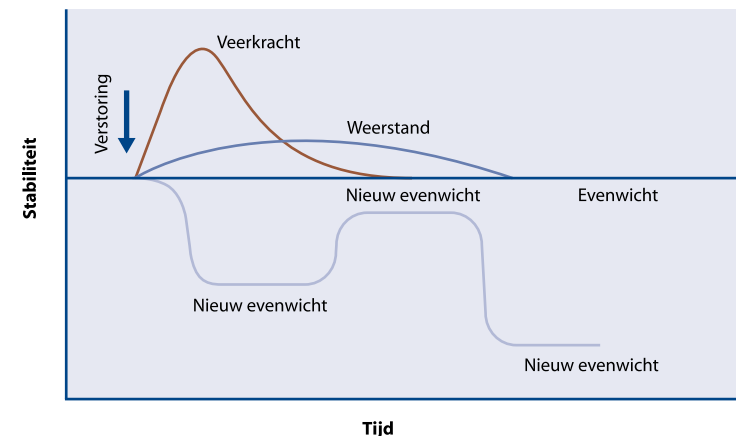
**1.2 Ecosysteemdiensten**

Een gezonde bodem levert ecosysteemdiensten, functionele eigenschappen van de bodem die essentieel zijn voor het huidige én toekomstige bodemgebruik. Het bodemgebruik bepaalt of de diensten benut of uitgeput worden. Het uitputten van de ecosysteemdiensten door de wijze waarop de bodem gebruikt wordt is niet duurzaam. Duurzaam bodemgebruik waarborgt de gezondheid van de bodem optimaal zodat de ecosysteemdiensten gewaarborgd blijven, ook in de toekomst. De volgende vier ecosysteemdiensten kunnen worden onderscheiden:

1. **Bodemvruchtbaarheid.** Productiefunctie van de bodem voor landbouw, natuur en overige groene diensten. Deelaspecten hierbij zijn:
  - Leveren en vasthouden van voedingsstoffen
  - Goede bodemstructuur
  - Natuurlijke weerstand tegen stress door ziekten en plagen
2. **Aanpassingsvermogen en weerstand tegen stress.** Het gaat hierbij om het vermogen om weerstand te bieden aan bedreigingen en het herstel binnen een redelijke termijn na een schokeffect (hetzij aangebracht door de mens hetzij natuurlijk, bijvoorbeeld door overstromingen). Daarnaast gaat het ook om het vermogen om de ecosysteemdiensten ook gedurende langere tijd en op de lange

termijn te kunnen blijven vervullen en het vermogen van de bodem zich aan te passen aan een ander bodemgebruik (figuur 1.1).

3. **De bodem als buffer en reactievat (regulatiefunctie).** Het bodemecosysteem is een belangrijk onderdeel van onze leefomgeving. In de bodem vinden processen plaats die gekoppeld zijn aan onze gehele leefomgeving zoals lucht, oppervlaktewater, grondwater et cetera. Belangrijke processen zijn:
  - Fragmentatie van plantenresten en mineralisatie van organisch stof
  - Zelfreinigend vermogen van de bodem, dus ook het afbreken van organische verontreinigingen en milieu eigen stoffen
  - Immobiliseren van verontreinigingen
  - Het vermogen water vast te houden (retentie) en te transporteren. Deze dienst is van belang voor zowel plantengroei als voor de waterhuishouding op kleine en grote schaal.
  - Het tijdelijk opslaan van warmte en koude, van toenemend belang voor de klimaatbeheersing in gebouwen.
  - Het vermogen tot buffering en beïnvloeding van het klimaat. Bufferen van vocht en temperatuur van de lucht evenals het filteren van de lucht door gewassen en het vastleggen van zogenaamde broeikasgassen vallen hieronder.
4. **Habitatfunctie.** Het beschermen van structurele (soorten), genetische (families) en functionele (processen) biodiversiteit is geen ecologische dienst in de strikte zin van het woord. Er is immers geen directe koppeling aan het bodemgebruik, hoewel de biodiversiteit wel van belang is bij alle soorten van bodemgebruik. De bodem herbergt nog veel onbekende eigenschappen en onbekende en onbenoemde ecosystemendiensten. Ook is de bodem een bron van biologisch en genetisch materiaal. Biodiversiteit is van belang omdat aangenomen wordt dat er een positief verband is tussen de biodiversiteit en de gezondheid van de bodem. Biodiversiteit speelt een rol in de manier waarop ecosystemen functioneren en de diensten die de bodem kan leveren. Verlies aan biodiversiteit kan betekenen dat de bodem minder weerbaar wordt tegen ziekten en plagen (bijvoorbeeld door verlies van natuurlijke vijanden) of kwetsbaarder wordt voor andere vormen van stress.



Figuur 1.1: Aanpassingsvermogen van bodems tegen stress. Bodems kunnen een bepaalde mate van stress hebben, ze zijn veerkrachtig en kunnen zich herstellen van een verstoring van buitenaf. Bodems kunnen zich ook aanpassen aan de nieuwe situatie. Er ontstaat dan een nieuw evenwicht (7).

Ecosysteemdiensten van de bodem kunnen verstoord worden door de aanwezigheid van invloeden van buitenaf. De effecten van verstoringen kunnen zowel reversibel als irreversibel zijn. De bodem kan zich herstellen van reversibele (of omkeerbare) effecten. Als sprake is van irreversibele (of onomkeerbare) effecten kan de bodem zich niet meer herstellen tot zijn oorspronkelijke staat. In hoofdstuk 3 (tekstvak 3.1) wordt dieper ingegaan op (irreversibele) effecten ten gevolge van invloeden van buitenaf (stress). In principe kan stress worden onderverdeeld in 3 typen:

- fysieke stress: bijvoorbeeld door het frequent betreden van een locatie treedt verdichting van de bodem op, door temperatuurverandering treden verschuivingen in biodiversiteit op (denk aan opmars van zuidelijke plantensoorten en de afname van noordelijke soorten in Nederland);



- chemische stress: de aanwezigheid van verontreinigingen (maar ook verzuring en vermesting) kan invloed hebben op bodemorganismen waardoor die hun functie niet meer kunnen uitvoeren (zie verder hoofdstuk 2 voor de rol van bodemorganismen in het ecosysteem);
- biologische stress: de invoer van uitheemse soorten heeft invloed op het oorspronkelijk ecosysteem omdat deze soorten (nog) geen natuurlijke vijanden hebben en omdat ze concurreren met inheemse of al aanwezige soorten om voedsel en ruimte.

### 1.3 Wettelijk kader en toepassing in de praktijk van sanering en beheer van de bodem

Voor de beoordeling van de risico's voor het bodemecosysteem zijn ecologische risico's maatgevend. In eerste stap wordt hieraan getoetst met behulp van het computerprogramma Sanscrit (Wet bodembescherming) of met de Risicoolbox bodem (hergebruik grond of bagger in het kader van het Besluit en de Regeling bodemkwaliteit). Hierbij wordt meegewogen in hoeverre de ecologische bodemfuncties van belang zijn bij het bestaande of toekomstige bodemgebruik. In een natuurgebied is de ecologische functie maatgevend voor het bodemgebruik, op een industrieterrein waarschijnlijk niet of in zeer beperkte mate.

#### Toetsen aan ecologische normen in het kader van de Wet bodembescherming

Ecologische risicobeoordeling vindt conform de Circulaire bodemsanering 2009 plaats in drie navolgende stappen.

- Stap 1: Vaststellen of er sprake is van een geval van ernstige bodemverontreiniging (vergelijken met geldende bodemnormen).
- Stap 2: Vaststellen of sprake is van spoedeisendheid met behulp van generieke modelberekeningen.
- Stap 3: Vaststellen van locatiespecifieke ecologische risico's.

In deze paragraaf worden de verschillende stappen beknopt beschreven.

Op basis van de resultaten van een nader bodemonderzoek (voor diffuse bodemverontreiniging volstaat eventueel een verkennend bodemonderzoek), waarin de omvang en optredende verspreiding in kaart is gebracht voor het gehele geval, dan wel een substantieel deel ervan, moet worden bepaald of er sprake is van "spoedeisendheid". Als hiervan sprake is, moet er zo snel mogelijk, maar in ieder geval binnen vier jaar, worden gestart met saneren. Een andere mogelijkheid is het nemen van tijdelijke maatregelen om de risico's op basis waarvan de spoedeisendheid wordt bepaald weg te nemen.

Voor alle gevallen van ernstige bodemverontreiniging is de saneringsregeling in de Wet bodembescherming van toepassing en bestaat er een saneringsverplichting. Het is de bedoeling dat voor 2015 alle bodemsaneringsgevallen, die spoedeisend zijn vanwege humane risico's, zijn gesaneerd of beheerst, en voor 2030 ook alle spoedgevallen vanwege ecologische risico's. In 2009 is dit vastgelegd in een Convenant Bodemsanering, getekend door de Ministeries van VROM, V&W en namens alle bevoegde gezagen Wet bodembescherming door IPO, VNG en de Unie van Waterschappen.

#### Stap 1. Vaststellen ernstig geval van bodemverontreiniging

In het kader van de Wet bodembescherming wordt een verontreinigde locatie geclassificeerd als "een geval van ernstige bodemverontreiniging" als:

- er is sprake van overschrijding van de interventiewaarde voor één of meerdere stoffen in de grond of het grondwater, én;
- het volume grond, waarin de interventiewaarde wordt overschreden, tenminste 25 m<sup>3</sup> bedraagt, en/of;
- het met grondwater gevulde volume bodem, waarin de interventiewaarde grondwater wordt overschreden, tenminste 100 m<sup>3</sup> bedraagt.

Tevens zijn in de eerder genoemde Circulaire interventiewaarden bodemsanering (I-waarden) opgenomen voor grond en grondwater. De interventiewaarden voor grond zijn gebaseerd op een integratie van de humane en ecotoxicologische effecten. De meest kritische effecten geven hierbij de doorslag (31).

Voor bijna alle zware metalen, met uitzondering van antimoon, lood en seleen, wordt de interventiewaarde voor grond bepaald door het ecologische ernstig risiconiveau. Dit is ook het geval voor andere in de bodem weinig mobiele stoffen, zoals PAK, en veel voorkomende pesticiden als drins, DDT en lindaan. Deze stoffen komen veel voor in de bodem als diffuse bodemverontreiniging. Voor mobiele stoffen als vluchtige aromaten, gechlorideerde oplosmiddelen en cyaniden is eventueel het humane ernstig risiconiveau maatgevend. Deze stoffen komen veelal voor als puntbronverontreiniging.

### Stap 2. Vaststellen spoedeisendheid

In stap 2 van de risicobeoordeling wordt vastgesteld of sprake is van een geval van ernstige én spoedeisende bodemverontreiniging. Hiervoor is het model Sanscrit ontwikkeld (beschikbaar als een internetapplicatie via [www.risicotoolboxbodem.nl](http://www.risicotoolboxbodem.nl)).

Er is sprake van “spoed” als, in relatie tot het bestaande of beoogde bodemgebruik één of meerdere van de ernstige risiconiveaus wordt overschreden:

- voor de mens (de terreingebruikers): risico's treden op door direct contact met verontreinigde grond, via de inname van op deze grond geproduceerd verontreinigd voedsel of door inademing van in leefruimten vrijgekomen verontreinigde bodemlucht;
- voor het ecosysteem: ten gevolge van de verontreiniging funktioneert het bodemecosysteem in te beperkte mate, en/of er treedt doorvergiftiging op in de voedselketen, en/of de biodiversiteit wordt in ernstige mate aangetast;
- op verspreiding: er zijn risico's door verspreiding van verontreinigende stoffen als puur product of opgelost in stromend grondwater. Mogelijk vindt hierdoor onaanvaardbare verontreiniging van naburig oppervlaktewater en/of de waterbodem plaats.

De toetsing op ecologische risico's is gebaseerd op het onbedekte bodemoppervlak en de “toxische druk”. De toxische druk is een indexwaarde tussen 0 en 1 en is het resultaat van een gewogen optelling van het quotiënt van de gemeten gehalten van stoffen en de ecologisch ernstige risiconiveaus. In de Circulaire zijn deze criteria vastgelegd in een toetsingstabel (zie tabel 1.2).

**Tabel 1.2**

*Toetsingstabel voor bepaling van de spoed inbeoordelingsstap 2 van een ernstig verontreinigde locatie vanwege onaanvaardbare risico's voor het (bodem)ecosysteem*

Bodemgebruik	Ecologisch beschermingsniveau	Onbedekt verontreinigd bodemoppervlak	
		Toxische druk > 0,2	Toxische druk > 0,5
Natuurgebieden Natuurontwikkelingsgebieden Ecologische hoofdstructuur	Hoog	> 50 m <sup>2</sup>	> 50 m <sup>2</sup>
Agrarisch gebruik Volkstuinen Wonen (met/zonder tuin) Recreatiegebieden	Gemiddeld	> 5.000 m <sup>2</sup>	> 50 m <sup>2</sup>
Binnenstedelijk gebied Glastuinbouw Industrie Wegen en spoorlijnen Braakliggende terreinen	Matig	> 50.000 m <sup>2</sup>	> 5.000 m <sup>2</sup>

### Stap 3. Vaststellen locatiespecifieke ecologische risico's

In stap 2 worden de ecologische risico's van bodemverontreiniging meestal overschat. In een derde beoordelingsstap kan meer nauwkeurig en gebiedspecifiek worden bepaald of er inderdaad onaanvaardbare risico's zijn voor het (bodem)ecosysteem. Hiervoor wordt de Triade benadering voorgesteld. Dit wordt nader besproken in hoofdstuk 4.

### Toetsen aan ecologische normen in het kader van de Regeling bodemkwaliteit

In de Regeling bodemkwaliteit (30) zijn normwaarden opgenomen, bedoeld voor regulatie van het hergebruik van licht verontreinigde grond. Het gaat om “achtergrondwaarden” en “maximale waarden”. Deze waarden zijn gebaseerd op het risiconiveau, waarbij de bodem

duurzaam voor een bepaald bodemgebruik veilig kan worden benut.

De achtergrondwaarden zijn gebaseerd op een onderzoek van de gehalten in alle Nederlandse bodemtypen, op die plaatsen waar hoogstens sprake is van een marginale bodembelasting als gevolg van gebruik door de mens. Als grond aan de achtergrondwaarden voldoet, wordt deze als schoon beoordeeld en is deze geschikt voor alle soorten bodemgebruik. Ze fungeren als de hergebruiksnormen voor grond in natuur- en landbouwgebieden. Hier mag alleen schone grond worden toegepast.

De maximale waarden zijn gebaseerd op de laagste van het ecologisch en humane duurzaam risiconiveau. Hierbij is uitgegaan van standaard blootstellingsscenario's voor wonen, inclusief recreatief gebruik, en industrie, inclusief groenzones langs infrastructuur (wegen, spoorlijnen, watergangen, leidingstraten). Voor zware metalen, PAK en pesticiden zijn de maximale waarden gebaseerd op het ecologische risiconiveau.

De maximale waarden voor wonen liggen tussen de achtergrondwaarden en de interventiewaarden bodemsanering voor grond. De maximale waarden voor industrie zijn over het algemeen gelijk aan de interventiewaarde voor grond voor alle zware metalen, PAK en pesticiden. De uitzonderingen zijn cadmium en kwik, waarvoor de maximale waarde voor industrie aanzienlijk lager is. Voor de meeste andere (veelal) mobiele stoffen, zijn de maximale waarden voor industrie gelijk aan de oude Samenstellingswaarde 2 uit het Bouwstoffenbesluit, dat in 2008 is vervangen door het Besluit en de Regeling bodemkwaliteit. Deze waarden zijn zo gekozen dat geen onaanvaardbare belasting van het grondwater met verontreinigende stoffen uit hergebruikgrond kan optreden.

### Nematoden of aaltjes

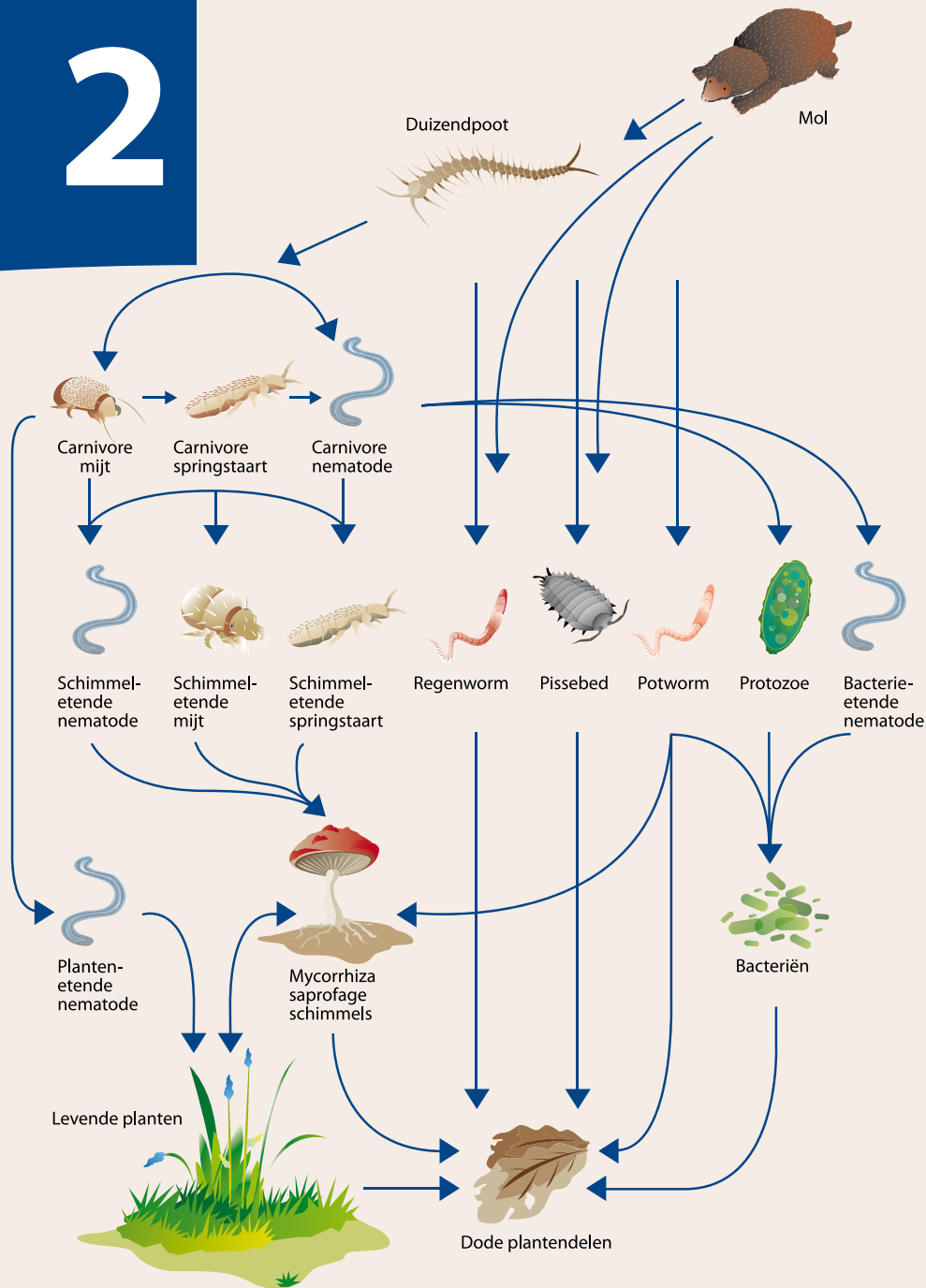
Nematoden zijn zeer kleine (tot 1 mm groot) wormachtige dieren, die in grote aantallen in de grond voorkomen, tot wel 10 tot 100 per gram grond. Er zijn meer dan 600 soorten nematoden bekend en beschreven in Nederland (43). Ze spelen een belangrijke rol in het bodemecosysteem, mede omdat ze op alle trofische niveaus voorkomen, dus op verschillende plaatsen in de voedselketen (zie ook figuur 2.1). Er zijn planteneterende nematoden maar ook schimmeleters, algeneters, bacterie-eters, omnivoren en carnivoren. Ze zijn goed te herkennen aan de vorm van de mondopening.

Nematoden zijn ook goed in te delen naar ecologie en daarom zeer geschikt voor het beoordelen van de mate van verstoring van bodems. Als er sprake is van veel verstoring, bijvoorbeeld door vergraven/ploegen, toepassing van bestrijdingsmiddelen of bodemverontreiniging, dan komen er vooral pioniersoorten (colonizers) voor. In stabiele bodemecosystemen (geen verstoring) zijn climaxsoorten (persisters) dominant. De verdeling over deze ecologische groepen kan worden uitgedrukt in de Maturity Index (MI), die een schaal kent van 1 t/m 5. In verstoorde bodems is de MI vaak lager dan 2, er zijn dan vooral colonizers aanwezig. In natuurlijke bodems is de MI meestal hoger dan 2,5. Naast de verdeling over de ecologische groepen is ook de diversiteit van de nematoden belangrijk, dus het aantal verschillende soorten nematoden dat aanwezig is in de bodem.



Foto's door H. van Megen, WUR

## 2



Figuur 2.1: Voedselweb in de bodem (Ron de Goede, Wageningen Universiteit)

## Bodemecologie aan het werk

**Hoe functioneert dat ecosysteem in de bodem eigenlijk? Welke dieren, planten, schimmels en bacteriën komen er voor, wat doen ze en wat is hun rol in het geheel? En waarom is dat zo belangrijk voor de natuur en ook voor de mens als gebruiker van de bodem?**

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de werking van het bodemecosysteem en het bodemvoedselweb. Verschillende soortgroepen die voorkomen in het voedselweb worden beschreven in de intermezzo's aan het eind van de hoofdstukken. Daarnaast wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de belangrijkste kringloopprocessen in de bodem. Dit zijn de koolstofkringloop, de stikstofkringloop en de zwavelkringloop. Tenslotte wordt ingegaan op het zelfreinigend vermogen van de bodem en de rol die het bodemecosysteem daarbij speelt.

### 2.1 De werking van het systeem

Bodembiodiversiteit wordt gevormd door zichtbare en voor het blote oog onzichtbare bodemorganismen die zowel op als in de grond leven. Planten en de grote bodemdieren als mollen, muizen en slakken zijn met het blote oog zichtbaar. Als we de grond omspitten zien we nog wel wormen, maar wat zich verder in de bodem afspeelt blijft voor het blote oog verborgen. De meeste bodemorganismen leven op of in de bovenste laag van de grond, omdat hier het meeste voedsel kan worden gevonden. De zichtbare en voor het blote oog onzichtbare bodemorganismen werken gezamenlijk aan het recyclen van het organische materiaal. Een kringloopproces waar de natuur al miljarden jaren een patent op heeft. Levende organismen produceren heel wat afval: bladafval en andere plantenresten, uitwerpselen, kadavers etc. De bodemdieren op en in de grond zorgen ervoor dat dit organische materiaal wordt verkrumeld, gefragmenteerd. Met name miljoenpoten, pissebedden en bepaalde regenwormen spelen hierbij een belangrijke rol. Dit verkrumelde organische materiaal wordt

vervolgens weer gegeten door springstaarten, schimmels en bacteriën en verder afgebroken tot bouwstenen die weer beschikbaar zijn voor de plantengroei. Dit proces heet mineralisatie. Fragmentatie en mineralisatie samen vormen het recyclingproces. De restanten organische stof die moeilijk verteren, gaan deel uitmaken van de humus in de bodem. Dood organisch materiaal levert op deze manier in belangrijke mate een bijdrage aan de verbetering van de bodemstructuur.

Een goed ontwikkeld bodemecosysteem is dus van essentieel belang voor de bodemvruchtbaarheid. Het bodemleven draagt zorg voor:

- het sluiten van de kringloop van mineralen, organische stof en water,
- verbetering van de waterhuishouding in de bodem (vorming humus en gangen),
- verbetering van de bodemstructuur (aggregaatvorming) door het inbrengen van organische stof en de vorming van humus.

Door dit alles wordt de bodem beter leefbaar en is ze beter bewortelbaar voor planten. Daarnaast werkt een goed functionerend bodemecosysteem plaagwerend en zorgt het voor de afbraak van schadelijke stoffen.

De bodembiodiversiteit in een vruchtbaar grasland is net zo groot als in een tropisch regenwoud bovengronds. De hoeveelheid biomassa (het totale gewicht van alle organismen samen) in de bodem is sterk vergelijkbaar met wat bovengronds aanwezig is. Ter illustratie: in een hectare Nederlands grasland zit ongeveer 3000 kg levende biomassa in de bovenste 25 cm, het equivalent van ongeveer 6 koeien!

Het bodemecosysteem kan niet los worden gezien van het ecosysteem boven de grond. Deze zijn met elkaar verweven en oefenen veel invloed op elkaar uit. Sommige planten zijn zelfs geheel afhankelijk van het leven in de bodem of krijgen hierdoor belangrijk betere overlevingskansen. Zo komen orchideeën alleen voor op plekken waar de juiste bodembacteriën aanwezig zijn en hebben bomen als eik, beuk en spar veel voordeel van mycorrhizae schimmels waarmee zij in symbiose leven. Stikstofbindende bacteriën, vrij levend in de bodem

of in symbiose in wortelknolletjes van planten aanwezig (rhizobium), zijn zeer belangrijk voor de stikstofvoorziening van planten.

Zoals geldt voor alle leven op aarde is de stuwende kracht van het bodemecosysteem de zon. Deze levert de energie voor alle leven, waarbij planten en algen dit vastleggen in organisch materiaal. Om dit te kunnen doen zijn voedingsstoffen nodig: kooldioxide uit de lucht (zie paragraaf 2.2.1), macronutriënten als fosfaat, kalium en magnesium uit de bodem en micronutriënten als koper, chroom, seleen en ijzer, die ook door de bodem worden geleverd. Daarnaast is ook het macronutriënt stikstof essentieel (zie paragraaf 2.2.2).

Bij afbraak van planten en dierenresten (biomassa) komen de ingebouwde mineralen en stikstof weer vrij en daarmee weer beschikbaar voor planten. Een deel ervan wordt tijdelijk opgeslagen in humus, de bodemmatrix, en komt pas op lange(re) termijn weer beschikbaar.

Net als in het bovengrondse ecosysteem treffen we in het bodemecosysteem vier groepen organismen aan op diverse trofische niveaus (plaats in de voedselketen):

- De **producenten**, waartoe alle planten, algen en korstmossen (symbiose van algen en schimmels) behoren. Producenten maken met behulp van zonlicht organisch materiaal uit kooldioxide en (micro- en macro)nutriënten.
- De **herbivoren (plantenetters)**, die vers geproduceerd of dood plantaardig materiaal eten om te groeien en zich voort te planten. In de bodem gaat het om specifieke soortgroepen als planten-etende nematoden (aaltjes), planten-etende springstaarten, schimmels en paddenstoelen, larven van kevers en insecten en een aantal landslakken. De meeste biomassa wordt echter geconsumeerd door soorten in het bovengrondse ecosysteem: runderen, konijnen en hazen, eenden, ganzen en zangvogels.
- De **carnivoren**, organismen die dieren eten of erop parasiteren. Hiervan komen er in de bodem een groot aantal soortgroepen voor: bacteriën, carnivore nematoden en springstaarten, bodem-mijten, regenwormen, mieren en ook zoogdieren als de mol. Op de bodem lopen ook nog andere carnivoren, zoals bodemspinnen

en sommige landslakkensoorten.

- De **reducenten** spelen in de bodem een cruciale rol bij het sluiten van alle stofkringlopen. De meeste bacteriën en schimmels behoren tot deze groep, maar ook afvaletende springstaarten, insectenlarven en landslakken.

In het bodemecosysteem zijn meerdere soortgroepen actief op eenzelfde trofische niveau. Als door verstoringen soortgroepen uitvallen, hoeft dit dan ook geen grote gevolgen te hebben voor het ecosysteem als geheel, zolang een andere soortgroep de functie kan overnemen (substitutie). Omdat verschillende soortgroepen elkaars rol over kunnen nemen, is een bodem flexibel maar ook stabiel. De functie van de bodem is immers gewaarborgd, ook onder veranderende omstandigheden. Ook is het mogelijk dat soorten zich aanpassen aan de stress door natuurlijke selectie en in voldoende aantallen aanwezig blijven in de bodem (adaptatie).

De samenstelling van het bodemecosysteem is sterk afhankelijk van de volgende variabelen:

- het bodemtype, en als gevolg hiervan de natuurlijke bodemvruchtbaarheid, het vochthoudende vermogen, de zuurgraad en de mate/aard van bodemvorming;
- primaire en secundaire productie: het aanwezige vegetatietype, bos, struweel, grasland, moeras of (half) onbedekte grond en de daarbij horende mineralisatieprocessen;
- de mate van compactie en/of gelaagdheid van de bodem, en/of de aanwezigheid van een verharding of gebouw.

Naarmate een bodem recenter is gevormd (deze is dan “jong”) en weinig begroeiing heeft, is de schimmel-bacterie-ratio lager. In een weinig begroeide stuifduingrond of op akkerland is deze (veel) kleiner dan 0,1, in grasland 1 tot 10, en in bossen veelal boven de 100, tot meer dan 1000 in oude natuurlijke bossen.

Deze ratio wordt sterk bepaald door de afbreekbaarheid van vrijkomend afgestorven organische resten. In bossen gaat het vooral om hout- en bladresten met lignine (houtstof), wat daardoor slecht afbreekbaar is voor bacteriën. Schimmels, gespecialiseerd in de afbraak

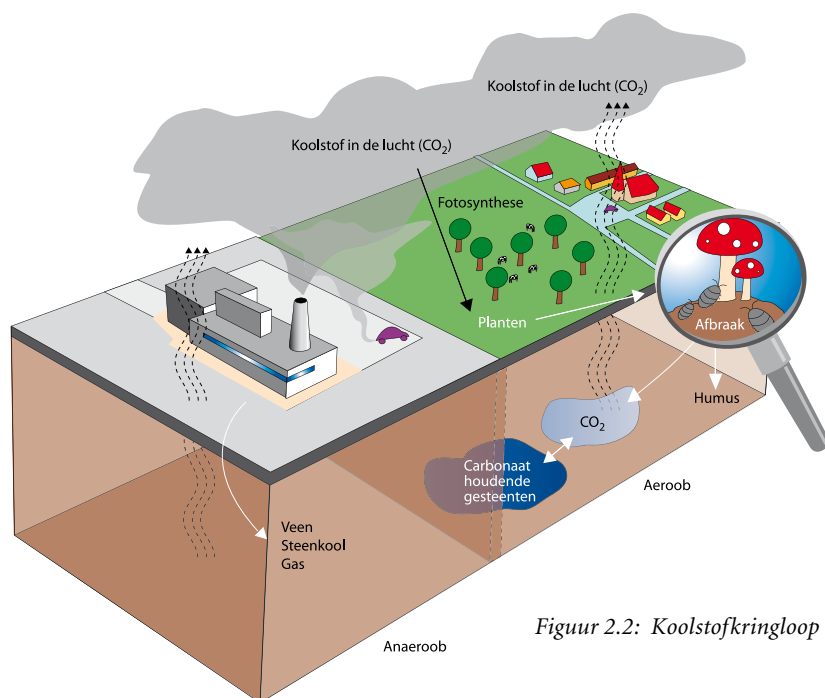
van lignine, nemen deze taak op zich. In graslanden en akkerbouwpercelen is het aanbod van gemakkelijk afbreekbare plantenresten hoog, zodat de bacteriën hier in het voordeel zijn. In weinig begroeide jonge gronden is zo weinig organische stof voorhanden, dat schimmels hier zeer weinig voedsel hebben en dus ook bacteriën in de meerderheid zijn.

Overigens komen zowel schimmels als bacteriën in enorme aantallen voor en is de biodiversiteit groot. Per gram bodem treffen we circa 1 miljard bacteriën aan, behorend tot zo'n 10.000 verschillende soorten. Daarnaast is er 10 tot 1000 meter schimmeldraad in een gram grond aanwezig, waarbij het gaat om honderden soorten. Bijzonder zijn heksenkringen. Een heksenkring bestaat uit één schimmelorganisme dat zich lateraal uitbreidt en aan de binnenzijde afsterft, zodat deze ieder jaar groter wordt. Ze komen voor in graslanden (weidekringzwam) en in bossen (vaak in symbiose rond bomen) en ze kunnen zeer oud zijn. De grootste heksenkring in de wereld heeft een doorsnede van 600 meter en is circa 700 jaar oud!

In bodems met een verschillend bodemgebruik, zijn ook verschillen te zien in de samenstelling van het bodemecosysteem. In oudere bossen met een jaarlijks vormende en verterende strooisellaag komen zeer veel springstaarten voor en alleen specifieke soorten regenwormen. Als een slecht verterende dikkere strooisellaag aanwezig is, is de soortensamenstelling heel anders (eiken- of naaldbossen) of is de bodemfauna slecht ontwikkeld (zure, al dan niet sterk verontreinigde gronden). In graslanden komen veel minder springstaarten voor en zijn regenwormen uit alle soortgroepen dominant aanwezig. In bodems, waarop een verharding van asfalt of beton aanwezig is, komen bijna alleen bacteriën en schimmels voor. Door de mate van verdichting en afsluiting van de bodem hebben regenwormen en mollen hier geen overlevingsmogelijkheden.

## 2.2 De belangrijkste kringlopen

In de kringloop van macro- en micronutriënten neemt het bodemleven zoals gezegd een centrale plaats in. Nadat het organische materiaal door processen als verkleining (fragmentatie), vermenging en transport toegankelijk is gemaakt, nemen bacteriën het over. Zij breken het verkleinde organische materiaal verder af tot mineralen (mineralisatie) die weer kunnen worden opgenomen door planten en zijn verantwoordelijk voor het afbreken van bodemverontreinigende verbindingen. De belangrijkste natuurlijke omzettingprocessen zijn de koolstof [C], stikstof [N] en zwavel [S] kringloop (zie komende paragrafen). Externe factoren zoals temperatuur, vochtbalans en bodemverontreiniging kunnen effect hebben op de kringloopprocessen. Bij hoge temperaturen of lage vochtgehalten leggen veel organismen hun stofwisseling (bijna) stil om zo energie te sparen en te wachten op betere tijden. Kringloopprocessen lopen hierdoor ook langzamer of tijdelijk niet. Van zware metalen bekend dat ze de



Figuur 2.2: Koolstofkringloop

afbraak van gevallen bladeren en andere plantenresten kunnen remmen. Dit leidt tot strooiselophoping en daarmee tot een verstoring van de kringloopprocessen. Het vermogen van de grond om bodemverontreiniging af te breken en daarmee de kringloopprocessen te herstellen komt aan bod in paragraaf 2.3.

### 2.2.1 De koolstofkringloop

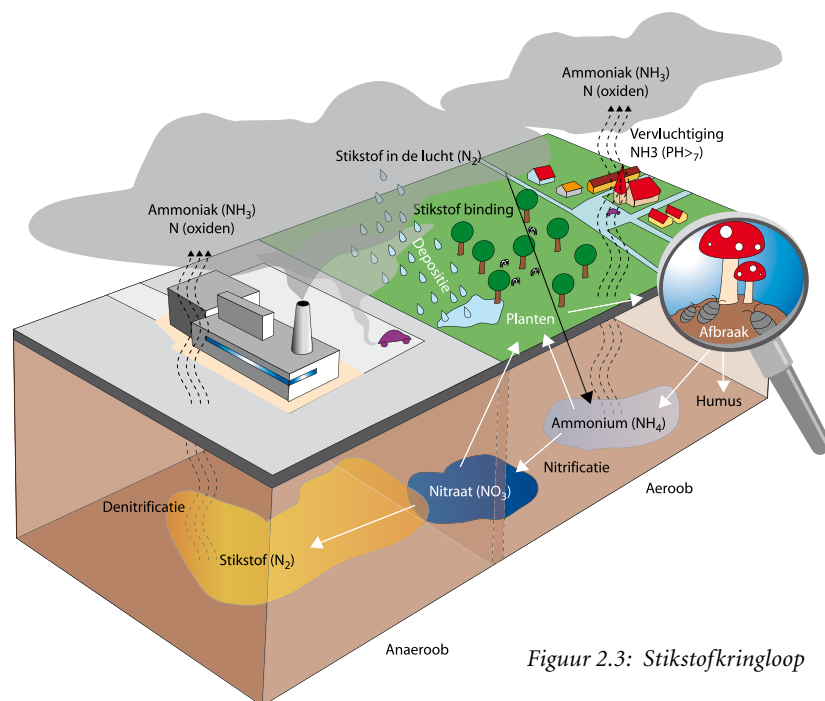
In figuur 2.2 is de koolstofkringloop geschematiseerd weergegeven. In deze kringloop neemt koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) een centrale rol in.

Planten zetten koolstofdioxide uit de lucht onder invloed van zonlicht om in zuurstof en organische verbindingen (biomassa). Dit proces wordt fotosynthese of assimilatie genoemd en is het belangrijkste proces dat leidt tot vastlegging van koolstofdioxide in organisch materiaal. Groeiende bossen zijn in staat om koolstofdioxide langdurig vast te leggen. Het vastgelegde koolstofdioxide komt uiteindelijk weer vrij door dissimilatie (ademhaling) van planten en (zowel aerobe als anaerobe) afbraak van de gevormde organische verbindingen door bodemorganismen. Deze afbraak van organisch materiaal vindt plaats via een aaneenschakeling van oxidatie- en reductiestappen oftewel transformatieprocessen. Niet al het organisch materiaal wordt even snel afgebroken. De moeilijk afbreekbare bestanddelen gaan deel uitmaken van het organisch stof gehalte van de bodem. Als de omstandigheden voor afbraak ongunstig zijn, hoopt dood organisch materiaal zich op. Er is dan sprake van onvolledige recycling. Dit leidt dan tot bijvoorbeeld veenvorming en op de zeer lange termijn tot de vorming van steenkool, olie en/of gas. Veel koolstof is dus langdurig vastgelegd in fossiele brandstoffen. Het grootste koolstofreservoir in de bodem wordt echter gevormd door carbonaathoudende gesteenten.

De verbranding van fossiele brandstoffen leidt weer tot het vrijkomen van koolstofdioxide. Doordat er tegenwoordig meer koolstofdioxide wordt gevormd dan vastgelegd vindt er in de atmosfeer ophoping van koolstofdioxide plaats. Deze ophoping zorgt er (mede) voor dat de aarde opwarmt, het zogenaamde broeikas effect.

### 2.2.2 De stikstofkringloop

In figuur 2.3 is de stikstofkringloop geschematiseerd weergegeven.



Figuur 2.3: Stikstofkringloop

Nagenoeg alle in de bodem aanwezige stikstof is afkomstig uit de lucht. De lucht bestaat voor 79% uit stikstofgas ( $N_2$ ) en vormt daarmee het grootste stikstofreservoir. Stikstof komt in de bodem terecht door biologische binding van stikstof. Dit is een proces waarbij stikstof uit de lucht door specifieke organismen (stikstofbinders) wordt gereduceerd tot ammonium ( $NH_4$ ). Naast vrijlevende stikstofbinders zijn er ook stikstofbinders die in symbiose leven met een plant. Bekende voorbeelden daarvan zijn bomen als de Els en vlinderbloemigen als Erwtten, Bonen en Lupine. Een andere belangrijke bron van stikstof wordt gevormd door natte en droge atmosferische depositie van stikstofoxiden en ammoniak (voornamelijk afkomstig van dierlijke mest). Deze depositie leidt tot het bekende milieuthema van vermisting.

Het merendeel van de stikstof in de grond is aanwezig in een organische vorm die door planten niet direct kan worden opgenomen. Door mineralisatie komt stikstof, dat in organisch materiaal is vastgelegd in eiwitten en andere stikstofhoudende verbindingen, uiteindelijk vrij als ammoniak ( $NH_3$ ). Dit proces staat bekend als ammonificatie. Onder zure of neutrale omstandigheden komt ammoniak als ammonium ( $NH_4$ ) in de bodem voor, onder basische omstandigheden als ammoniak. De restanten van het organisch materiaal die moeilijk verteren gaan deel uitmaken van het bodemorganische stof (humus); ongeveer 4% hiervan bestaat uit stikstof.

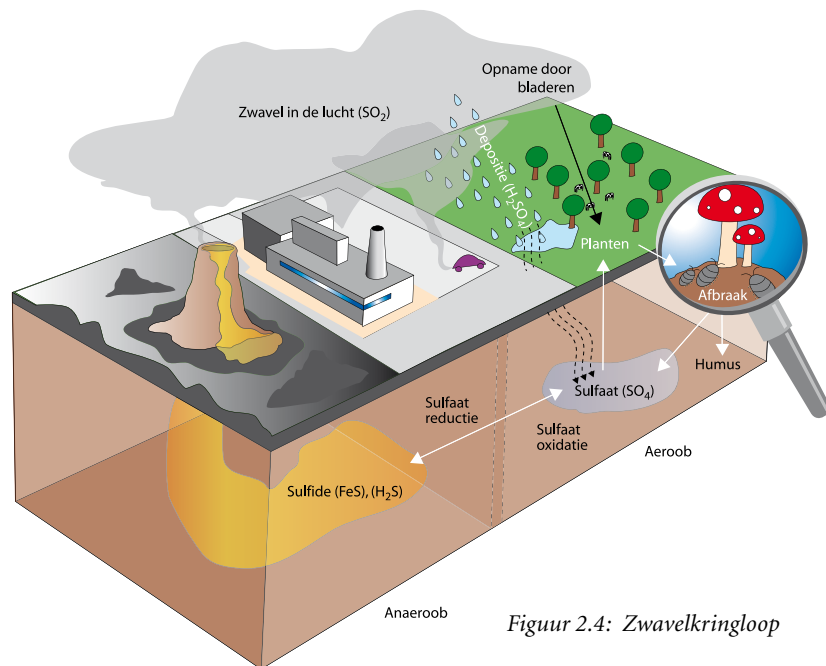
Ammonium wordt in de bodem onder aerobe omstandigheden vrij snel omgezet in nitraat. Zowel ammonium als nitraat kunnen weer door planten worden opgenomen via de wortels en huidmondjes. Het vermogen om ammonium, via nitriet, om te zetten in nitraat is beperkt tot een gespecialiseerde groep bacteriën, de nitrificerders. Het nitrificatieproces verloopt optimaal bij een zuurgraad (pH) tussen 6 en 8. Verzuring van de bodem, door bijvoorbeeld atmosferische depositie van verzurende stoffen (zure regen), heeft in slecht gebufferde bodems remming van het nitrificatieproces tot gevolg, vooral als de zuurgraad tot beneden 5,5 daalt.

Onder anaerobe (en in mindere mate aerobe) omstandigheden kan nitraat ( $NO_3$ ) via nitriet ( $NO_2$ ) worden omgezet in het vluchtige stikstofgas (denitrificatie) of ammonium (ammonificatie). Denitrificatie kan leiden tot een aanzienlijke emissie, en daarmee verlies van stikstof uit de bodem. Ook kan er vervluchtiging van ammoniak ( $NH_3$ ) plaatsvinden. Dit speelt met name in kalkrijke (basische) bodems.



### 2.2.3 De zwavelkringloop

In figuur 2.4 is de zwavelkringloop geschematiseerd weergegeven. Zwavel is belangrijk voor bodemorganismen omdat het onder andere een onmisbaar bestanddeel is voor verschillende aminozuren, de bouwstenen van de eiwitten.



Figuur 2.4: Zwavelkringloop

De grootste zwavelreserve komt in de bodem vooral voor als sulfaat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), maar ook als elementair zwavel (S) of sulfide (bijvoorbeeld als ijzersulfide (FeS en FeS<sub>2</sub>)). Ook fossiele brandstoffen bevatten zwavel. Zwavel komt als zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) ook voor in de atmosfeer. Industriële emissies (verbranding fossiele brandstoffen) en vulkaanuitbarstingen vullen het atmosferische zwavelgehalte geregeld aan. Zwaveldioxide in de atmosfeer kan door sommige planten direct via de bladeren worden opgenomen. Het kan ook met water reageren tot zwavelzuur (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en via neerslag in de bodem terechtkomen. Dit staat bekend als zure regen en verzuring kan leiden tot een ach-

teruitgang van de bodembiodiversiteit. Zo is de achteruitgang van een aantal bospaddenstoelen en de eikvaren in de jaren zeventig en tachtig van de vorige eeuw toe te schrijven aan deze verzuring. Het terugdringen van de zwaveluitstoot heeft geleid tot een toename van bospaddenstoelen.

Zwavelverbindingen in de bodem kunnen vervolgens als sulfaten (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) via de wortels van planten worden opgenomen en komen zo in de voedselketen terecht. Ook kan sulfaat rechtstreeks door bacteriën worden opgenomen, gereduceerd en vervolgens ingebouwd in organische verbindingen.

Bij de mineralisatie van zwavelhoudende organische verbindingen komt zwavel afhankelijk van de redoxomstandigheden in het milieu vrij als sulfide (H<sub>2</sub>S). Sulfide wordt in de bodem onder aerobe omstandigheden vrij snel omgezet in sulfaat. Onder anaerobe omstandigheden kan sulfaat worden omgezet in sulfide (via sulfaatreductie).

### 2.3 Het zelfreinigend vermogen van de bodem

Ook bodemverontreinigingen kunnen worden opgenomen in de kringlopen zodat ze worden afgebroken en gemineraliseerd tot koolstofdioxide, water en eventueel stikstof en zwavel. Er zijn veel verschillende soorten bodemverontreiniging. De ene stof wordt wat sneller afgebroken dan de andere. In verschillende SKB cahiers is hier al uitgebreid op ingegaan (9, 10, 11).

Makkelijk afbreekbare verbindingen zijn goed oplosbaar in water zoals (lichte) minerale olie en aromaten (benzeen, toluene, ethylbenzeen en xylenen). Moeilijker afbreekbaar zijn PAK, gechlloreerde ethenen (zoals perchloorethenen) en persistente bestrijdingsmiddelen als lindaan drins en DDT.

Zware metalen kunnen niet worden afgebroken maar wel worden omgezet in een meer of minder beschikbare vorm. In de toplaag van de bodem heersen aerobe (zuurstofrijke) omstandigheden en onder de grondwaterspiegel (de verzadigde zone) heersen anaerobe omstandigheden. Dat betekent dat verontreinigingen als minerale olie en PAK,

die alleen aerob afbreekbaar zijn, van nature alleen in de toplaag worden afgebroken. Verontreinigingen die alleen onder anaerobe omstandigheden worden afgebroken, bijvoorbeeld gechloroerde ethenen, worden van nature alleen in de verzadigde zone afgebroken. De snelheid waarmee bacteriën deze verontreinigingen afbreken loopt uiteen van enkele weken tot tientallen jaren.

Microbiologische afbraak is van veel factoren afhankelijk:

- Een belangrijke factor in de beschikbaarheid van de verontreiniging. In principe kan alleen de fractie van de verontreiniging die oplosbaar is in het water worden afgebroken. Bepaalde bacteriën en schimmels hebben hier iets op gevonden, ze scheiden biosurfactants (zeep) of enzymen uit om de verontreiniging te mobiliseren.  
De beschikbaarheid wordt, behalve door de stoffeïenschappen, sterk bepaald door de bodemeïenschappen. Zo worden organische verontreinigingen sterker gebonden naarmate het organisch stofgehalte van de bodem toeneemt. Voor zware metalen is, naast het organische stofgehalte, vooral het lutumgehalte van de bodem bepalend voor de beschikbaarheid. Hoe hoger het lutumgehalte hoe sterker de zware metalen worden gebonden. Ook de redoxcondities zijn van belang bij de mobiliteit van metalen. Onder anaerobe condities kunnen metalen worden neergeslagen als metaalsulfiden. Daarnaast speelt de zuurgraad (pH) van de bodem een grote rol. Zware metalen zijn over het algemeen bij een lage pH (zuur milieu) beter oplosbaar en dus mobieler dan bij een hoge pH (basisch milieu).
- Bij natuurlijke afbraak van verontreinigingen met hoge concentraties (bijvoorbeeld minerale olie > 1.000 mg/kg d.s.) is de hoeveelheid macronutriënten (stikstof en fosfaat) vaak limiterend. Een optimale verhouding van koolstof:stikstof:fosfaat (C:N:P) is 250:10:5 (w/w). Naast macronutriënten zijn ook micronutriënten (sporenelementen en vitaminen) nodig. Micronutriënten komen over het algemeen in voldoende mate voor. Stagnatie van natuurlijke afbraak door een gebrek aan micronutriënten is zeer onwaarschijnlijk.
- Sommige nevenverontreinigingen kunnen de natuurlijke afbraak-

processen remmen. Remming kan optreden door de aanwezigheid van zware metalen of hoge zoutconcentraties. De aanwezigheid van een organische nevenverontreiniging kan ook gunstig zijn voor de afbraak van andere organische verontreiniging doordat de redoxcondities gewijzigd worden. Hierdoor kunnen gunstige condities ontstaan voor de afbraak van de hoofdverontreiniging.

De stoffeïenschappen en stofgerelateerde toxiciteit zijn bepalend voor de mate waarin bodemverontreiniging kan leiden tot ongewenste ecologische risico's (meer hierover lees je in hoofdstuk 4). Bodemorganismen worden over het algemeen via het bodemvocht (poriewater) blootgesteld aan de verontreiniging, in ieder geval bij opname door de huid of via de wortels. De fractie van de verontreiniging die via het poriewater kan worden opgenomen door de bodemorganismen is afhankelijk van de mate waarin de verontreiniging wordt gebonden aan de bodem. Bodemverontreiniging kan ook door organismen worden opgenomen door het direct eten van grond.

Microbiologische afbraak (mineralisatie), hetzij volledig hetzij onvolledig, en binding aan de bodem (immobilisatie) zijn de twee belangrijkste processen waarmee de verontreiniging door de bodem zelf onschadelijk wordt gemaakt. De combinatie van deze twee processen wordt ook Natural Attenuation (of natuurlijke eliminatie) genoemd. Het zelfreinigend vermogen kan worden gestimuleerd door de omstandigheden voor biologische afbraak of vastlegging te verbeteren. Zo kan de biologische afbraak van minerale olie en aromaten worden gestimuleerd door het toedienen van zuurstof en macronutriënten, een techniek die bekend staat als bioventing of -sparging. En het toedienen van klei, kalk of organisch materiaal leidt tot een sterkere binding van zware metalen.

## 2.4 Ecologie in de stad

Als men aan ecologie en ecosystemen denkt, denkt men vaak als eerst aan de buitengebieden. Betekent dat dan dat er geen stedelijk ecosysteem met eigen kenmerken en waarden is? Integendeel, er is wel degelijk sprake van ecologie in de stad. Er wordt niet voor niets een urbaan plantendistrict onderscheiden in Nederland.

Het urbaan district omvat de grote stenige gebieden in Nederland: stadskernen, begroeide muren en de grote industriegebieden en spoorwegemplacementen. Het is een betrekkelijk nieuw floradistrict dat in 1996 is opgenomen in de Nederlandse flora. Het urbaan district wordt gedomineerd door ruderales, tred- en pioniergemeenschappen met opvallend veel nieuwkomers, warmteminnende en vorstgevoelige soorten, adventieven en kosmopolitische soorten. De soorten die grotendeels aan stedelijke biotopen gebonden zijn worden stadsafhankelijke soorten genoemd. Hiertoe behoren, naast allerlei warmteminnende en vorstgevoelige soorten, ook de beschermde muurplanten. Daarnaast herbergt het urbaan district ook stadsminnende soorten. Deze zijn niet primair stadsafhankelijk maar wel karakteristiek voor de stedelijke flora. De urbane flora verandert nog voortdurend. Elk jaar komen er nieuwe soorten bij.

In de stad komen dus plantensoorten voor die je nergens anders vindt. Met dieren is het al niet anders. Juist in de stad vinden we typische stadsbewoners als gierzwaluwen. Ook ontsnapte halsbandparkieten doen het goed in de stad. En veel watervogels trekken in de winter naar de stad om hier voedsel te vinden en te overleven. In toenemende mate foerageren reigers en aalscholvers in stadswateren.

De stad biedt een grote diversiteit aan bodemmilieus en is warmer dan het omliggende landelijke gebied. Hieraan ontleent het zijn specifieke eigen kenmerken en mogelijkheden voor natuurontwikkeling en biedt een plek voor soorten, die elders niet meer kunnen overleven. Het is daarom van belang ook in de stad aandacht te hebben voor het bodemecosysteem als drager van deze natuur en voor de instandhouding van een gezonde bodem in tuinen, plantsoenen en parken. In verschillende steden in Nederland staat de stadsecologie steeds meer in de belangstelling. Aan de andere kant heeft het stedelijk gebied ook zo zijn eigen problemen op ecologie gebied. Hierop wordt dieper in gegaan in paragraaf 3.4.



Figuur 2.5: Planten in de stad (foto Edwin Dijkhuis).

## 3



## Gestrest bodemleven

### 3.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 1 al is genoemd, gebruiken we de bodem op veel verschillende manieren. De bodem heeft daardoor verschillende functies en verleent verschillende diensten al staan we daar niet altijd bij stil. Er wordt ook wel eens gezegd dat de bodem leeft. Allerlei bodemorganismen en bodemprocessen zorgen ervoor dat planten en dieren kunnen groeien en overleven, dat het klimaat gereguleerd wordt, dat landbouwgewassen geproduceerd kunnen worden en dat natuurgebieden zich kunnen ontwikkelen. Bij een gezonde bodem zijn al deze bodemorganismen en bodemprocessen met elkaar in evenwicht, er is sprake van duurzaam bodemgebruik. Het is te vergelijken met het menselijk lichaam. In ons lichaam zijn veel micro-organismen actief. Is een lichaam gezond dan is er sprake van een evenwicht tussen de verschillende organismen. Maar het komt ook voor dat het evenwicht verstoord wordt, bijvoorbeeld doordat te eenzijdig gegeten wordt. Daardoor wordt de mens ziek. Door uitgebalanceerder te eten, worden we weer beter.

Hetzelfde gebeurt bij het bodemleven. Door effecten van buitenaf kan het evenwicht verstoord worden waardoor de bodem bepaalde diensten niet meer of minder goed kan uitvoeren. Er moet dan actief worden ingegrepen. Dat is bijvoorbeeld te zien bij intensieve landbouw. Door de grootschaligheid en intensiviteit worden veel voedingsstoffen aan de bodem onttrokken. De bodem raakt daardoor uitgeput. Om toch voldoende landbouwgewassen te kunnen produceren, wordt kunstmest opgebracht en wordt het land intensief bewerkt. Beide activiteiten hebben gevolgen voor het bodemleven. Door de bedrijfsvoering aan te passen, vergelijkbaar met een uitgebalanceerd menu bij de mens, kan de bodem zich weer herstellen en kan deze weer duurzaam gebruikt worden.

Er zijn verschillende vormen van stress of bodembedreigingen. Om de bodem hiertegen te beschermen heeft de Europese Unie zeven bodem-

thema's gedefinieerd. In dit hoofdstuk wordt voornamelijk ingegaan op het bodemthema bodemverontreiniging. Kort wordt ook ingegaan welke stress landbouw voor het bodemecosysteem met zich meebrengt (de bodemthema's afname in het organisch stof gehalte en verdichting van de bodem). Hoewel het geen specifiek bodemthema is, wordt ook ingegaan op de stress die bodemecologie ondervindt in het stedelijk milieu, afgezien van stress door verontreiniging en verdichting van de bodem. In verschillende tekstvakken worden voorbeelden besproken van stress door bodemverontreiniging.

### Bodemthema's

De Europese Unie heeft 7 verschillende bodemthema's gedefinieerd (47). Deze thema's komen terug in het beleid, ook het Nederlandse beleid. Het gaat hierbij om:

- Erosie als resultaat van menselijk handelen. De toplaag van de bodem met daarin nuttige voedingsstoffen en micro-organismen verdwijnt. Mineralisatie processen kunnen hierdoor steeds minder goed worden uitgevoerd. De bodem verarmt hierdoor;
- Afname in organisch stof gehalte. Verarming van de bodem waardoor de koolstofcyclus uit balans raakt, er is immers minder voedsel;
- Verdichting van de bodem. Verdichting kan een gevolg zijn van stress waardoor de regenwormenpopulatie uit balans raakt maar kan op zichzelf ook een vorm van stress zijn. Verdichting van de bodem wordt veroorzaakt door het gebruik van (te) zware machines, bij ploegen (landbouw) of transport van materialen (bouwen). Als de bodem verdicht, kunnen plantenwortels minder goed doordringen in de bodem, hebben regenwormen meer moeite met het graven van gangen en raken stofkringlopen verstoord. De verdichting van de bodem brengt ook toename op risico's van erosie met zich mee;
- Verzilting, de toename van zoutgehaltes in van nature zoete systemen. De oorspronkelijke bodembewoners zijn hier niet tegen bestand;
- (Aard)verschuivingen. Het gaat hierbij om verschuiving van aardmassa van een helling. In Nederland speelt deze bodem

bedreiging nauwelijks een rol van betekenis;

- Afdichting van de bodem door de bouw van huizen of bedrijfspanden, dan wel wegen en overige fysieke infrastructuur. De bodem krijgt hierdoor een andere functie en kan de bestaande diensten niet meer vervullen. Door de afdichting verdwijnt de primaire productie door planten. Hierdoor vindt ook geen secundaire productie meer plaats (fragmentatie en mineralisatie). Bodemorganismen hebben steeds minder te eten en zullen op den duur grotendeels verdwijnen.
- Bodemverontreiniging. Verontreiniging kan allerlei effecten hebben op bodemorganismen en bodemprocessen. Zoals in hoofdstuk 2 is besproken is het mogelijk dat bepaalde kringlopen hierdoor minder goed of helemaal niet meer functioneren. Of het aantal regenwormen neemt af onder invloed van een verontreiniging waardoor de bodem verdicht en de waterretentie functie afneemt.

### 3.2 Stress door bodemverontreiniging

Zoals kort aangegeven in het tekstvak betreffende de bodemthema's kan bodemverontreiniging negatieve effecten hebben op het bodemleven. Bodemverontreiniging in de toplaag van de bodem is vaak in het verleden veroorzaakt. De bron van de belasting met verontreinigende stoffen is dus meestal niet meer aanwezig, hoewel de verontreiniging wel in de bodem aanwezig is. Wat zijn nou de effecten hiervan op het bodemecosysteem?

Als men kijkt naar bodemverontreiniging, kan deze ingedeeld worden in verschillende typen (tabel 3.1). Deze typen verontreiniging verschillen voor wat betreft hun gedrag in de bodem (zoals mobiliteit), mogelijkheden voor biologische afbraak (zie paragraaf 2.3) en opname mogelijkheden door organismen. Eén ding hebben ze echter met elkaar gemeen: ze kunnen allemaal een negatief effect hebben op het (bodem)ecosysteem.

Tabel 3.1

Gedrag van verontreinigingen in de bodem (6)

Type verontreiniging	Oplosbaarheid in water	Verdamping	Binding	Biologisch afbraak	Opname in plant/dier
Aromaten (bv. BTEX)	Goed	Ja	Nauwelijks	Zeer goed	Nee/ja
VOCI	Goed	Ja	Nauwelijks	Goed (vooral anaeroob)	Nee/ja
Zware metalen	Redelijk	Nee	Sterk	Nee	Ja/ja
Zware olie (o.a PAK)	Slecht	Nee	Sterk	Oplosbare fractie	Nee/ja
POP*	Slecht	Nee	Sterk	Slecht, alleen anaeroob	Nee/ja
Cyaniden, vrij en complex	Alleen vrij cyanide	Alleen vrij cyanide	Matig	Goed, behalve complex	Ja**/ja
Mest (met stikstof en fosfaat)	Stikstof goed, fosfaat slecht	Ammoniak	Stikstof zwak Fosfaat sterk	Ja, kringloop van elementen (zie 2.2)	Ja/ja

\* POP: *Persistente organische chloorverbindingen, zoals aldrin, dieldrin, PCB, lindaan, dioxine, DDT.*

\*\* Cyaniden worden goed door planten opgenomen, maar benut als stikstofbron, zodat geen ophoping in de plant optreedt.

Het is gebleken dat een bepaald gehalte aan verontreiniging in verschillende bodems niet altijd hetzelfde effect heeft op het bodemleven. Blijkbaar spelen meer factoren een rol bij het optreden van effecten dan alleen het totaalgehalte aan verontreiniging. In deze paragraaf wordt verder ingegaan op deze factoren.

### Blauwgraslanden langs de Elbe

In de 15<sup>e</sup> t/m de 19<sup>e</sup> eeuw stond er in Bremen een grote glassmelterij die enorme hoeveelheden arseen en lood in de lucht uitstootte bij de productie van kristalglas. Ondanks de enorme hinder en schade die in de wijde omgeving werd veroorzaakt, bleef de smelterij in bedrijf; hij was in bezit van de Koning van Saksen, die er veel geld mee verdiende. De gevolgen voor de natuur en de landbouw ten oosten van Bremen in het Elbedal waren dramatisch. Hoewel hier van nature vruchtbare klei sedimenteert en er voedselrijke graslanden zouden moeten zijn, moesten de boeren het doen met schrale blauwgraslanden waarop alleen schapen nog wat voedsel konden vinden. Hoe kon dit en waarom zijn deze voedselrijke graslanden er niet meer?

De belasting met arseen en lood was zo hoog, dat niet alleen alle nitrificerende bodembacteriën (verantwoordelijk voor de omzetting van ammonium in nitraat, zie paragraaf 2.2.2) verdwenen maar ook schimmels deze taak niet meer konden overnemen. Door de overmaat aan lood werd tevens veel fosfaat vastgelegd.

Planten hebben nitraat nodig om hun ionenbalans in evenwicht te houden. De opname van stikstof is kwantitatief het grootst en ieder teveel aan opgenomen anion (nitraat, fosfaat) kan eenvoudig worden gecompenseerd door opname van kationen (ammonium, kalium, magnesium) en/of uitscheiding van anionen (bicarbonaat). Door het stilvallen van de nitrificatie is bijna alle stikstof alleen beschikbaar als ammonium, dat nu in overmaat moet worden opgenomen. Dit moet worden gecompenseerd door extra uitscheiding van kationen (waterstof). De plant heeft hiervoor speciale aanpassingsmechanismen nodig en wordt minder productief, wat kenmerkend is voor planten uit voedselarme milieus. Er ontstonden dus blauwgraslanden, mede door het tevens optredende fosfaatgebrek. Na sluiting van de glassmelterij en het stoppen van de depositie van arseen en lood, herstelde de natuurlijke situatie geleidelijk. Door bemesting en afdekking met voedselrijk rivierslib kwam de nitrificatie weer op gang en kwam fosfaat weer beschikbaar. Opnieuw ontstonden in het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw voedselrijke graslanden.

### 3.2.1 Beschikbaarheid van bodemverontreiniging

Een factor die van belang is bij verontreiniging in de bodem is de beschikbaarheid van de verontreiniging. Er zijn in principe drie soorten beschikbaarheid te onderscheiden: chemische beschikbaarheid, biologische beschikbaarheid en toxicologische beschikbaarheid (12).

- *Chemische beschikbaarheid*: het effect van verontreinigingen in de bodem hangt sterk samen met de vorm waarin de verontreiniging voorkomt en de verdeling tussen de vaste fase en opgeloste fase. Verontreinigingen in de opgeloste fase kunnen vrij in oplossing zijn of gebonden aan organische en anorganische complexen. Dat deel van de verontreiniging wat in oplossing is, wordt gezien als chemisch het meest beschikbaar en zijn ook het belangrijkste voor de opname door organismen. Het totaalgehalte van verontreiniging in de bodem is een som van beschikbaar en niet beschikbaar gehalte
- *Biologische beschikbaarheid*: de biologische beschikbaarheid is dat deel van de verontreiniging wat daadwerkelijk wordt opgenomen door organismen. Welk deel van de aanwezige verontreiniging wordt opgenomen is afhankelijk van de verontreiniging en soort specifiek. Onderzoek naar bioaccumulatie van verontreinigingen geeft een indruk van de biologische beschikbaarheid
- *Toxicologische beschikbaarheid*: toxicologische beschikbaarheid heeft te maken met het gedrag van verontreinigingen in een organisme. Opgenomen verontreinigingen worden getransporteerd in een organisme en kunnen worden omgezet in een biologisch beschikbare vorm of in een niet-toxische vorm. Als de opnamesnelheid van een bepaalde stof hoger is dan de opslag-, omzetting- of uitscheidingsnelheid, kunnen effecten optreden. Daarnaast kunnen effecten optreden wanneer de drempelconcentratie voor die verontreiniging wordt overschreden voor een bepaalde functie of een orgaan in het organisme.

De bodemeigenschappen spelen een belangrijke rol bij de beschikbaarheid van verontreinigingen. In vruchtbare bodems met relatief veel organische stof en/of klei en een min of meer neutrale zuurgraad, vindt als gevolg van "veroudering" vastlegging en/of afbraak (Natural

Attenuation) van verontreinigende stoffen plaats. De beschikbaarheid en/of de concentratie van verontreinigingen neemt hierdoor af in de tijd. In zure en/of verzurende bodems kan de beschikbaarheid van voornamelijk zware metalen op termijn toenemen.

#### De ene bagger is de andere niet

De onderhoudsbagger, zoals deze vrijkwam uit het Rotterdamse havengebied, is rijk aan kalk en sulfiden, sterk lemig-kleiig, en zeer humeus. Na het opspuiten van deze bagger op het land treedt rijping op, waarbij aanvankelijk enige mobilisatie van zware metalen optreedt door omzetting van metaalsulfiden in metaalsulfaten en afbraak van humus. De zuurgraad blijft neutraal door de bufferende werking van de grote hoeveelheid kalk in de bodem. In de loop der jaren zal door fixatie van metalen, c.q. "veroudering", de beschikbaarheid weer sterk afnemen. Uit onderzoek in de Broekpolder bij Vlaardingen is gebleken dat na ruim 30 jaar rijping en "veroudering" voor de meeste zware metalen veel minder dan 1% biologisch beschikbaar is. Effecten op het bodemecosysteem zijn dan ook nauwelijks waarneembaar.

Hoe anders in de situatie in de loswallen, waar baggerspecie uit de haven van Hamburg werd opgespoten! Deze bagger is veel zandiger dan in Rotterdam, is wel humeus maar bevat nauwelijks kalk. Direct na opspuiting is de zuurgraad nog bijna neutraal (pH = 6 - 6,5), maar als gevolg van rijping daalt deze binnen 10 jaar naar een waarde van 3,5 tot 4. Er is onvoldoende kalk aanwezig in de opgespoten bagger om de verzurende werking van de omzetting van sulfide naar sulfaat te bufferen. Als gevolg hiervan neemt de beschikbaarheid van de zware metalen steeds meer toe tot meer dan 25% en daarmee ook het negatieve effect op het bodemecosysteem.

### 3.2.2 Bioaccumulatie van bodemverontreiniging

Niet alle bodemorganismen staan op dezelfde manier bloot aan de verontreiniging. Sommige organismen nemen alleen verontreiniging op als het is opgelost in het bodemvocht (poriewater). Denk hierbij bijvoorbeeld aan planten die water opnemen uit de bodem

en daarmee de in het water opgeloste nuttige (zoals stikstof) maar ook schadelijke stoffen (bijvoorbeeld zware metalen). Regenwormen kruipen door de grond en eten de grond. Daardoor kunnen zij via de huid verontreinigingen opnemen maar ook via het maag-darmkanaal omdat ze grond eten.

Als verontreinigingen vanuit het milieu worden opgenomen en vervolgens accumuleren in organismen spreken we van bioaccumulatie. Over het algemeen is dit de som van bioconcentratie (de opname vanuit de bodem of het water door de huid of het maag-darmkanaal) en biomagnificatie (opname vanuit het voedsel). De mate waarin een stof ophoopt in een organisme is de bioconcentratiefactor (BCF).

Bioaccumulatie treedt op als de opnamesnelheid groter is dan de uitscheiding en/of afbraaksnelheid. Als niet gelijktijdig voldoende



Figuur 3.1: Bioaccumulatie, ophoping van verontreiniging in de voedselketen.

afbraak en/of uitscheiding van de meekomende verontreinigende stoffen plaatsvindt, hoopt dit zich op in het dier, vooral in organen (nieren, lever), zenuwweefsel en vetweefsel (vooral bij stoffen met een hoge vetoplosbaarheid of  $\log K_{ow}$ ). Bioaccumulatie kan optreden in zowel planten als dieren en is nadelig voor zowel het bodemorganisme zelf als voor organismen die leven van dat bodemorganisme. Als bioaccumulatie van een stof optreedt, kan de toxische drempel worden overschreden waarboven negatieve effecten optreden. Ook kan een organisme zo druk zijn met uitscheiden van de verontreiniging dat er minder energie overblijft voor groei en reproductie. Hierdoor kan de gehele populatie van dat specifieke organisme bedreigd worden. Stoffen die in het weefsel van organismen worden opgenomen kunnen via de voedselketen worden doorgegeven aan hogere organismen (doorvergiftiging). Organismen die aan het eind van de voedselketen staan, worden hierbij aan de hoogste dosis blootgesteld (zie figuur 3.1). De bodemverontreiniging heeft dus niet alleen effect op het bodemleven maar ook op het leven wat afhankelijk is van het bodemleven voor de voedselinname.

Voor de metalen cadmium en kwik is aangetoond, dat doorvergiftiging in de voedselketen voorkomt als gevolg van bodemverontreiniging, en voor lood bestaat er een sterk vermoeden. Ook voor slecht afbreekbare pesticiden als drins, DDT en lindaan is doorvergiftiging aangetoond.

Als de bioaccumulatie van dien aard is dat een gehele gemeenschap van bodemorganismen daar hinder van ondervindt, heeft dat ook effect op het functioneren van het gehele bodemecosysteem en de uit te voeren ecologische dienst. Denk hierbij bijvoorbeeld aan regenwormen. Zoals te lezen in hoofdstuk 2 spelen regenwormen een essentiële rol in de bodem voor zowel de afbraak van organisch materiaal als de doorlatendheid van de bodem. Als de regenwormenpopulatie sterke hinder ondervindt van een verontreiniging kan ophoping van organisch materiaal optreden en kan het zijn dat de bodem verdicht waardoor ontwatering van de bovengrond wordt gehinderd. Niet alleen de regulatiefunctie van de bodem wordt hierdoor aangetast, maar ook de productiefunctie.



### Bestrijdingsmiddelenhoudende wormen in Rotterdamse bagger

In loswallen, opgespoten met onderhoudsbagger uit het Rotterdamse havengebied, zijn hoge gehalten (tot boven de interventiewaarden) aan drins en de metalen arseen, barium, chroom, cadmium en zink aanwezig. Desondanks komen er in de gerijpte lemig-kleiige baggerbodems hoge aantallen regenwormen voor, vergelijkbaar met de aantallen in schone lemige klei. Het gaat vooral om de algemeen voorkomende grondbewonende worm *Aporrectodea caliginosa*.

Tijdens laboratoriumproeven met dezelfde wormensoort, uitgezet op gerijpte bagger uit loswal De Esch in Rotterdam, zijn verschillende effecten aangetoond. Na enkele weken waren bijna alle uitgezette wormen doodgegaan en cocons (wormeitjes, waaruit de jongen worden geboren) waren nauwelijks gevormd.

Waarschijnlijk is er in de gerijpte bagger een geadapteerde wormenpopulatie ontstaan door natuurlijke selectie. Immers, alleen aangepaste wormen kunnen overleven en zich voortplanten. De loswal is al meer dan 30 jaar geleden opgespoten en heeft zich sindsdien autonoom kunnen ontwikkelen zonder menselijk ingrijpen.

Er is ook een keerzijde. De volop aanwezige regenwormen blijken grote hoeveelheden pesticiden (in dit geval vooral aldrin en dieldrin) op te nemen, wat met grote waarschijnlijkheid leidt tot doorvergiftiging hoger in de voedselketen. Bij bezoeken in februari en maart aan de loswal, voor mollen de paarperiode met de grootste graafactiviteit, bleken hier geen mollengangen of molshopen voor te komen. Op vergelijkbare niet verontreinigde kleigrond werden wel veel mollengangen en molshopen waargenomen.

De gerijpte bagger is dus met zekerheid geschikt als leefgebied voor mollen, maar deze worden zodanig belast met drins uit gegeten regenwormen, dat ze niet kunnen overleven. Het is nog niet onderzocht of dit doorvergiftigingseffect zich ook voordoet bij andere dieren die veel regenwormen eten, zoals spitsmuizen en zangvogels.

### 3.3 Bodemstress ten gevolge van landbouw

In Nederland wordt de bodem intensief gebruikt voor stedelijke functies, industrie en landbouw. Het landbouwareaal in Nederland is groot (ruim 65% van Nederland wordt gebruikt voor landbouw). Landbouwkundige ingrepen kunnen grote effecten hebben op het bodemecosysteem. Door vergraving of geregeld ploegen, verandert de samenstelling van de bodemfauna ingrijpend. Sommige soorten worden bevoordeeld, ondervinden weinig hinder of herstellen zich snel, maar voor andere soorten geldt dat niet. Door ploegen en vergraven komen regenwormen aan het oppervlak te liggen, die (tijdelijk) bloot worden gesteld aan verhoogde predatie waardoor het bodemecosysteem verstoord wordt.

#### *Verdichting*

Verdichting van de bodem is een belangrijke vorm van stress voor het bodemecosysteem. In de landbouw wordt de bodem verdicht ten gevolge van het rijden met zware (landbouw) machines. De bewortelbaarheid van het bodemprofiel verslechtert hierdoor en er treedt waterstagnatie op in natte perioden. Bovendien wordt het leefmilieu voor bodemdieren beïnvloed. Regenwormen en mollen kunnen nog maar moeilijk gangen in de bodem graven. Het leefmilieu wordt ook minder geschikt voor springstaarten en andere dieren op de bodem, omdat geen luchtige humeuze laag meer aanwezig is. Bovendien verandert de vegetatie. Deze wordt eenzijdiger en minder productief, zodat er voor bodemdieren minder te eten is.

#### *Bemesten*

Bemesten heeft ook grote gevolgen. Bacteriën worden sterk bevoordeeld ten koste van de schimmels, vooral als verse drijfmest of vers groenafval in de bodem wordt gebracht (mestinjectie). Van cyaniden in verse drijfmest wordt vermoed dat ze een negatieve invloed hebben op de bodemfauna en de bacteriepopulaties doet wijzigen in een ongunstige richting. Dit is niet het geval als drijfmest op het land wordt uitgereden, of bij het opbrengen van gerijpte compost. Dit heeft juist een positief effect op regenwormen. Bij het injecteren van verse varkensmest worden ook grote hoeveelheden goed biologisch beschikbaar koper in de grond gebracht, met een sterk vergiftigende werking op regenwormen en nog sterker op potwormen.

*Pesticiden*

Het gebruik van pesticiden leidt niet alleen tot het uitroeien van het beoogde plaagdier boven de grond, maar heeft ook effecten op de rest van het (bodem)ecosysteem. Voor springstaarten, bodemmijten en bodemspinnen zijn toegepaste *insecticiden* veelal dodelijk. *Fungiciden* tasten de schimmelpopulaties in de ondiepe bodemlagen aan. In de bodem geïnjecteerde *nematiciden* (bestrijdingsmiddelen tegen nematoden of aaltjes), zoals methylbromide (inmiddels verboden) en dichloorpropeen leiden onbedoeld tot negatieve effecten op de gehele bodemfauna (met uitzondering van schimmels en bacteriën). De genoemde effecten treden in mindere mate ook op bij het tijdelijk onder water zetten van grond, een alternatieve meer milieuvriendelijke methode om aaltjes te bestrijden.

**Dioxines blijven een probleem in de bodem**

In de zestiger tot en met de tachtiger jaren van de vorige eeuw stootte de verbrandinginstallatie bij Rozenburg grote hoeveelheden dioxines uit bij de verbranding van huishoudelijk, bedrijfs- en chemisch afval bij een te lage temperatuur. Deze dioxines sedimenteerden windafwaarts in de Lickebaertpolder tussen Vlaardingen en Maassluis op het bladoppervlak van grassen en de bodem met als gevolg dat melkproducten en eieren, geproduceerd door de boeren in dit gebied, teveel dioxines bevatten en werden afgekeurd voor consumptie.

De installatie van een kostbare rookgasreiniging heeft de belasting van de bodem met dioxines gestopt maar daarmee is het probleem niet opgelost. Dioxines zijn zeer persistent en hopen zich in de humeuze bodemlaag, waar ze sterk worden vastgelegd in humus. Opname van deze dioxines in het gras en andere kruiden treedt weliswaar nauwelijks op, maar koeien eten met iedere hap gras ook grond. Per dag gaat het om ongeveer een halve kilo. Zo krijgen grazende koeien toch weer teveel dioxines binnen in de winterperiode als het gras maar langzaam groeit. In de zomer is de opname veel minder en blijven melkproducten onder de norm. Zo blijven de dioxines in de bodem nog steeds een probleem voor boeren.

**3.4 Bodemstress in de stad***Bodemverontreiniging*

Door het grootschalig ophogen met allerlei reststoffen, als stadsafval, toemaak en/of bagger, koolassen en slakken, bouw/sloopafval en oorlogspuin, is op bedrijventerreinen en in bijna alle vooroorlogse stedelijke gebieden sprake van diffuse bodemverontreiniging met vooral barium, koper, lood, zink en PAK.

*Bodemverdichting*

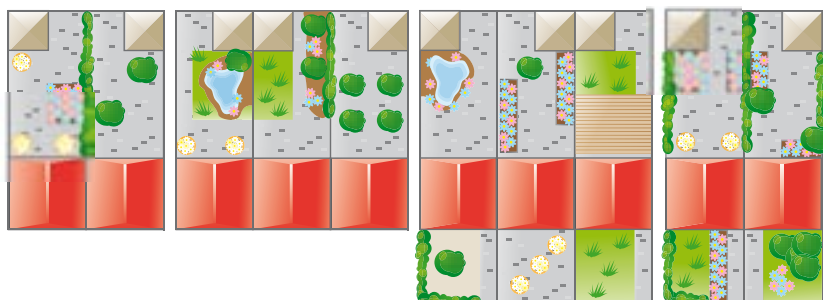
Net als in landbouwgebieden, komt ook in het stedelijke gebied bodemverdichting veel voor. Het gebruik van zware machines tijdens de realisatie van gebouwen, het gebruik van trilmachines en/of zwaar transport zijn de belangrijkste oorzaken.

Onder wegen is verdichting veelal gewenst en met trilmachines bewerkstelligd, zodat voldoende bodemstabiliteit wordt bewerkstelligd, al worden hiermee ook de groeimogelijkheden voor straatbomen beperkt. In tuinen is dit echter ongewenst om dezelfde redenen als in landbouwgebieden: verslechtering van de waterhuishouding en de groeimogelijkheden van (sier)planten, en navenant aantasting van het bodemecosysteem.

*Eilandwerking*

In hoeverre een bodemecosysteem stabiel is of niet, wordt niet alleen bepaald door stressfactoren maar ook door de grootte van het gebied waarin het ecosysteem aanwezig is. Ook de uitwisselingsmogelijkheden met naburige ecosystemen zijn hierbij van belang. Dit geldt niet alleen voor grote natuurgebieden maar ook voor bodemecosystemen die al goed ontwikkeld kunnen zijn over geringe oppervlakten (bijvoorbeeld groep van tuinen binnen een woonblok) zijn deze factoren van belang. Het gaat dan niet alleen om grotere (zichtbare) organismen als mollen en planten maar ook om de kleinere (voor het oog onzichtbare) bodemorganismen zoals bacteriën.

Op basis van studies van ecosystemen op geïsoleerd liggende eilanden, is de zogenaamde “eilandtheorie” ontwikkeld. Hieruit bleek dat



<b>Legenda</b>	Bloempotten	Heg
	Vijver	Huis
	Gras	Schuur
	Grote beplanting	Bestrating
	Kleine beplanting	Vlonder

Figuur 3.2: Voorbeeld van eilandwerking in een woonblok.

kleine ecosystemen, die geen of weinig uitwisselingsmogelijkheden hebben met andere ecosystemen, zich minder goed/divers ontwikkelen en veel kwetsbaarder zijn voor het uitsterven van essentiële soortgroepen. Het is waarschijnlijk dat deze theorie ook opgaat voor bodemecosystemen in sterk versnipperde groengebieden, zoals de stad (zie figuur 3.2.). In naoorlogse woonwijken is weliswaar veel groen aanwezig, maar dit groen is onderverdeeld in vele kleine terreintjes, van elkaar gescheiden door gebouwen, wegen en andere verhardingen waardoor in principe veel kleine eilandjes gevormd worden waarin de afzonderlijke bodemecosystemen relatief kwetsbaar zijn en arm in biodiversiteit. De trend achtertuinen steeds verdergaand te bestraten heeft eveneens invloed op de biodiversiteit in het bodemecosysteem. Hierdoor worden de stedelijke eilandjes steeds kleiner. Uit onderzoek in het stedelijke gebied van Rotterdam en in andere Rijnmond

gemeenten blijkt dat de bodembiodiversiteit in tuinen lager is dan in grote stadsparken, recreatie- en natuurgebieden. Ook in andere grote steden (Groningen) heeft men deze ervaring. In dorpen met veel grote tuinen, en aansluitend op landbouwgronden speelt de eilandwerking niet of in veel mindere mate.

### Springstaarten

Springstaarten behoren tot de geleedpotigen. Het zijn kleine insecten zonder vleugels. Deze zeer kleine (0,5 tot 6 mm lang) dieren leven in de strooisellaag op de bodem. Ze zijn langwerpig tot kogelrond, met een duidelijke kop en twee antennes, en wit tot bruin van kleur. Op de buik hebben de meeste springstaarten een springvork ('springstaart') waarmee ze zich snel kunnen verplaatsen. Ze zijn algemeen op alle bodemtypen. Er komen in Nederland circa 250 soorten voor.

Springstaarten leven vooral op plaatsen waar een hoge relatieve luchtvochtigheid heerst. Ze voeden zich met rottend plantaardig materiaal, maar ook met mos, algen en schimmels. Ze worden voornamelijk aangetroffen in de bovenste bodemlaag, tussen strooisel, gras, grind, e.d.



Foto's springstaarten (van links naar rechts) *Folsomia candida* en *Orchesella cincta* (foto's T. Heijerman) en *Entomobrya nicoleti* (foto S. Hopkin).

## 4



## Hoe wordt stress door bodemverontreiniging vastgesteld?

### 4.1 Algemeen

In het voorgaande hoofdstuk (hoofdstuk 3) is aangegeven dat het bodemleven beïnvloed kan worden door effecten van buitenaf. In dit hoofdstuk (hoofdstuk 4) wordt ingegaan op het meten van die stress, specifiek veroorzaakt door verontreiniging. Eerst wordt ingegaan op parameters die gemeten zouden kunnen worden om vast te stellen of een bepaalde bodem geschikt is voor de gewenste ecosystemedienst. Daarna wordt de Triade benadering besproken als instrument voor het vaststellen van stress ten gevolge van bodemverontreiniging.

### 4.2 Ecosystemediensten

Om vast te stellen of een bodem geschikt is voor een bepaalde functie of voor het vervullen van een bepaalde dienst kan bodemonderzoek worden uitgevoerd. Dit bodemonderzoek bestaat bij voorkeur uit een combinatie van bodemchemisch en -fysisch onderzoek en bodem-ecologisch onderzoek. In tabel 4.1 staat vermeld welke parameters het meest indicatief zijn. Met andere woorden als men inzicht heeft in die parameters kan worden ingeschat of de bodem geschikt is voor het gewenste bodemgebruik. In deze tabel zijn alleen daadwerkelijke metingen en analyses opgenomen. Het merendeel van de metingen is opgenomen in BoBi, de Bodembioologische Indicator, verzameld en uiteindelijk geïntegreerd door RIVM en Alterra. Daardoor kunnen metingen van een bepaalde locatie worden vergeleken met metingen op referentielocaties met hetzelfde bodemgebruik en bodemtype. Door de vergelijking wordt duidelijk of op de getoetste locatie sprake is van een “gezonde” bodem die de ecosystemediensten naar behoren uit kan voeren. Voor een uitgebreider overzicht van de koppeling van de ecosystemediensten en de bijbehorende meest indicatieve bodemparameters wordt verwezen naar het RIVM rapport (4).

**Tabel 4.1**

Overzicht bodemparameters voor het bepalen van de geschiktheid van een bodem voor de gewenste ecosystemedienst of bodemfunctie (4).

Met een ● is aangegeven welke parameters relevant zijn voor de verschillende ecosystemediensten.

Parameters	Bodemvruchtbaarheid			Aanpassingsvermogen		Reactorfunctie				Habitatfunctie
	Nutriënten vasthouden/leveren	Bodemstructuur	Weerstand ziekte/plagen	Herstelvermogen	Adaptatie/veerkracht	Fragmentatie/mineralisatie	Zelfreinigend vermogen	Waterretentie	Klimaatfuncties	
Omvang bacteriegemeenschap	●	●	●			●	●			●
Bacteriële groeisnelheid	●			●		●	●			
Genetische diversiteit bacteriën			●	●	●		●		●	
Potentiële koolstof mineralisatie					●	●	●		●	
Potentiële stikstof mineralisatie	●				●	●	●		●	
Genetische diversiteit bacteriën			●	●	●		●		●	●
Fysiologische microbiële diversiteit			●	●	●		●		●	●
Diversiteit nematoden gemeenschap			●	●	●					●
Omvang potwormen gemeenschap		●				●				●
Diversiteit potwormen gemeenschap										●
Omvang regenwormen gemeenschap	●	●				●		●	●	●
Diversiteit regenwormen gemeenschap				●	●	●				●
Omvang micro-athropoden gemeenschap										●
Diversiteit micro-athropoden gemeenschap					●					●
Zuurgraad	●	●	●			●	●			●
Organisch stof gehalte	●	●	●	●	●	●		●	●	●
Totaal stikstof	●				●					●
Totaal fosfaat										●
Beschikbaar fosfaat	●				●	●				
Verontreiniging (voornamelijk zware metalen en bestrijdingsmiddelen)					●					
Bulkdichtheid		●						●		
Indringweerstand		●					●	●	●	

### 4.3 Effecten van bodemverontreiniging op het bodemleven

Bodemverontreiniging kan leiden tot ongewenste ecologische effecten en risico's voor plant en dier. Voorbeelden waar dit speelt zijn voormalige vloeivelden, stortplaatsen zonder bovenafdichting, schietterreinen, uiterwaarden, voormalige industrieterreinen, braakliggende terreinen en parken en woningen met tuinen die zijn aangelegd op een verontreinigde ophooglaag. De terreinen hebben met elkaar gemeen dat er geen bovenafdichting in de vorm van bestrating of bebouwing aanwezig is. Veel voorkomende bodemverontreinigingen in de bovengrond zijn zware metalen, PAK, PCB en bestrijdingsmiddelen als drins en DDT. Meestal is sprake van een cocktail aan verontreinigingen.

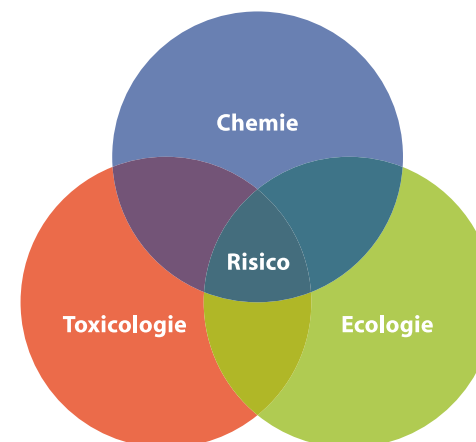
Om vast te stellen of er op een dergelijke locatie sprake is van "onaanvaardbare" ecologische risico's wordt in stap 2 van het Saneringscriterium een (conservatieve en generieke) standaardbeoordeling uitgevoerd op basis van de totaal gehalten zoals die zijn vastgesteld in het oriënterend of nader bodemonderzoek en de bodemfunctie (31). Er is sprake van onaanvaardbare risico's voor het ecosysteem als bij het huidige of voorgenomen gebruik van de locatie:

- de biodiversiteit kan worden aangetast (bescherming van soorten);
- kringloopfuncties kunnen worden verstoord (bescherming van processen);
- bioaccumulatie en doorvergiftiging kan plaatsvinden.

De aanwezigheid van modelmatig bepaalde ecologische risico's wil echter niet altijd zeggen dat er op een locatie ook *daadwerkelijk* sprake is van ecologische risico's. De risico's kunnen lager zijn doordat verontreiniging is afgebroken of doordat deze niet beschikbaar is. Als het vermoeden bestaat dat de ecologische risico's worden overschat of als er een complexe afweging gemaakt moet worden tussen het beschermen van natuurwaarden enerzijds en het uitvoeren van een bodemsanering anderzijds dan is het zinvol om vast te stellen wat de locatiespecifieke risico's zijn.

Voor de uitvoering van stap 3 van het Saneringscriterium mag bij het bepalen en beoordelen van de ecologische risico's volgens de Circu-

laire Bodemsanering (31) de Triade benadering worden toegepast. De Triade benadering is oorspronkelijk ontwikkeld voor de beoordeling van ecologische risico's in de waterbodem. De Triade benadering voor landbodems is sinds zo'n 10 jaar binnen diverse kaders in ontwikkeling, o.a. in NOBIS verband (44), binnen het Programma Geïntegreerd BodemOnderzoek (19) en bij het RIVM (18, 20, 21). De Triade is een methode waarmee de ecologische effecten en risico's van een bodemverontreiniging worden gemeten en beoordeeld. De methode (figuur 4.1) combineert resultaten van chemische analyses, bioassays en ecologische veldinventarisaties.



Figuur 4.1: Triade. Het combineren van resultaten van chemische analyses, bioassays en ecologische veldonderzoek leidt tot vermindering van onzekerheden bij het bepalen van het ecologische risico.

In de volgende paragrafen wordt dieper ingegaan op de wijze waarop het Triade-onderzoek wordt uitgevoerd en beoordeeld. Er wordt gewerkt aan een NEN procesnorm voor het uitvoeren van ecologische risicobeoordeling van bodemverontreiniging (NEN 5737:2009. Bodem-landbodem proces van locatiespecifieke ecologische risico-

beoordeling van bodemverontreiniging (concept). In deze norm wordt ingegaan op de wijze waarop het proces rond de uitvoering van het onderzoek moet worden vorm gegeven. Een voorwaarde voor een goed Triade onderzoek is het vroegtijdig betrekken van de actoren zodat draagvlak wordt verkregen voor zowel de aanpak als de beoordeling en het uiteindelijke besluit voor de locatie (wijze van saneren of beheren) (13). Dit laatste maakt overigens geen onderdeel uit van de Triade methodiek.

#### 4.4 Triade

##### 4.4.1 Uitvoering Triade

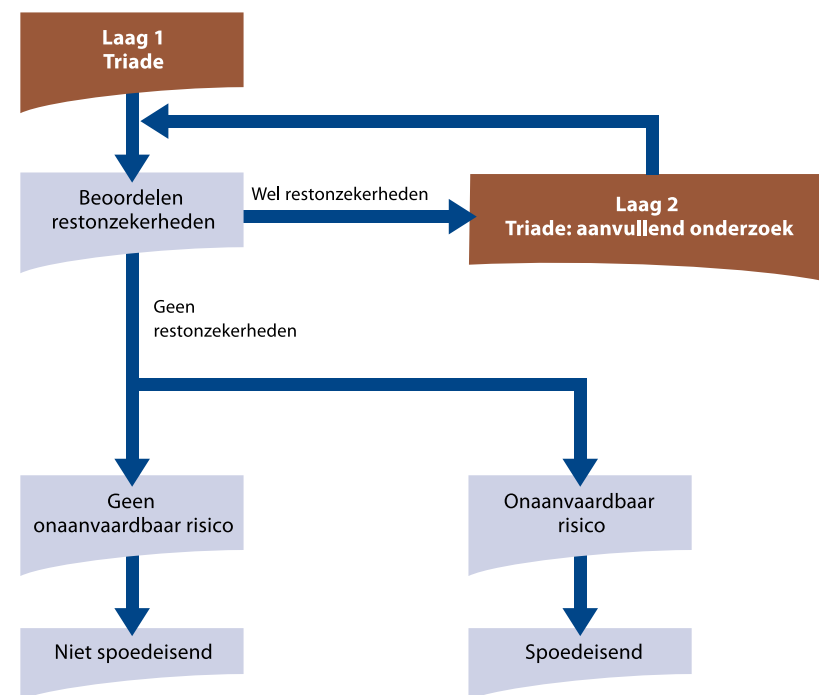
Bij de Triade benadering wordt de verontreinigingsituatie vanuit de volgende drie onderzoeksvelden onderzocht (zie figuur 4.1):

- I. *Chemie*: Analyse van verontreinigingen in de bodem, bepalen biologisch beschikbare fractie en opgenomen hoeveelheid verontreiniging in plant of bodembewonende organismen.
- II. *Toxicologie*: Uitvoering van bioassays (laboratorium testen) om de toxiciteit van de verontreinigde grond voor organismen vast te stellen.
- III. *Ecologie*: Bodemecologisch veldonderzoek om vast te stellen of de aanwezige organismen negatieve effecten ondervinden van de verontreiniging.

Naarmate in meer onderzoeksvelden effecten worden waargenomen, die toe te schrijven zijn aan de bodemverontreiniging, is het waarschijnlijker dat deze zich inderdaad ook voordoen in het veld (meervoudige bewijslast). Als slechts in één of geen van de onderzoeksvelden een effect wordt aangetoond, dan heeft de bodemverontreiniging er waarschijnlijk geen of weinig effect op het bodemleven.

Het Triade onderzoek kan stapsgewijs worden uitgevoerd. Gestart wordt veelal met een basisset die bestaat uit snelle en relatief eenvoudige testen en analyses (eerste screening). Dit wordt een eerste laag of "mini" Triade genoemd (18). Wanneer er na uitvoering van deze beperkte Triade nog onvoldoende zekerheid bestaat over de aanwezigheid van ecologische risico's, omdat de resultaten van de drie onderzoekslijnen niet in dezelfde richting wijzen, dan kan het onder-

zoek worden uitgebreid met aanvullende testen (zie figuur 4.2). De ervaring leert dat een dergelijke stapsgewijze uitvoering van de Triade voorkomt dat onnodig veel geld wordt uitgegeven. Iedere extra laag van het Triade onderzoek geeft een meer kwantitatieve onderbouwing van de aanwezige risico's.



Figuur 4.2: Fasering ecologische risicobeoordeling (aangepast uit 19).

##### 4.4.2 Monstername

Voor de uitvoering van het Triade onderzoek worden monsters genomen op de verontreinigde locatie. In tegenstelling tot het reguliere bodemonderzoek, waarbij wordt vastgesteld of er sprake is van

bodemverontreiniging, is er geen richtlijn voor het nemen van monsters voor dit type onderzoek noch voor het aantal monsters. Selectie van de te bemonsteren locaties vindt plaats op basis van resultaten uit voorgaande bodemonderzoeken. Zo wordt efficiënt gebruik gemaakt van de al uitgevoerde analyses op verontreiniging.

Bij het selecteren van de te bemonsteren locaties gelden de volgende aandachtspunten:

- Er wordt gestreefd naar een range van concentraties oplopend van laag (bij voorkeur schoon) naar hoog. Op basis van deze gradiënt is het mogelijk een dosis-effect-relatie vast te stellen die kan worden vertaald naar de locatie. Aanbevolen wordt monsters te nemen die hoger en lager zijn dan de generieke ecotoxicologische risicogrenzen (paragraaf 1.3).
- Voor het vergelijken van de resultaten van de onderzoeksvelden Toxicologie en Ecologie dient tevens een niet verontreinigde lokale referentie te worden meegenomen. De bodemsamenstelling en het gebruik van de referentielocatie dienen echter wel overeen te komen met de onderzoekslocatie. In de praktijk blijkt het lastig om een geschikte schone referentielocatie te vinden (13). Als alternatief kan in dat geval het monster met de laagste concentratie als referentie worden gebruikt of kan gebruik gemaakt worden van referentiewaarden uit de literatuur (5, 22);
- De bodemmonsters dienen daarnaast bij voorkeur te worden genomen op deellocaties met een vergelijkbare begroeiing die kenmerkend is voor de locatie. In een bosbodem komen namelijk andere bodemorganismen of in een andere populatiesamenstelling voor dan in een gazon;
- De bodemmonsters worden bij voorkeur genomen van de bovenste 30 cm van de bodem, omdat daar de grootste dichtheid aan bodembewonende organismen in leeft. Indien de verontreiniging dieper zit kan ervoor gekozen worden om de monsters ook dieper te nemen. Men moet zich er in dat geval van bewust zijn dat ecologische veldinventarisaties geen aanvullende waarde hebben omdat de organismen in de bovengrond niet blootgesteld worden aan de dieper gelegen verontreiniging.

#### 4.4.3 Keuze meetmethoden

Invulling van het Triade onderzoek is altijd maatwerk. Voorafgaand aan het onderzoek wordt een onderzoeksplan opgesteld waarbij rekening gehouden moet worden met de aanwezige (cocktail aan) verontreiniging(en), het beoogde bodemgebruik, algemene bodemkenmerken als bodemtype, vochtigheidstoestand, organisch stofpercentage en zuurgraad, en de op de locatie aanwezige en gewenste ecologie. Daarnaast is het van belang dat de uiteindelijke meetmethoden antwoord kunnen geven op de vragen die van belang zijn voor de te onderzoeken locatie. De uiteindelijke keuze van de uit te voeren analyses en testen moet worden afgestemd op deze locatiespecifieke omstandigheden. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op voorbeelden van analyses die binnen de drie onderzoeksvelden in een Triade kunnen worden uitgevoerd. Voor een (niet uitputtend) overzicht van gestandaardiseerde testen wordt verwezen naar het RIVM (18).

##### *Milieuchemie*

In het onderzoeksveld Milieuchemie worden de volgende analyses en berekeningen uitgevoerd (schuin gedrukte analyses zijn niet standaard maar wel aan te bevelen):

- Verontreiniging en algemene bodemparameters;
- *Metten van de beschikbare fractie;*
- *Metten van de opgenomen hoeveelheid verontreiniging;*
- *Berekening van het risico op doorvergiftiging.*

##### *Verontreiniging en algemene bodemparameters*

Analyses op verontreiniging worden uitgevoerd om vergelijking met en interpretatie van de ecologische parameters mogelijk te maken. Van de grondmonsters worden verder de belangrijkste bodemkenmerken bepaald: bodemtype, organisch stof, pH en het lutumgehalte.

##### *Metten van de beschikbare fractie*

Veel verontreinigingen zijn weliswaar in de bodem aanwezig, maar zijn dusdanig gebonden aan grond of andere in de bodem aanwezige deeltjes dat ze niet beschikbaar zijn. Door het bepalen van de beschikbare fractie wordt vastgesteld welk deel van de verontreiniging in potentie opgenomen kan worden door bodemorganismen die via



**Tabel 4.2**

*Overzicht methoden voor het vaststellen van de beschikbare fractie van verschillende typen verontreiniging*

Analysemethode	Beschrijving	Toepasbaar voor
<b>CaCl<sub>2</sub> extractie</b>	Extractie vindt plaats met 0,01 M CaCl <sub>2</sub> oplossing. Deze oplossing wordt gezien als een benadering van een gemiddelde bodemoplossing. Concentraties in het extract geven een indicatie van de beschikbaarheid van nutriënten en verontreinigingen voor bodemorganismen (26).	Zware metalen en nutriënten
<b>SPME (Solid Phase Micro Extraction)</b>	Extractie vindt plaats met behulp van SPME-fibers Dit zijn silica fibers die gecoat zijn met een dun laagje vloeibaar polymeer. Dit polymeer absorbeert beschikbare componenten uit de bodem. Vervolgens wordt de fiber met behulp van HPLC of GC geanalyseerd en wordt de beschikbare fractie berekend (25).	Organische verontreinigingen
<b>Tenax-extractie</b>	Tenax-korrels zijn hydrofobe korrels die worden toegevoegd aan een waterige slurry van grond. De korrels adsorberen de goed beschikbare fractie van hydrofobe stoffen (organische verontreinigingen). De verontreiniging die na extractie achtergebleven is in de grond is slecht beschikbaar (48).	Organische verontreinigingen
<b>Persulfaat-oxidatie</b>	Methode voor het inschatten van beschikbaarheid en biologische afbreekbaarheid. Door een snelle oxidatie met persulfaat wordt de beschikbare fractie afgebroken. De fractie die overblijft is niet beschikbaar (15, 45).	Organische verontreinigingen

het bodemvocht worden blootgesteld aan de verontreiniging (let op: dit is dus de chemische beschikbaarheid van de verontreiniging, vaak verward met biologische beschikbaarheid. Zie hoofdstuk 3 voor meer details hierover). Dit geeft een betere indruk van de risico's dan analyses op totaalgehalten. Voor het vaststellen van de beschikbare fractie zijn verschillende methoden beschikbaar (zie tabel 4.2).

#### *Meten van de opgenomen hoeveelheid verontreiniging*

Bodemorganismen zijn in staat om bepaalde verontreinigingen die in opgeloste vorm in de bodem aanwezig zijn op te nemen en op te slaan (bioaccumulatie). Opname kan zowel via de huid als via het maag-darmkanaal plaatsvinden. Via verschillende voedselrelaties bestaat er vervolgens een risico op doorvergiftiging in de voedselketen. Het is van belang om op voorhand de belangrijkste voedselrelaties op een locatie te bepalen. De relatie worm - vogel/zoogdier wordt vaak als de meest kritische route beschouwd (figuur 4.3).

Voor het bepalen van het risico op doorvergiftiging van verontreiniging in de voedselketen worden vaak organismen verzameld in het veld. Zoals eerder besproken spelen wormen een sleutelrol bij de vorming van humus in de bodem en zijn ze bovendien een belangrijke voedselbron voor veel hogere diersoorten. Daarom worden in het veld vaak wormen verzameld die vervolgens worden geanalyseerd op verontreiniging. Als op de locatie geen wormen voorkomen dan kunnen andere representatieve bodemorganismen worden verzameld en geanalyseerd. Dit kunnen bijvoorbeeld pissebedden zijn. In het geval dat de belangrijkste doorvergiftigingsroute via planten verloopt, worden deze op de locatie bemonsterd en geanalyseerd.

#### *Berekenen risico op doorvergiftiging*

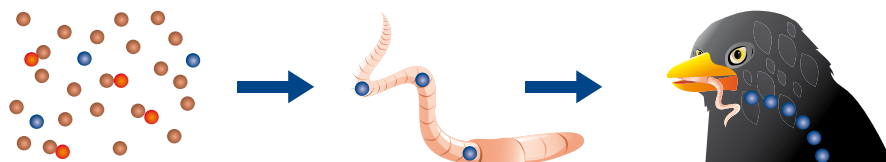
Met de verkregen resultaten kan vervolgens een modellering worden uitgevoerd waarbij de risico's van doorvergiftiging bij hogere organismen bepaald worden. Het doel hiervan is te bepalen of doorvergiftiging van de verontreiniging in de voedselketen mogelijk is. Daarbij dient rekening gehouden te worden met het foerageergebied van een voor de locatie representatieve soort in de voedselketen. Dit is het gebied waarbinnen naar voedsel gezocht wordt. In het stedelijk milieu

is dit bijvoorbeeld een merel, deze heeft een foerageergebied van circa 1.000 m<sup>2</sup>. In parken en natuur/recreatiegebieden is de mol een relevante soort, deze heeft een territorium van 1.000 tot 10.000 m<sup>2</sup>. Voor het berekenen van de doorvergiftiging in de voedselketen zijn verschillende modellen beschikbaar zoals het model OMEGA (16).

### Toxicologie

In het onderzoeksveld Toxicologie worden bioassays uitgevoerd. Dit zijn laboratoriumtesten waarbij standaardorganismen worden blootgesteld aan verontreinigde (gehomogeniseerde en soms gezeefde) grond van de locatie. Bioassays worden uitgevoerd om vast te stellen of de grond van de onderzoekslocatie toxisch is voor het bodemecosysteem. Belangrijk is te beseffen dat de behandeling (homogeniseren en zeven) invloed kan hebben op de beschikbaarheid van de aanwezige verontreiniging.

Bij de mini-Triade worden vaak alleen Microtox testen uitgevoerd. Microtox is een acute test (snel en kortdurend) waarbij bacteriën worden blootgesteld aan de grond van de locatie. Deze test is vooral gevoelig voor zware metalen. De mini-Triade kan worden uitgebreid met chronische testen. Chronische testen zijn langdurige testen waarbij organismen gedurende (een deel van) hun levenscyclus worden blootgesteld aan verontreiniging. Typische eindpunten van chronische testen zijn reproductie en groei. Voorbeelden van chronische testen zijn regenwormentesten.



- Gronddeeltjes
- Opgelost metaaldeeltje
- Metaaldeeltje gebonden aan gronddeeltje

Figuur 4.3: Bioaccumulatie, ophoping van verontreiniging in de voedselketen.

In de test met regenwormen wordt gekeken naar overleving, groei en reproductie van regenwormen bij blootstelling aan de grond van de locatie. Als er van nature geen regenwormen op de locatie aanwezig zijn (bijvoorbeeld door het bodemtype) kunnen beter bioassays met andere organismen worden uitgevoerd bijvoorbeeld springstaarten. Springstaarten zijn één van de weinige organismen die van nature voorkomen op bodems met een lage pH. Zoals al eerder gemeld bepalen de omstandigheden op de onderzoekslocatie in grote mate welke test wordt ingezet.

### Ecologie

De ecologische veldinventarisatie geeft een beeld van de effecten van een verontreiniging in het veld. Hierbij wordt door experts bijvoorbeeld gekeken naar het voorkomen van bepaalde plant- en diersoorten, de populatieopbouw van de aanwezige regenwormenpopulatie, door de soortensamenstelling van nematodenpopulatie of naar bodemfuncties zoals nitrificatie. Nematoden zijn kleine bodemaaltjes. Zie intermezzo nematoden op pagina 19.

Nitrificatie is zeer gevoelig voor verstoring als gevolg van de aanwezigheid van verontreiniging. Het levert daarmee informatie over de functionaliteit van de bodem.

De ecologische veldinventarisatie wordt bij voorkeur uitgevoerd in de periode april - september. Vanwege de temperatuur van de bodem in de winter is een veldinventarisatie in het winterseizoen of in het late najaar niet zinvol omdat veel bodemorganismen dan dieper in de bodem aanwezig zijn. Ook een zeer droge zomerperiode is minder geschikt.

#### 4.4.4 Beoordeling Triade

De beoordeling of er op een locatie sprake is van ecologische risico's vindt plaats door verontreinigde monsters te vergelijken met een schone referentie of, indien het niet mogelijk is een schoon monster te nemen van de locatie, het minst verontreinigde monster. Door het combineren en integreren van de resultaten van de verschillende analyses en testen worden de actuele, dus de daadwerkelijke risico's op een locatie door de uitvoerende onderzoeker zichtbaar gemaakt aan de actoren die betrokken zijn bij de betreffende locatie.

Voor het beoordelen van de ecologische risico's is nog geen wettelijk kader ontwikkeld. Er zijn verschillende methoden beschikbaar voor het integreren van de resultaten, zowel numeriek als niet-numeriek. In de literatuur worden verschillende methoden beschreven en wordt ook ingegaan op de voor- en nadelen van de numerieke en niet-numerieke methoden (46). Het RIVM heeft een numerieke methode (18) ontwikkeld die resulteert in een risicogetal (met bijbehorende deviatie om aan te geven of de verschillende Triade onderdelen met elkaar in overeenstemming zijn).

Wanneer de effecten die gevonden worden in de bioassays en ecologische veldinventarisatie verklaard kunnen worden door de chemische analyses is sprake van een milieueffect van de verontreiniging. Als de effecten niet verklaard kunnen worden door de gemeten verontreiniging kan er sprake zijn van een onbekende verontreiniging of effecten door abiotische factoren zoals een lage pH, een hoog organisch stof gehalte of juist een laag organisch stof gehalte.

Een wettelijk kader voor de doorvertaling van de onderzoeksgegevens naar de locatie, bijvoorbeeld via verrekening van het verontreinigde oppervlak, ontbreekt. Het is van essentieel belang om voorafgaand aan het Triade onderzoek met de betrokken actoren en het bevoegd gezag te bepalen welke risicogrenzen gehanteerd worden bij het bepalen en beoordelen van de ecologische risico's en op welke manier de beoordeling plaatsvindt. Ook locatiespecifieke omstandigheden zoals bijvoorbeeld compactie van de bodem moeten bij de beoordeling

worden meegenomen.

Als er na uitvoering van de beperkte Triade (fase 1) onvoldoende zekerheid met betrekking tot de ecologische risico's is dan worden in fase 2 aanvullende testen uitgevoerd (zoals weergegeven in figuur 4.2).

#### 4.4.5 Conclusie volgend uit het Triade onderzoek

Het Triade onderzoek wordt beëindigd met de conclusie of er wel of geen sprake is van onaanvaardbare ecologische risico's. De beslissing wat te doen met de resultaten valt in principe buiten de Triade. Wel kunnen er uiteraard aanbevelingen volgen uit het onderzoek. De beslissing over het omgaan met een bepaalde locatie moet altijd een koppeling zijn tussen de humane, verspreiding en ecologische risico's.

##### *Er zijn onacceptabele risico's aangetoond*

In dat geval dient een saneringsplan te worden opgesteld. Op dit moment ontbreekt een kader voor de doorvertaling van de onderzoeksgegevens van de Triade naar de locatie. Omdat in de Triade (bij voorkeur) wordt vastgesteld welke verontreiniging risicobepalend is, zijn gerichte saneringsmaatregelen mogelijk. Daarbij kan gedacht worden aan ontgraven, maar ook door aangepast bodembeheer of herinrichting kunnen risico's worden weggenomen of verkleind. En omdat in het Triade onderzoek gebruik gemaakt wordt van een concentratiegradiënt, kan een locatiespecifieke terugsaneerwaarde voor de risicobepalende verontreiniging worden vastgesteld.

##### *Er zijn geen onacceptabele risico's aangetoond*

Dit betekent dat sanering niet spoedeisend is. In dat geval kunnen de resultaten van het Triade onderzoek gebruikt worden om een beheerplan op te stellen. Dit beheerplan is gericht op het beheersen en reduceren van ecologische risico's of effecten en moet voorkomen dat in de toekomst alsnog onacceptabele ecologische risico's ontstaan. Zo kan een verandering van het grondwaterpeil, bijvoorbeeld als gevolg van ontwateren, leiden tot een ongewenste toename van de beschikbaarheid van zware metalen. Ook als er niet gesaneerd wordt blijft het dus belangrijk te beseffen dat er wel een verontreiniging aanwezig is waar rekening mee gehouden moet worden in het verdere gebruik en bij de inrichting.

### Regenwormen

Regenwormen leven in de humuslaag of in de grond, en komen voor in dichtheden van circa 60 exemplaren per m<sup>2</sup> in arme grond tot meer dan 500 in vruchtbare bodems, equivalent met ongeveer 50 kg biomassa per ha. Gangen gravend leven zij van (half verteerde) plantenresten, bacteriën en schimmels. Ze bekleden hun gangen met hun humeuze uitwerpselen en zijn daarmee erg belangrijk voor een goede bodemstructuur en de zuurstofvoorziening in de bodem. Bij droogte gaan regenwormen in diapauze (ze rollen zich op) dieper in de grond. Er komen in Nederland circa 25 soorten voor, behorend tot de volgende groepen:

- De mest/compost/strooiseleTERS, die ondiep leven in mest of compost, in de strooisellaag of de humeuze bovenlaag van de bodem. Bij nat weer komen ze ook boven de grond. Algemeen is *Eisenia foetida*, en roodbruine worm van 5 à 10 cm groot, levend in compost en vermolmd hout. Deze wormen hebben een oppervlakkig gangenstelsel.
- De grondbewoners, die niet aan de oppervlakte komen maar dieper (tot 40 cm) in de bodem leven en zich al etend een weg door de bodem graven. Ze komen bijna nooit boven de grond en zijn roze-grijs tot grijs van kleur. Een van de meest voorkomende in vruchtbare gronden is de 5 tot 13 cm grote vleesgrijze



Foto's van achtereenvolgens een strooisellaagbewoner, een grondbewoner en een pendelaar (foto's van R. de Goede, WUR).

### *Aporrectodea caliginosa*.

- De pendelaars, waaronder de grootste wormensoort in Europa de *Lumbricus terrestris*. Volwassen dieren zijn 13 tot 25 cm lang hebben een platte grijze staart en een roze kop. Bij nat weer komen ze boven de grond, en bij droog weer graven ze zich in tot 1 à 2,5 meter diepte. Pendelaars maken vooral verticale gangen en brengen bladmateriaal tot diep in de bodem.

Bodemtype, zuurgraad en vegetatie zijn sterk bepalend voor het voorkomen van soorten. In bosgronden komen andere soorten voor dan in weilanden, tuinen en akkerbouwpercelen. Op arme/zure

gronden komen alleen enkele gespecialiseerde soorten voor.

Regenwormen zijn voor veel andere dieren een belangrijke voedselbron, o.a. voor zangvogels, mollen en spitsmuizen.

Daarnaast komen ook potwormen voor die veel kleiner zijn en wit van kleur. Ook potwormen spelen een belangrijke rol bij de afbraak



Foto van R. de Goede, WUR.

## 5



## Financiële lasten van ecologische risicobeoordelingen

### 5.1 Algemeen

In voorgaande hoofdstukken is aangegeven dat de bodemecologie belangrijk is voor het functioneren van de bodem. We hebben ook gezien dat verontreiniging een negatief effect kan hebben op de bodemecologie.

Om vast te stellen wat de effecten van bodemverontreiniging zijn op de bodemecologie is in hoofdstuk 4 de Triade methodiek beschreven. In 2008-2009 is een brede evaluatie uitgevoerd van tot dan toe in Nederland uitgevoerde Triade onderzoeken, 56 in totaal (13). Een onderdeel van de evaluatie betrof de kosten voor het onderzoek in relatie tot de kosten van een eventueel eerder voorgenomen conventionele sanering. Uit de evaluatie is gebleken dat door de uitvoering van Triade onderzoek veel geld bespaard kan worden als blijkt dat niet of slechts gedeeltelijk gesaneerd hoeft te worden. In dit hoofdstuk gaan we in op de kosten voor het bodemecologisch onderzoek, zowel in tijd als geld en de afweging of conventionele saneringen wel de juiste oplossing bieden.

### 5.2. Kosten

De kosten voor het bodemecologisch onderzoek en het beoordelen van de daadwerkelijke ecologische risico's zijn afhankelijk van de wijze waarop het onderzoek is opgezet en de onderzoeksvragen. Met de wijze waarop het onderzoek is opgezet wordt bedoeld dat een onderzoek stapsgewijs kan worden uitgevoerd en de keuze van de te onderzoeken parameters. Het is evident dat indien meer parameters worden onderzocht, de kosten omhoog gaan (zie hoofdstuk 4). Het is niet mogelijk een standaard bedrag te noemen voor de uitvoering van het onderzoek. Uit de brede evaluatie van uitgevoerde Triade onderzoeken is gebleken dat de kosten variëren tussen € 5.000,- en

€ 400.000,--, met een gemiddelde van € 26.000,-- (waarbij de zeer grote en omvangrijke projecten buiten beschouwing zijn gelaten). In dit hoofdstuk wordt een aantal voorbeelden behandeld waarin wordt aangegeven wat de doelstelling was van het onderzoek, hoe het onderzoek is uitgevoerd, wat de uitkomsten en de kosten waren. Indien mogelijk wordt ook aangegeven wat de kosten van sanering geweest zouden zijn en of de doelstellingen zijn bereikt.

### Ecologische risicobeoordeling en mogelijkheden voor herinrichting

#### Achtergrond:

In de jaren 60 van de vorige eeuw is de locatie opgehoogd met bagerspecie verontreinigd met pesticiden en zware metalen. De locatie is in gebruik als recreatiebos en wordt hierom ook gewaardeerd door omwonenden en gebruikers van de locatie. De locatie heeft een omvang van ruim 40 ha. Er is geen sprake van humane of verspreidingsrisico's. Vastgesteld moest worden of er sprake was van ecologische risico's en wat de mogelijkheden waren voor herinrichting van de locatie met behoud van functie.

#### Onderzoek:

Chemische analyses van grond en in het veld verzamelde regenwormen (bioaccumulatie) zijn uitgevoerd. De volgende bioassays zijn uitgevoerd: Microtox, plantentest met sla (*Lactuca sativa*) en regenwormen (*Eisenia fetida*). Bij het ecologisch deel is de nematodenpopulatie in kaart gebracht. Na afronding van het onderzoek is vastgesteld wat de mogelijkheden waren voor herinrichting met behoud van functie en reductie van ecologische risico's.

#### Uitkomsten:

In de bioassays en ecologische veldinventarisaties zijn geen aanwijzingen gevonden voor het optreden van ecologische effecten ten gevolge van de verontreiniging. Wel bleek er een ernstig risico op doorvergiftiging van pesticiden in de voedselketen. Vooral zangvogels werden hierdoor bedreigd. Daarom is ervoor gekozen door specifieke

inrichting de locatie zo ongeschikt mogelijk te maken voor zangvogels zodat het pad van doorvergiftiging werd afgesneden. Het bevoegd gezag is hiermee akkoord gegaan en de herinrichting heeft plaatsgevonden.

#### Kosten onderzoek

€ 45.000,--.

#### Kosten conventionele sanering:

± € 30.000.000,-- (voor afdekken) tot € 175.000.000,-- (voor afgraven)

### Alternatieve saneringsopties

#### Achtergrond:

Terrein met ecologische waarden verontreinigd met DDT/DDD/DDE, gelegen naast een voormalig bedrijfsterrein. Voorgenomen was de locatie af te graven maar dan gaan de ecologische waarden verloren. Vanuit omwonenden is gevraagd naar alternatieven voor afgraven zodat bestaande gebiedsfunctie behouden kon blijven.

#### Onderzoek:

Op drie deellocaties is onderzoek gedaan, nat weiland, droog weiland en bos. Chemische analyses zijn uitgevoerd op grond en in het veld verzamelde regenwormen (bioaccumulatie). Daarnaast is gekeken naar de effecten van de verontreiniging op het bodemproces nitrificatie. En in de ecologische veldinventarisaties is gekeken naar de invloed van de verontreiniging op de plantengemeenschap, de regenwormenpopulatie, de nematodenpopulatie en de diversiteit en omvang van de overige macro- en mesofauna gemeenschappen (weekdieren, pissebedden, miljoenpoten, duizendpoten, hooiwagens, mijten, spinnen, springstaarten, oorwormen en kevers).

#### Uitkomsten:

De gehalten verontreiniging overschreden de interventiewaarde. Er trad geen bioaccumulatie op. De regenwormen die leven in de top-laag van de bodem en de nematoden ondervonden enige hinder van

de verontreiniging, op de overige soortgroepen was geen effect te zien. Er was geen sprake van ernstige ecologische risico's. Ontgraving van de locatie was niet noodzakelijk. Het bevoegd gezag is akkoord gegaan. De omwonenden waren tevreden met de uitkomsten van het onderzoek.

**Kosten onderzoek**

€ 36.000,--.

**Kosten voorgenomen sanering:**

± € 600.000,--

**Ecologische risico's kleiduivenschietbaan in relatie tot beschermde diersoort**

**Achtergrond:**

Het betreft een kleiduivenschietbaan in de duinen met een oppervlakte van 15 ha. Op de gehele schietbaan zijn loden kogeltjes aangetroffen. Op een deel van de schietbaan zijn daarnaast PAK houdende scherven van kleiduiden aangetroffen. De duinen, inclusief de schietbaan, zijn het leefgebied van een beschermde diersoort (Zandhagedis). Conventionele sanering als afdekken en afgraven verwoest de habitat. Moet er wel gesaneerd worden?

**Onderzoek:**

Chemische analyses zijn uitgevoerd op grond en in het veld verzamelde pissebedden (bioaccumulatie). Bioassays met bacteriën (Microtox) en het bodemproces nitrificatie zijn uitgevoerd. De ecologische veldinventarisatie heeft zich gericht op de nematodenpopulatie. Er is een inschatting gemaakt van de risico's van directe inname van loden kogels door vogels.

**Uitkomsten:**

De loodverontreiniging was op slechts een klein deel van de locatie beschikbaar. De PAK verontreiniging was niet beschikbaar. In de bioas-

says en de nematodeninventarisatie zijn geen correlaties aangetroffen tussen de verontreiniging en eventuele effecten. Wel was sprake van bioaccumulatie van lood op de deellocatie waar lood ook beschikbaar was. Er waren geen risico's voor de beschermde diersoort. Aanbevolen is de deellocatie te saneren (maximaal 5.000 m<sup>2</sup> matige risico's en 35 m<sup>2</sup> ernstige risico's) en het overige deel van de locatie te monitoren. Het bevoegd gezag is hiermee akkoord gegaan.

**Kosten onderzoek:**

€ 22.000,--.

**Kosten conventionele sanering:**

Niet bekend

Resultaten van locatiespecifieke ecologische risicobeoordeling bieden de mogelijkheid om locatiespecifieke beheersopties te ontwikkelen. De resultaten van het onderzoek kunnen direct worden geïntegreerd in herinrichtingsplannen. Er zijn gevallen bekend waarbij het Triade onderzoek heeft gezorgd voor een enorme kostenbesparing doordat niet gesaneerd hoefde te worden op basis van ecologische risico's (zoals vooraf wel was voorspeld middels Sanscrit). Doordat sanering niet noodzakelijk is, wordt ook overlast voorkomen. Verder zijn er locaties bekend waar beschermde plant- en diersoorten aanwezig zijn. Sanering heeft invloed op hun leefgebied. Wanneer op basis van bodemecologisch onderzoek blijkt dat sanering niet noodzakelijk is, kunnen leefgebieden behouden blijven. Op veel locatie blijkt uit Sanscrit gebleken dat er risico's aanwezig zijn. In de praktijk betekent dat vaak dat er voorlopig geen acties worden ondernomen en dat de ontwikkelingen stil blijven liggen. Door uitvoering van de Triade worden onzekerheden met betrekking tot de aanwezigheid van risico's weggenomen en worden ontwikkelingen weer vlot getrokken (13). Met andere woorden, door geld uit te geven aan bodemecologisch onderzoek kan veel geld bespaard worden op de sanering en kunnen leefgebieden voor bedreigde plant en diersoorten behouden blijven.

### 5.3 Tijdsduur

Zoveel locaties, zoveel onderzoeken. Het uit te voeren ecologisch onderzoek is altijd locatie specifiek en hangt dus af van locatie specifieke omstandigheden, de aanwezige verontreiniging, de onderzoeksvragen en de uiteindelijke doelstelling voor de locatie. Een richtlijn voor een tijdsduur is daarmee evenmin te geven als een richtlijn voor de kosten. Een eenvoudig eerstelijns onderzoek kost tenslotte minder tijd dan wanneer het onderzoek in verschillende vervolgfases wordt uitgevoerd waarbij in iedere fase aanvullende, vaak steeds langdurigere, testen worden uitgevoerd.

Gemiddeld kan een eerste laag onderzoek (zoals beschreven in hoofdstuk 4) binnen 4 tot 8 weken worden uitgevoerd. Als aanvullende testen noodzakelijk zijn moet rekening gehouden worden met een verlenging van het project met 10 tot 20 weken. Per onderzoeksfase moet rekening gehouden worden met een verlenging van het project.

Daarnaast is de tijdsduur van het onderzoek ook nog afhankelijk van het jaargetijde. In de winter is het niet mogelijk macrofauna analyses in de bodem uit te voeren of om regenwormen te verzamelen voor bioaccumulatie onderzoek. De beste tijd hiervoor is het voorjaar en de zomer.

### 5.4 Saneren, is dat wel ecologisch verantwoord?

Als op basis van een bodemecologisch onderzoek is vastgesteld, dat een locatie inderdaad met spoed moet worden gesaneerd vanwege onaanvaardbare ecologisch risico's, is het de vraag hoe die sanering dan zou moeten worden uitgevoerd. Omdat het veelal om grootschalige locaties gaat met diffuse bodemverontreiniging, ligt vervanging van de verontreinigde contactzone of het opbrengen van een leeflaagconstructie het meest voor de hand. Maar het opbrengen van een leeflaag of afgraven van de verontreinigde laag is ongunstig voor het al aanwezige bodemecosysteem. Dit kan hierdoor verdwijnen. Is dat wel de bedoeling en hoe moeten we het op de lange termijn zien? De natuur herstelt zich altijd weer of er wordt een nieuw evenwicht gevormd. Het kost alleen tijd. Bovendien zijn er alternatieven voor het traditionele afgraven en afdekken zoals bijvoorbeeld stimuleren van de biologische afbraak.

Of saneren om ecologische redenen zinvol is, wordt sterk bepaald door de bodemfunctie van een locatie. Hieraan gekoppeld zijn het belang van natuurwaarden ten opzichte van andere belangen en het natuurwensbeeld, zover relevant. Op een industrieterrein zijn natuurwaarden meestal (maar niet altijd!) van ondergeschikt belang maar in een natuurgebied is het natuurwensbeeld bij uitstek bepalend. Over het belang van natuurwaarden in het stedelijk gebied lopen de meningen uiteen.

Hieronder staan twee voorbeelden van locaties in natuurgebieden, waar op basis van natuurdoelstellingen is beoordeeld of uitvoering van ingrijpende sanerende maatregelen wel wenselijk is.

#### Het plan Goudplevier

In Drenthe heeft Natuurmonumenten alle landbouwgronden opgekocht tussen verschillende kleine natuurgebiedjes in om er een groot heidegebied van te maken, een landschap dat in de 19<sup>e</sup> eeuw nog volop te vinden was op de zandgronden van oost en zuid Nederland. Alleen is door de jarenlange landbouw de grond veel te veel verrijkt met nutriënten. Bij nietsdoen veranderen de voormalige landbouwgronden in een droog ruig distelgrasland, waarvan weliswaar veel dieren profiteren maar wat niet lijkt op het zo gewenste grote heide-terrein.

Er is daarom besloten op alle aangekochte landbouwgronden de voedselrijke bodemlaag af te graven tot op het onderliggende kale zand en de grond af te zetten op landbouwpercelen rondom het gebied, die daarmee kunnen worden opgehoogd en beter ontwaterd. Een grote kale zandvlakte met vennen, natte plekken en droge koppen resteert, waar de natuur opnieuw mag beginnen. Er komen al snel heideplantjes op en alles lijkt goed te gaan. Her en der keren zelfs zeldzame planten terug, kenmerkend voor natte heidevelden.

Maar hoe gaat het met de bodemfauna? De ontwikkelingen lijken niet hoopvol. Zeldzame kevers, spinnen en andere bodemdieren laten zich nog niet zien in de nieuwe natuur. En wanneer het wel gaat gebeuren



blijft onduidelijk! Het is afwachten wat de toekomst brengt. Of moeten we het bodemleven dan toch maar een handje gaan helpen, door heideplaggen in te brengen van de kleine natuurgebiedjes, waarmee het begonnen is?

### Moet die oude vuilstort weg uit natuurgebied 't Waaltje?

Bij Brielle ligt in een oude kreek een klein maar prachtig veengebiedje, met een zeldzame flora en fauna, zeker voor een zeekleipolder in zuid-west Nederland. Helaas is in dit gebiedje in de vorige eeuw huisvuil gestort. Het gebied was naar de maatstaven van toen onbruikbaar voor landbouwdoeleinden: te nat, te voedselarm. Door het op te hogen met huisvuil kon er misschien toch nog bruikbare landbouwgrond van worden gemaakt.

Inmiddels zijn de inzichten sterk gewijzigd en wordt betreurd dat er in een dergelijk bijzonder voedselarm laagveengebiedje een stortplaats aanwezig is. Zou deze smet niet zo snel mogelijk moeten worden verwijderd, met andere woorden afgegraven moeten worden?

Dit lijkt een goede oplossing maar is bij nader inzien toch niet zo'n goed idee. De graafmachines en vrachtauto's die dan het reservaat in moeten, richten zoveel schade aan in het resterende laagveen en aan de waterhuishouding van het gebiedje, dat het middel erger is dan de kwaal. Bovendien blijken zich nu juist in de overgangszone van stortlichaam naar resterend veen oppervlak de meest bijzondere soorten voor te komen, waaronder zeer zeldzame en strikt beschermde orchideeënsoorten. Zoals gewoonlijk zijn de plekken, waar voedselarme en voedselrijke milieus elkaar treffen, botanisch het meest interessant. Beter is het om niets te doen en het gebied te laten zoals het is. Overwogen kan wel worden het maaibeheer te verbeteren en delen van het stort handmatig af te dekken met schone veengrond. Maar dit laatste is erg duur en maar beperkt effectief.

Saneren op de conventionele manier, dus afgraven of afdekken, is lang niet altijd in het belang van het ecosysteem in zijn geheel en het bodemecosysteem in het bijzonder. Er moet altijd een afweging gemaakt worden tussen enerzijds de risico's die worden weg genomen door het verwijderen van de verontreiniging of het afdekken van de verontreiniging en anderzijds de affecten die de sanering heeft op de betreffende locatie en de omliggende percelen.

### Mollen

Mollen zijn de enige echte bodembewonende zoogdieren. Ze leven vooral van regenwormen en in mindere mate ook van duizendpoten, naaktslakken en insectenlarven. Mollen hebben twee sterk ontwikkelde graaf(voor)poten. Ze zijn daarmee goed aangepast aan het leven onder de grond, waar uitgebreide gangenstelsels gegraven worden. Onder de grond maken ze ook een nestkamer. Ze leven solitair in eigen territoria. Van februari tot april verlaten de mannetjes hun territorium en zoeken ze een partner om te paren. Ze graven dan soms gangen van meer dan 200 meter lengte tot in territoria van mollen in de buurt. Na de paring wordt het mannetje weer verjaagd. Ongeveer acht weken na de geboorte worden ook de jongen verjaagd uit het territorium van de moeder.

Door de grote hoeveelheden grond, die ze verplaatsen bij het graven van gangen, leveren mollen een grote bijdrage aan een losse doorlatende bodemstructuur en daarmee aan de bodemvruchtbaarheid. Daarnaast zijn ze een van de belangrijkste natuurlijke vijanden van regenwormen, die als hoofdvoedsel op het menu staan.

Door hun gegrave zijn mollen weinig geliefd in (stads)tuinen, op sportvelden en golfbanen. Ze worden daar actief bestreden met mollenklemmen of gif. Als een van de weinige zoogdieren is de mol sinds 2005 niet meer beschermd.



Foto: Jaap Bloem,  
Wageningen universiteit



## De toekomst van bodemecologisch onderzoek

### 6.1 Het belang van bodemecologisch onderzoek

In de komende jaren zullen er steeds meer bodemecologisch onderzoeken (Triade) worden uitgevoerd, om een aantal redenen:

- sinds 2006 heeft onderzoek volgens de Triade systematiek beleidsmatig een plek gekregen in de Circulaire bodemsanering;
- in stap 2 van de risicobeoordeling blijken teveel locaties/gevallen ecologisch spoedeisend te zijn, vooral sinds de integrale beoordeling op basis van “toxische druk” in plaats van per individuele stofnorm, zodat stap 3 al snel moet worden uitgevoerd als ecologie relevant wordt geacht;
- de druk om meer bodemecologisch onderzoek te doen, wordt verder vergroot door de beleidsdoelstelling voor 2015 alle ecologisch spoedeisende locaties in beeld te hebben en door aanvullende zorgvuldigheidseisen van de Raad van State in het kader van bezwarenprocedures tegen beschikkingen in het kader van de Wet bodembescherming op (ecologisch) spoedeisendheid.

Als gevolg van al dit onderzoek neemt ook de kennis over het bodemecosysteem toe, niet alleen in natuur/recreatie- en landbouwgebieden, maar ook in het stedelijke gebied. Hierdoor kan de ecologische normstelling in de komende jaren verder worden verfijnd.

Met het effect van zuurgraad en beschikbaarheid is in de normstelling tot nu toe nog nauwelijks rekening gehouden. Het gevolg is dat de ecologische bodemnormen redelijk accuraat de effecten weergeven in arme zure bodems, zoals deze in bijvoorbeeld de Kempen worden aangetroffen, maar de effecten in jonge voedselrijke bodems sterk overschat. Het gaat dan bijvoorbeeld om stedelijke ophooglagen, de regelmatig bemeste en bekalkte landbouwgronden, en de veenrijke toemaakdekken. In deze bodems is de beschikbaarheid veelal laag en de pH licht zuur tot basisch (6 à 8). Ecologische effecten van bodemverontreiniging zijn in dit soort bodems nauwelijks waarneembaar.

## 6.2 Nieuwe ontwikkelingen

Met de toename van het ecologisch onderzoek in Nederland, neemt ook het belang van monitoring van de ecologie toe. Daarbij is niet alleen de bodemecologie op zichzelf belangrijk maar ook andere componenten in de bodem, zoals de verontreiniging maar ook de bodemstructuur en het bodemgebruik. In tabel 6.1 is een voorzet gemaakt voor hoe een dergelijke monitoring eruit zou kunnen zien en wat de belangrijkste parameters zijn (7).

Voor veel van de in tabel 6.1 genoemde monitoringsparameters zijn of worden al instrumenten ontwikkeld. Zo is op basis van alle bodem-ecologische onderzoeksprojecten in Nederland verricht tot 1987 de Bodembioologische Indicator ontwikkeld. Voor standaard situaties, gekoppeld aan verschillende vormen van bodemgebruik (akkerbouw, melkveehouderij, half natuurlijk grasland, heide, gemengd bos, stadspark) en diverse grondsoorten (zand, löss, klei, veen), zijn er bodem-bioologische referenties ontwikkeld voor alle belangrijke soortgroepen in het bodemecosysteem, waarbij is gekeken naar activiteit, aantallen soorten, dichtheden, biodiversiteit, zuurgraad van de bodem, humus- en lutumgehalte, en beschikbaar fosfaat. Door het meetresultaat van een locatie te vergelijken met de het meest hierop lijkende referentie-situatie, kan worden beoordeeld of er sprake is van een (negatief) effect op het bodemecosysteem als gevolg van stressfactoren als bodemverontreiniging, vergraving, ophoging, verdichting, etc. Ook komen er nieuwe technieken beschikbaar waarmee inzicht wordt verkregen in de bodemecologie enerzijds en de verstoring daarvan anderzijds zoals biochips, waarmee de functionele eigenschappen van bacteriepopulaties in de bodem snel en tegen relatief geringe kosten in kaart kunnen worden gebracht. Juist van deze belangrijke soort-groep in de bodem is nog relatief weinig bekend. Op termijn kunnen daarmee ook biologische referenties voor bacteriepopulaties in schone en verontreinigde bodems worden ontwikkeld. Daarnaast moeten ook de biologische referenties voor bodemdieren en nematoden verder worden verfijnd, onderbouwd en uitgewerkt. Vooral voor het stedelijke gebied zijn nog relatief weinig data beschikbaar en is de kennis nog beperkt. Het uitvoeren van bodemecologisch onderzoek leidt daarmee niet alleen tot maatschappelijke baten op het niveau van een locatie of

**Tabel 6.1**

*Monitoring van het bodemecosysteem (7)*

Belangrijke processen	Monitoring
Veranderingen in organisch stof gehalte	Mineralisatie van organisch stof
Bodemstructuur	Bodemopbouw Indrukweerstand Poriënvolume bodem Hydrologie Samenstelling/dikte strooisellaag
Diversiteit in soorten	Fauna diversiteit in de bodem Mycorrhiza Voedselketen en structuur van het voedselweb Populatie structuur en opbouw
Functionele diversiteit	Indexen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maturity Index (2-5) nematoden</li> <li>• Ratio schimmels/bacteriën</li> <li>• Oligotrofe<sup>1</sup>/copiotrofe<sup>2</sup> organismen</li> <li>• Biomarkers</li> </ul>
Microbiologische transformatie	Bodemademhaling Bacteriële groeisnelheid
Sorptie van verontreinigingen	Extraheerbaar (beschikbaar) gehalte verontreiniging in bodem
Opname van verontreinigingen in planten en dieren	Totaal gehalte verontreiniging in organismen Gehalte verontreiniging in organen van organismen
Nutriënten recycling	Nitrificatie Stikstofvastlegging

<sup>1</sup> Oligotrofe organismen: organismen die leven in systemen met weinig voedingsstoffen.

<sup>2</sup> Copiotrofe organismen: organismen die alleen kunnen leven in systemen met veel (oplosbaar) koolstof.

geval (meer precieze bepaling ecologische risico's), maar ook tot kennisontwikkeling over bodemecosystemen in zijn algemeenheid. Het toepassen van landelijk genormeerde methodes als de Triade, bioassays en in de toekomst mogelijk ook biochips, zorgt ervoor dat resultaten worden verkregen, die onderling goed te vergelijken zijn.

## 7



## Benutten versus beschermen

Nederland is een dichtbevolkt land. Dit geeft veel druk op het ruimtegebruik. Niet alleen bovengronds maar ook ondergronds. In hoofdstuk 1 zijn de verschillende vormen van bodemgebruik, de bodemfuncties en de ecosysteemdiensten van de bodem al beschreven. Uit dit cahier is wel gebleken dat de bodem belangrijk is voor ons en dat we hier dus zuinig op moeten zijn. We moeten bewust met de bodem omgaan. Er zijn verschillende voorbeelden bekend van bewust bodemgebruik. Denk bijvoorbeeld aan milieuvriendelijke akkerranden. In plaats van bestrijdingsmiddelen wordt gebruik gemaakt van de lieveheersbeestjes, sluipwespen en andere insecten die voorkomen in de akkerranden voor het bestrijden van bladluis op de akkers.

De bodem biedt een schier onuitputtelijke bron van mogelijkheden voor de samenleving. De bodem kan bijdragen aan het verminderen van de klimaatproblemen, het inrichten van onze steden en het landelijk gebied. Bovendien kan de bodem ons veel vertellen over de ontstaansgeschiedenis van zowel ons landschap als onze cultuur. Maar vergeet ook niet dat in de bodem een onbetaalbare schat aan bodemleven aanwezig is. Zo komen verschillende uitvindingen uit de bodem, bijvoorbeeld antibiotica, geur en smaakstoffen, hulpstoffen voor wasmiddelen en papierindustrie en ga zo maar door.

De bodem biedt voor ons mensen dus veel kansen. Maar de bodem moeten we ook beschermen. Hoe gaan we om met dit dilemma van benutten enerzijds en beschermen anderzijds? Vooralsnog is het een uitdaging om benutten en beschermen samen te laten gaan. Wij als gebruikers van de bodem hebben de plicht de bodem te beschermen maar deze bescherming mag niet remmend werken op het benutten van de kansen. Een pasklare oplossing is er niet. Belangrijk is dat we bij het gebruiken van de bodem er ons bewust van zijn hoe belangrijk de bodem is en dat we ons te allen tijden moeten blijven afvragen of we bewust omgaan met de bodem. Denk hierbij in kansen, niet in belemmeringen.

## Literatuurlijst

1. Leenaers H., De aarde voor in je binnenzak, Fontaine uitgevers, 2008.
2. Keuning S., J. van Wensem, P. Lamberigts, Bodemspiegel, Nederland ontdekt de bodem, Bewust bodemgebruik, 2008.
3. Advies Duurzamer bodemgebruik op ecologische grondslag, TCB A33, 2003
4. Typering van bodemecosystemen, Rutgers et al., RIVM 607604007/2005
5. Typering van bodemecosystemen in Nederland met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit, M. Rutgers, C. Mulder, A.J. Schouten, RIVM 607604008/2007
6. P. Doelman. Spoorboekje. Dienstregeling ecologische bodemkwaliteit 13 februari 2007 t/m 14 augustus 2015
7. P. Doelman & Herman Eijsackers (Red.) Vital Soil. Function, value and properties.2004. Developments in Soil Science - Volume 29. Elsevier.
8. Atlas, R.M. & R. Bartha. Microbial Ecology: Fundamentals and Applications. 1987. The Benjamin/Cummings Publishing Company
9. SKB Cahier. Natuurlijke Afbraak: het is niet niks!
10. SKB Cahier. Gestimuleerde afbraak.
11. SKB Cahier. Zware metalen
12. Vijver M., The Ins and outs of bioaccumulation. Metal bioaccumulation kinetics in soil invertebrates in relation to availability and physiology, 200
13. SKB rapport PTS808. 2008. Evaluatie van de toepassing van TRIADE bij het beoordelen van ecologische risico's. (concept).
14. NEN 5737:2009. Bodem-landbodem proces van locatiespecifieke ecologische risicobeoordeling van bodemverontreiniging (concept).
15. Cuypers C., Grotenhuis T., Joziase J., Rulkens W. 2000. Rapid Persulphate oxidation predicts PAH availability in soils and sediments. *Environ. Sci. Tech.* 34, 2057-2063.
16. Durand-Huizing A.M., Witteveen+Bos, Optimal Modelling for Ecotoxicological Assessment versie 5.0, augustus 2004, RIZA werkdokument 2004.132X, changed, version 6.0, July 2006, F.P. van den Ende, RWS RIZA
17. Lijzen J., A. Baars, P. Otte, M. Rikken, F. Swartjes, E. Verbruggen, A. van Wezel, Technical Evaluation of the Intervention Values for Soil/sediment and groundwater, RIVM rapport 711701023/2001.
18. Mesman M., A. Schouten, M. Rutgers, E. Dirven-van Breemen. 2007. Handreiking TRIADE: Locatiespecifiek ecologisch onderzoek in stap 3 van het Saneringscriterium. RIVM 711701068/2007.
19. Rutgers M., J. Faber, J. Postma, H. Eijsackers, Locatiespecifieke ecologische risico's: een basisbenadering voor functiegerichte beoordeling van bodemverontreiniging, PGBO deel 16, 1998.
20. Rutgers M., A. Schouten, E. Dirven, P. Otte, M. Mesman. 2005. Naar een richtlijn voor locatiespecifieke ecologische risicobeoordeling met de TRIADE. Bilthoven. RIVM 711701038/ 2005.
21. Rutgers, M, M. Mesman, P. Otte. 2004. TRIADE. Instrumentarium voor geïntegreerde ecotoxicologische beoordeling van bodemverontreinigingen. RIVM.
22. Rutgers, M., C. Mulder, A. Schouten, J. Bogte, A. Breure, J. Bloem, G. Jagers op Akkerhuis, J. Faber, N. van Eekeren, F. Smeding, H. Keidel, R. de Goede, L. Brussaard, Typering van bodemecosystemen, Duurzaam bodemgebruik met referenties voor biologische bodemkwaliteit, RIVM rapport 607604007/2005.
23. Schouten, A., J. Bloem, A. Breure, W. Didden, M. van Esbroek, P. de Ruiter, M. Rutgers, H. Siepel, H. Velvis, Politproject Bodembiologische Indicator voor Life Support Functies in de bodem, RIVM rapport 607604001/2000.
24. Leece D.R., G.K.C. Low, M.S. Warne, T.M. Manning, J.C. Chapman, K. Koop. 2000. Opportunities for expanded use of soil plant and water analysis in environmental management, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31-2185-2200.

25. Wal, L. van der, 2003. Bioavailability of organic contaminants in soil: solid-phase microextraction predicts uptake in *Oligochaetes*. IRAS, Utrecht University, Utrecht.
26. NEN 5704: Bodem. Monstervoorbehandeling van grond. Extractie met een calciumchloride oplossing (0,01 mol/l). 1996
27. B. Boots, L. Brussaard, 2006, Biodiversiteit van de bodem; wat hebben we eraan? Een schets van de mogelijkheden voor Functionele Agro-biodiversiteit in de bodem, Wageningen UR / Provincie Zuid-Holland / Ministerie VROM, Wageningen/ Den Haag ([www.soq.wur.nl/nl](http://www.soq.wur.nl/nl)).
28. Ministerie van VROM, 27 september 2007, Wet Bodembescherming, laatste gewijzigde versie, SDU-uitgeverij, Den Haag.
29. Ministerie van VROM, 3 december 2007, Besluit Bodemkwaliteit, Staatsblad 2007, nr. 469, SDU-uitgeverij, Den Haag.
30. Ministerie van VROM, 13 december 2007, Regeling Bodemkwaliteit, Staatscourant 2007, nr. 247, SDU-uitgeverij, Den Haag.
31. Ministerie van VROM, 10 juli 2008, gewijzigde Circulaire Bodemsanering 2006, Staatscourant nr. 131, pag. 23, SDU-uitgeverij, Den Haag.
32. Ministerie van VROM, 22 januari 2009, Convenant bodemontwikkelingsbeleid en aanpak spoed-locaties, concept nr. 10, Den Haag.
33. L. Posthumus, r. Westerhof, A. Wintersen, P.F. Otte, S. Lukács, 2008, Kijk op de Risicotoolbox Bodem; Beoordelen van de actuele bodemkwaliteit en kiezen van Lokale Maximale Waarden, RIVM, Bilthoven (rapport 711701082/2008).
34. J. Wezenbeek, 12 september 2008, NOBO: Normstelling en bodemkwaliteitsbeoordeling; Onder-bouwing en beleidsmatige keuzes voor de bodemnormen in 2005, 2006 en 2007, definitief, in opdracht van het Ministerie van VROM, Grontmij, Houten (NOBO-2008-029).
35. W.L.M. Tamis, M. van't Zelfde & R. van der Meijden. Juli 2003. Effecten van klimaatveranderingen op planten in Nederland. *Gorteria*, 29-4;
36. T. Denters. De Flora van het urbaan district. 1999. *Gorteria*, 25-4;
37. T. Denters. Stadsplanten. Veldgids voor de stad. 2004. Fontaine Uitgevers;
38. Bohemen, H. van, Stadsecologie van muurbloem tot straatmadelief, Nederlandse natuurhistorische vereniging, 1995
39. Chrispijn R., Champignons in de Jordaan, Fontaine Uitgevers BV, 1999
40. Sijsjes en Drijfsijsjes, Uitgeverij Schuyt, 1996.
41. Bodem, tijdschrift over duurzaam bodembeheer, themanummer: Bodem en biodiversiteit. Jaargang 18, nummer 4, augustus 2008.
42. Doelman, P., Bodem en Biodiversiteit, 2008.
43. Bongers, T., De nematoden van Nederland, Stichting uitgeverij van de Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, 1988.
44. Waarde van der. J.J., J.G.M. Derksen, A.F. Peekel, J. Bloem, H. Siepel, Risicobeoordeling van bodemverontreiniging met behulp van een Triade benadering met chemische analyses, bioassays en biologische veldinventarisaties, Nobis 98-1-28 (2000)
45. Cuypers C., Bioavailability of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in soils and sediment. Prediction of bioavailability and characterization of organic matter domains, 2001, Wageningen Universiteit.
46. McDonald, B.G., A.M.H. deBruyn, B.G. Wernick, L. Patterson, N. Pellerin, P.M. Chapman. Design and application of a transparent and scalable weight of evidence framework: an example from Wabamun Lake, Alberta, Canada. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 3:476-483, 2007.
47. Peekel A.F., P. Doelman, Nematoden, graadmeters voor bodemvervuiling. *Natuur en Techniek*, 67(9), 6-15, 1999.
48. Cornelissen, G., Mechanism and consequences of slow desorption of organic compounds from sediments, 1999, Universiteit van Amsterdam.
49. Tamis W.L.M., W-R.C. van Esch, H.J. de Graaf, G.R. de Snoo. Ecosysteemdiensten optimaal benut, een gebiedsgerichte uitwerking. CML report 180, 2008.

#### Websites

1. [www.risicotoolboxbodem.nl/sanscrit](http://www.risicotoolboxbodem.nl/sanscrit)
2. [www.risicotoolboxbodem.nl](http://www.risicotoolboxbodem.nl)
3. [www.soq.wur.nl/nl](http://www.soq.wur.nl/nl)
4. <http://eussoils.jrc.europe.eu>
5. [www.bureaustadsnatuur.nl/publicaties](http://www.bureaustadsnatuur.nl/publicaties)
6. Platform Bodemleven, [www.skbodem.nl](http://www.skbodem.nl)
7. [www.veldwerk nederland.nl](http://www.veldwerk nederland.nl)

**Colofon****Auteurs**

Marlea Wagelmans  
Anton Roeloffzen

*Bioclear  
DCMR*

**Lezersgroep**

Pieter Dols  
Cynthia Ottenhof  
Jessica Thomas  
Chis van Schalm  
Frits de Jong  
Ronald Cornellisse

*Arcadis  
Witteveen en Bos  
Wareco  
NIPA milieuconsultancy bv  
Milieudienst West-Holland  
Gemeente Tilburg*

**Met dank aan**

Peter Doelman

*Doelman advies*

*Vormgeving*

*Van Lint Vormgeving, Zierikzee*

*Druk*

*Quantes, Rijswijk*

*Beeldmateriaal*

*Bioclear  
Van Lint Vormgeving*

November 2009