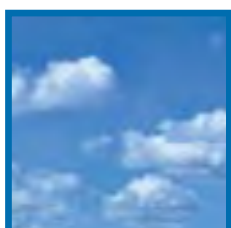
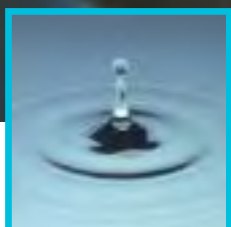




VLAAMSE MILIEUMAATSCHAPPIJ



Milieurapport Vlaanderen MIRA

Themabeschrijving Bodemkwaliteit

Milieurapport Vlaanderen

MIRA

Themabeschrijving Bodemkwaliteit



Auteur

Stijn Overloop, MIRA, VMM

Laatst bijgewerkt: *april 2014*

Woord vooraf

De doelstellingen van MIRA (Milieurapport Vlaanderen) zijn drieledig: (1) de wetenschappelijke basis verschaffen voor het Vlaamse milieubeleid, (2) het maatschappelijk draagvlak versterken door het verhogen van het milieu-inzicht en (3) de Vlaamse kennisbasis afstemmen op internationale standaarden. Het document Themabeschrijving wil bijdragen aan deze doelstellingen door het ter beschikking stellen van een kernachtige en toegankelijke beschrijving van de milieuthema's die door MIRA behandeld worden. Deze informatie moet de gebruiker de nodige achtergrondinformatie verschaffen bij de raadpleging van de milieu-indicatoren.

De beschrijving is gestructureerd volgens de zogenaamde milieuverstoringsketen of DPSI-R keten die de oorzaak en de gevolgen van de milieuverstorenngen in beeld brengt. DPSI-R staat voor Driving Forces (maatschappelijke activiteiten), Pressure (druk), State (toestand), Impact (gevolgen) en Response (beleidsrespons). Het document bevat zoveel mogelijk de laatste stand van zaken van de wetenschappelijke kennis.

Bronvermelding bij overname informatie

Overname van informatie uit dit document wordt aangemoedigd mits bronvermelding.

Hoe citeren?

Kort: MIRA Themabeschrijving Bodemkwaliteit (www.milieurapport.be)

Volledig: MIRA (2013) Milieurapport Vlaanderen, Themabeschrijving Bodemkwaliteit. Overloop S., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieurapport.be

Inhoudsopgave

1 Afbakening van het thema bodemkwaliteit	7
1.1 Bodemeigenschappen	8
1.2 Bodemkwaliteit en bodemfuncties	9
1.3 Bodemverstoringen	10
1.3.1 Organische stof	10
1.3.2 Erosie	10
1.3.3 Grondverschuivingen	10
1.3.4 Bodemverdichting	11
1.3.5 Verdroging	11
1.3.6 Verzilting	12
1.3.7 Bodemafdichting	12
1.3.8 Bodemverontreiniging	12
1.4 Beleid	12
2 Organische stof in de bodem	14
2.1 Mechanismen	14
2.1.1 Wat is organische stof in de bodem?	14
2.1.2 Beschrijving van de verstoring	14
2.1.3 Belang van organische stof in de bodem	14
2.1.4 Opbouw en afbraak van bodemorganische stof	16
2.2 Maatschappelijke activiteiten en gevolgen	17
2.2.1 Maatschappelijke activiteiten	17
2.2.2 Gevolgen	18
2.3 Verbanden met andere thema's	19
2.3.1 Andere bodemthema's	19
2.3.2 Vermesting en verzuring	19
2.3.3 Klimaatverandering	19
2.4 Maatregelen	20
3 Erosie	23
3.1 Mechanismen van bodmerosie en sedimentaanvoer	23
3.1.1 Watererosie	23
3.1.2 Bewerkingserosie	25
3.1.3 Bodemverlies door het rooien van gewassen	26
3.2 Gevolgen van erosie	26
3.2.1 Verlies aan bodemkwaliteit	26
3.2.2 Verlies aan archeologisch en landschappelijk patrimonium	27
3.2.3 Sedimentaanvoer naar Vlaamse waterlopen	27
3.2.4 Belasting van oppervlaktewater met nutriënten en contaminanten	27
3.3 Maatregelen	27
3.3.1 Teelttechnische maatregelen in de landbouw	28
3.3.2 Erosiebestrijdingswerken	29
3.3.3 Landinrichtingsmaatregelen	29
3.3.4 Geïntegreerde aanpak	30
4 Bodemverdichting	31
4.1 Mechanismen van bodemverdichting	31
4.1.1 Beschrijving van de verstoring	31
4.1.2 Meting van de verstoring	32
4.2 Maatschappelijke activiteiten en gevolgen	35
4.2.1 Maatschappelijke activiteiten en oorzaken	35
4.2.2 Gevolgen	36
4.3 Maatregelen	36

5 Biodiversiteit in de bodem	38
5.1 Mechanismen	38
5.1.1 Beschrijving van de bodembiodiversiteit en functies	38
5.1.2 Meting van de bodembiodiversiteit	40
5.2 Maatschappelijke activiteiten en oorzaken	40
5.3 Maatregelen: hoe kan de verstoring hersteld worden?	41
6 Bodemafdichting	43
6.1 Mechanismen	43
6.1.1 Begrippen	43
6.1.2 Beschrijving en oorzaken van de verstoring	46
6.2 Gevolgen van bodemafdichting	47
6.3 Maatregelen	47
6.3.1 Bodemafdichting beperken	48
6.3.2 Gevolgen van bodemafdichting verzachten	48
6.3.3 Bodemafdichting compenseren	48
7 Bodemverontreiniging	50
7.1 Mechanismen	50
7.1.1 Begrippen	50
7.1.2 Bodemverontreiniging door puntbronnen	50
7.1.3 Diffuse bodemverontreiniging	51
7.1.4 Verspreiding van de verontreiniging en blootstelling	52
7.2 Maatschappelijke activiteiten, druk en gevolgen	53
7.2.1 Verontreinigende stofsoorten in Vlaanderen	53
7.2.2 Gevolgen van bodemverontreiniging	54
7.3 Maatregelen en beleidsinstrumenten	54
7.3.1 Lopend beleid	54
7.3.2 Kostprijs van een bodemsanering	55
Referenties	57
Lijst met relevante websites	61
Begrippen	61
Afkortingen	62

Lijst met figuren

Figuur 1: Bodemkwaliteit en de verschillende schakels in de DPSIR keten	8
Figuur 2: Cyclus van bodemorganische stof	16
Figuur 3: De koolstofcyclus	20
Figuur 4: Illustratie van de meest voorkomende bodemerosieprocessen door water	24
Figuur 5: Illustratie van het principe van bewerkingserosie: zowel bij het bewerken in hellingop- en hellingafwaartse richting als bij het bewerken volgens de hoogtelijnen is de verplaatsing in hellingafwaartse zin groter dan in hellingopwaartse zin	25
Figuur 6: Beperking van de wortellengte en toename aan erosie door diepe verdichting van de bodem	31
Figuur 7: Visuele voorstelling van structuurelementen voor een klei-, leem- en zandtextuur - bovenaan: 'goede' structuur: afgerond blokkige elementen - onderaan: 'slechte' structuur: scherpblokkige elementen	33
Figuur 8: Gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen uitgedrukt als de berekende waarde van de structurele sterkte bij pF 2,5 (drogere grond) van het meest waarschijnlijke horizont per kaarteenheden waardoorheen het 41 cm-dieptevlak loopt	34
Figuur 9: Risicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een typische tractorband (480/80R42), die de structurele sterkte uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 2,5 (drogere grond) op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt	34
Figuur 10: Visualisatie van het bodemvoedselweb	39
Figuur 11: Conceptuele overgang van 'verstedelijking' tot 'afdeling'	45
Figuur 12: De 3 componenten van 'schaal'	46

Lijst met tabellen

Tabel 1: Technieken voor het verhogen van het organische stofgehalte in de bovenste bodemlagen	21
Tabel 2: Terminologie rond het thema 'Bodemafdeling'	44
Tabel 3: Overzicht van de blootstellingswegen bij bodemverontreiniging	53

1 | Afbakening van het thema bodemkwaliteit

Dit document behandelt de milieuverstoringen in het milieucompartiment bodem. Dit document is grotendeels gebaseerd op het MIRA-achtergronddocument Bodem (2011).

De bodem in dit document is afgebakend als de bovenste laag van de aardkorst en namelijk die laag van de aardkorst die door planten beworteld is, of waarin zich bodemvormende processen afspelen. Daarnaast staan de milieucompartimenten lucht en water, die in andere MIRA milieuthema's behandeld worden. Waterbodem maakt deel uit van het milieuthema Kwaliteit oppervlaktewater. Grondwater komt aan bod in de MIRA milieuthema's Waterkwantiteit, Vermesting, Verspreiding van pesticiden en andere stofgerichte thema's.

De bescherming van de bodem is een thema dat de Vlaamse overheid meeneemt in haar milieu- en landbouwbeleid. Op Europees niveau is een thematische strategie voor bodembescherming ontwikkeld, waaruit op termijn een kaderrichtlijn bodem kan voortkomen. De bescherming van de bodem was een van de thematische strategieën in het 6^e Europese milieuactieprogramma (2002-2012).

Deze inleiding geeft een overzicht van het volledige thema bodemkwaliteit. Volgende bodembedreigingen/aantasting of milieuverstoringen komen aan bod in de hoofdstukken na deze inleiding:

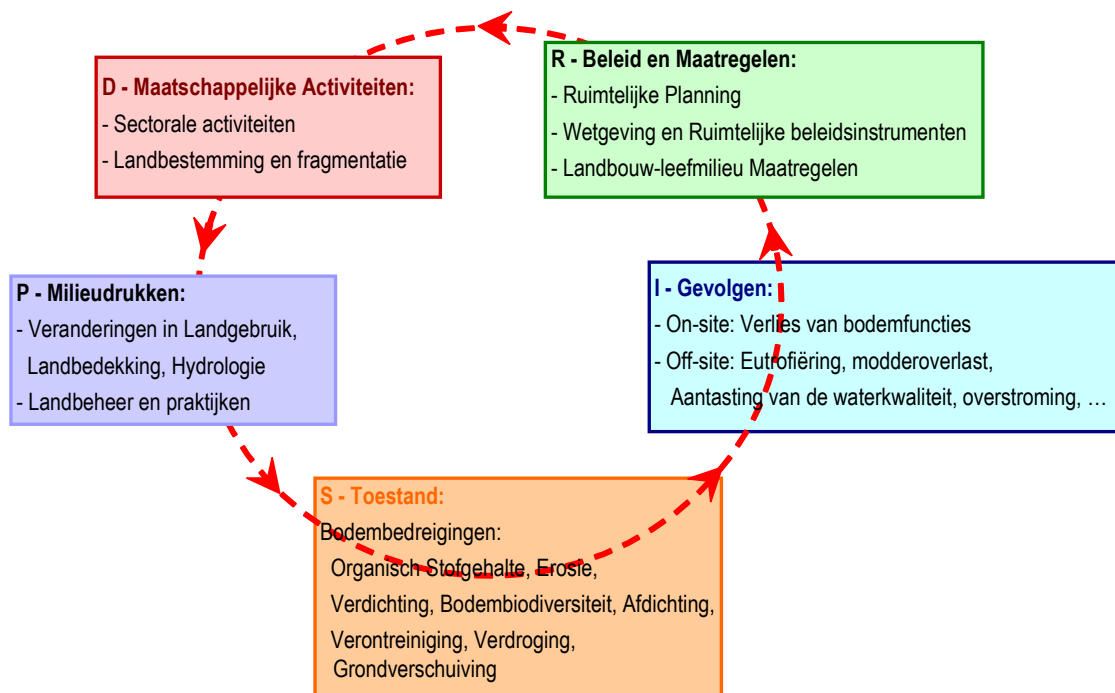
- Organische stof in de landbouwbodem;
- Erosie;
- Bodemverdichting;
- Bodembiodiversiteit;
- Bodemafdichting;
- Bodemverontreiniging.

Deze bodembedreigingen worden geanalyseerd volgens de milieuverstoringketen. Figuur 1 geeft dit analysekader weer.

Op www.milieurapport.be worden volgende bodemthema's met indicatoren opgevolgd:

- Organische stof in de landbouwbodem;
- Erosie;
- Bodemafdichting;
- Bodemverontreiniging.

Figuur 1: Bodemkwaliteit en de verschillende schakels in de DPSIR keten



1.1 | Bodemeigenschappen

De 'bodem' is het bovenste deel van de aardkorst, en namelijk die laag van de aardkorst die door planten beworteld is, of waarin zich bodemvormende processen afspelen. In Vlaanderen schommelt de dikte van de bodem van enkele centimeters tot enkele meters. De bodem bestaat deels uit vaste bestanddelen (mineraal en organisch) en deels uit poriën die gevuld zijn met lucht of met water. De bodem is een essentiële component van het terrestrische milieu en vormt zo het raakvlak tussen aarde (geosfeer), lucht (atmosfeer), water (hydrosfeer) en levende organismen (biosfeer). In het Decreet van 27 oktober 2006 betreffende de bodemsanering en bodembescherming, kortweg het Bodemdecreet, wordt *bodem* gedefinieerd als het vaste deel van de aarde met inbegrip van het grondwater en de andere bestanddelen en organismen die er zich in bevinden.

De verhouding waarin de verschillende componenten – hoofdzakelijk zand, leem- en kleideeltjes, organische stof, water en lucht – voorkomen, en de manier waarop die verschillende componenten samen een stabiele structuur vormen, zijn bepalend voor de eigenschappen van de bodem. Elke bodem bestaat uit een verschillend aantal opeenvolgende lagen (horizonten), elk met soms zeer verschillende fysische, chemische en biologische eigenschappen.

De bodemstructuur en -eigenschappen zijn het resultaat van een eeuwenoud proces. Bodemvorming is een zeer traag proces dat bestaat uit de verandering van moedermateriaal onder invloed van uitwendige factoren. De belangrijkste bodemvormende factoren zijn moedermateriaal, reliëf, klimaat, tijd en biologische factoren (vegetatie, bodemfauna en de mens). Aangezien bodemvorming en herstelprocessen bijzonder langzaam verlopen, wordt de bodem beschouwd als een niet hernieuwbare natuurlijke hulpbron. Bodemsanering na bodemverontreiniging brengt hoge kosten mee. Na sanering laat de bodem slechts beperkte functies toe.

Kennis van de processen en eigenschappen is op zich niet voldoende om te verklaren waarom op een bepaalde plaats een bepaalde bodem voorkomt. Een nog steeds belangrijke methode van onderzoek in de bodemkunde is daarom de inventarisatie en het in kaart brengen van de bodems. Vergelijking van bodems, onder verschillende omstandigheden gevormd, maakt het mogelijk de rol van elk van de bodemvormende factoren na te gaan. Door middel van karteringen kan men vaststellen waar welke bodems voorkomen, en vervolgens beoordelen wat de bodemkwaliteit is. In het verleden viel hierbij sterk de nadruk op de geschiktheid voor landbouw, maar de bodemkaarten worden in toenemende mate voor ecologisch en milieukundig onderzoek gebruikt.

De laatste jaren is een groeiende belangstelling ontstaan voor bodemeigenschappen en processen, die niet van direct belang voor de landbouw zijn. Het gaat onder meer om gegevens over specifieke fysische, chemische en/of biologische bodemeigenschappen, archeologische waarden, grondwaterkwaliteit en hydrologische omstandigheden. Deze informatie speelt onder andere een rol in ruimtelijke planprocessen en bij bouwactiviteiten, natuurontwikkeling, biologische landbouw en drinkwatervoorziening. Er is vooral behoefte aan geïntegreerde bodemgegevens. Maar juist die gegevensintegratie vormt vaak een belangrijk knelpunt, want de opslag en het beheer van de data verlopen versnipperd. Bovendien vallen de gegevens vaak niet direct te koppelen aan een bepaalde toepassing.

1.2 | Bodemkwaliteit en bodemfuncties

Bodemkwaliteit wordt als het geïntegreerde geheel van chemische, fysische en biologische bodemeigenschappen en -processen en zijn omgeving beschouwd. Deze vage en ruime omschrijving kan echter op verschillende manieren geïnterpreteerd worden. De visie op bodemkwaliteit hangt onder andere af van de ruimtelijke schaal waarover ze geëvalueerd wordt en de relatie tot het land van degenen die ze beoordelen. Landbouwgronden dienen niet alleen als basis en voedingsbodem voor gewassen en dierlijke productie maar vervullen ook andere functies. Om de bodemkwaliteit te behouden, herstellen of verbeteren en de bodem duurzaam te beheren, is het noodzakelijk om te weten welke functies de bodem moet vervullen (Karlen et al., 1997; EC, 2002; Cuijpers et al., 2008 en Reubens et al., 2010).

De bodem vervult een aantal economische, maatschappelijke en ecologische functies die cruciaal zijn voor het leven in het algemeen. Dit kan ook opgevat worden als ecosysteemdiensten. Het idee hierbij is dat de bodem of het ecosysteem diensten levert die je kunt benutten:

- **Fysisch medium**
De bodem vormt, letterlijk, het draagvlak voor menselijke activiteiten. We gebruiken de *draagfunctie* van de bodem als we er gebouwen en wegen op bouwen; kabels en leidingen in leggen en de ondergrondse ruimte gebruiken voor parkeergarages en tunnels.
- **Productie van voedsel en andere vormen van biomassa**
De meeste vegetatietypes hebben een bodem nodig voor de voorziening in water, lucht en nutriënten, en als substraat voor het vasthechten van de plantenwortels. De productie van voedsel- en andere landbouwgewassen is net als de bosbouw afhankelijk van de bodem.
- **Opslag, filtratie en chemische omzettingsprocessen**
In de bodem worden mineralen, organische stof, water en allerlei chemische verbindingen opgeslagen en getransformeerd. De bodem kan – binnen de grenzen van zijn natuurlijke draagkracht – fungeren als opslagplaats voor schadelijke stoffen en door omzettingsprocessen voorkomen dat ze rechtstreeks in lucht of water terecht komen. De bodem brengt CO₂, methaan en andere gassen in de atmosfeer.
- **Waterhuishouding**
De bodem is een natuurlijke filter voor het grondwater en functioneert als medium om water te bergen en als bron voor watervoorziening.
- **Habitat voor biodiversiteit en bewaarplaats genetisch materiaal**
De bodem vormt de habitat voor talrijke, uiterst diverse organismen, die elk een uniek genetisch materiaal bezitten. De biodiversiteit in de bodem hangt vermoedelijk samen met de weerbaarheid van de bodem tegen ziekten en plagen.
- **Cultureel erfgoed voor de mens en informatiedrager**
De bodem is een belangrijk landschapselement, dat deel uitmaakt van het cultureel erfgoed. Geologen, biologen en archeologen gebruiken de informatiefunctie van de bodem om te leren over ontwikkelingen die duizenden tot miljoenen jaren geleden hebben plaatsgevonden. Zonder het bodemarchief hadden we het bestaan van dinosauriërs bijvoorbeeld nooit ontdekt. Uit de opbouw van de bodem leren we veel over het klimaat van warmere periodes uit het verleden, dit helpt bij het voorspellen van de effecten van klimaatverandering.

- Bron van grondstoffen

De bodem levert diverse grondstoffen zoals klei, zand, mineralen en organisch materiaal zoals turf.

De bodemfuncties zijn onderling sterk met elkaar verbonden, en de mate waarin de bodem in elk van deze functies voorziet is afhankelijk van maatschappelijke activiteiten. Activiteiten die meerdere functies respecteren zijn doorgaans meer gericht op duurzaamheid dan activiteiten die slechts op één functie gericht zijn zodat de andere functies niet meer op dezelfde manier kunnen vervuld worden en de functies in concurrentie treden, bijvoorbeeld bij overexploitatie van grondstoffen.

Er kan een onderscheid tussen 'inherente' en 'dynamische' bodemkwaliteit gemaakt worden. De inherente bodemkwaliteit omvat de intrinsieke eigenschappen van een bodem zoals bepaald door de bodemvormende factoren. Zo zal een lemige bodem steeds een groter waterhoudend vermogen hebben dan een zandige bodem. Dynamische bodemkwaliteit wordt echter bepaald door die bodemeigenschappen en -processen die door menselijke activiteit beïnvloedbaar zijn, bijvoorbeeld gehalte aan organisch stof (OS), bodemverdichting ... Dergelijke beheersafhankelijke bodemeigenschappen en -processen komen het sterkst tot uiting in de toplaag van de bodem (Karlen et al., 1997 en Reubens et al., 2010).

1.3 | Bodemverstoringen

Bodemdegradatie als gevolg van één of meerdere bodemverstoringen kan ertoe leiden dat de bodem zijn voornaamste functies niet meer naar behoren kan vervullen. De omvang van de bodemverstoring wordt weergegeven in de schakel 'toestand' van de milieuverstoringketen (Figuur 1). Het verlies van bodemfuncties kan grote gevolgen hebben voor mens, natuur en economie. Als gevolg van de moderne productiemethoden is de chemische, fysische en biologische dynamische bodemkwaliteit gedaald. Per bodemverstoring wordt de omvang en de gevolgen samengevat.

1.3.1 | Organische stof

Organische stof zorgt voor het bindings- en buffervermogen van de bodem en levert energie voor het bodemleven. Organische stof is zo de sleutel tot bodemvruchtbaarheid en helpt de diffuse verontreiniging van water door de bodem te beperken, en de waterhuishouding te bufferen. Organische stof versterkt de bodemstructuur en beschermt de bodem tegen verslemping en erosie. Organische stof maakt van 0 tot 20 % uit van de bodemmassa. Organische stof bestaat voor ongeveer 58 % uit koolstof. Daarom speelt de bodem een hoofdrol in de mondiale koolstofcyclus. Organische stof is de sleutelindicator voor de bodemkwaliteit.

Organische stof wordt in de bodem op peil gehouden door een evenwicht tussen aanvoer en interne afbraak. Door een geringere aanvoer en een hogere afbraak, daalt het organische stofgehalte van de landbouwbodem sinds 1990. Op termijn kan dit voor problemen zorgen naar bodemvruchtbaarheid voor de landbouw, maar ook naar het behoud van een goede fysische structuur van de bodem.

1.3.2 | Erosie

Bodemerosie leidt tot het verlies van de bodem zelf en bijgevolg ook van de bodemfuncties. Bodemerosie kan ontstaan door watererosie, bewerkingserosie, winderosie en oogst. De inwerking van de neerslag op onvoldoende beschermde bodem op hellend terrein kan de vruchtbare toplaag volledig doen verdwijnen en kloven van meer dan 1 meter diep doen ontstaan. Daarnaast draagt het bewerken van bodems ook bij tot het verschuiven van bodemdeeltjes op een hellend perceel landbouwgrond. Winderosie op akkers komt in heel Vlaanderen voor, maar schade blijft in het algemeen beperkt (Van Kerckhoven et al., 2009). Door de oogst van wortelgewassen wordt jaarlijks tot 70 ton bodem/ha afgevoerd, die samen met de geoogste gewassen wordt verwijderd van de bodem. Dit leidt tot een gemiddeld bodemverlies van 1,6 ton/ha akkerland (MIRA, 2011).

1.3.3 | Grondverschuivingen

Een grondverschuiving (of massabeweging) is een hellingafwaartse beweging van grondmateriaal onder invloed van de zwaartekracht. De belangrijkste omgevingsfactoren die een rol spelen bij het

ontstaan van grondverschuivingen in Vlaanderen zijn de topografie en de geologie: de combinatie van zeer steile hellingen met het voorkomen van kleilagen onder zandige pakketten, zoals in de Vlaamse Ardennen. De directe oorzaak van grondverschuivingen is vaak een combinatie van hoge neerslaghoeveelheden en menselijke ingrepen, zoals het aanleggen van een vijver, afgravingen, ophogingen, afdichten van bronnen ...

De afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond en Natuurlijke Rijkdommen (ALBON) liet sinds 2003 drie onderzoeksprojecten uitvoeren, waarbij bestaande grondverschuivingen geïnventariseerd en in kaart gebracht werden en een risicokaart voor grondverschuivingen ontwikkeld werd voor het zuidelijk deel van Oost- en West-Vlaanderen.

Op basis van de uitgevoerde studies worden alle betrokkenen (andere overheden, burgers en bedrijven) zo veel mogelijk geïnformeerd over het risico op grondverschuivingen:

- Alle betrokken gemeentebesturen en regionale landschappen werden uitgenodigd als lid van de stuurgroep van de onderzoeksprojecten.
- De eindrapporten van de studies zijn beschikbaar via website van [LNE](#).
- Het kaartmateriaal (inventarisatie grondverschuivingen en gevoeligheidskaart) kan door iedereen geraadpleegd worden via de Databank Ondergrond Vlaanderen.
- Er werd een meldpunt voor grondverschuivingen opgericht op internet dat voor alle burgers toegankelijk is.
- Lokale overheden of particulieren kunnen met hun concrete vragen altijd terecht bij de dienst Land en Bodembescherming van ALBON voor een informeel advies.
- Het MER richtlijnboek voor de discipline bodem werd uitgebreid met de effectgroep 'grondverschuivingen'.

1.3.4 | Bodemverdichting

Bij verdichting wordt de landbouwbodem samengedrukt en vervormd, waardoor de totale en luchtgevulde hoeveelheid poriën daalt. Allereerst worden de macroporiën dichtgedrukt en in tweede instantie de kleinere microporiën. Verdichting kan zich vormen door natuurlijke omstandigheden maar ontstaat echter vaak onder menselijke invloed. De voornaamste oorzaken van bodemverdichting zijn het frequent betreden van percelen met zware landbouwvoertuigen, intensieve bodembewerkingen, een tekort aan organische stof in de bodem en eenzijdige teeltrotaties. De gevoeligheid van een bodem voor verdichting hangt af van de textuur, schijnbare dichtheid en weersomstandigheden: hoe natter de bodem, hoe fijner de textuur en hoe lager de dichtheid, hoe meer vatbaar een bodem is voor verdichting. Versmearing kan een belangrijke aanleiding vormen voor latere verdichting. De gevolgen van verdichting zijn:

- De hydrologische eigenschappen worden gewijzigd. Dit resulteert onder meer in een slechte nutriëntenopname door planten en verminderde wateropslagcapaciteit en infiltratie. Door de opbouw van water boven de verdichte laag wordt ook de drainage beperkt en ontstaan te natte bodems in het voorjaar, een hoger risico op erosie en daarmee geassocieerde fosforverliezen, en een toenemende laterale watertransfer en dus verontreiniging van oppervlaktewater.
- Ook de beschikbaarheid van water uit diepere lagen wordt verhinderd, en zo treedt in de zomer verdroging op. Dit kan resulteren in een gebrekkige vochtvoorziening voor de plant.
- Het volume bodem dat als buffer tegen verontreiniging kan fungeren, daalt.
- De wortelgroei (o.a. door een afname van poriënbeschikbaarheid) wordt beperkt en het bodemleven wordt verstoord.

1.3.5 | Verdroging

Verdroging vormt in Vlaanderen een van de voornaamste bedreigingen voor de achteruitgang van natuurwaarden, maar heeft ook gevolgen voor menselijke activiteiten als landbouw en watervoorziening. Deze zogenaamde achtergrondverdroging slaat eerder op de algemene verlaging van het grondwaterpeil in een watersysteem en heeft een multidimensioneel karakter. Effecten kunnen bovendien lokaal worden waargenomen, maar op regionale schaal veroorzaakt zijn. De

verdroging van diepe grondwaterlagen valt buiten de bodemlaag en wordt behandeld in het milieuthema waterkwantiteit.

1.3.6 | Verzilting

Verzilting treedt beperkt op in Vlaanderen in het hinterland van de kustzone, daar waar zout grondwater het zoete grondwater verdringt. Dit hangt samen met wijzigingen in waterbeheer van oppervlaktewateren waaruit zout water kan infiltreren in de bodem. Dit bedreigt in sommige gevallen de landbouwexploitatie en natuurwaarden.

1.3.7 | Bodemafdichting

De verstedelijking en daarmee ook de bodemafdichting neemt toe in Vlaanderen. Door de toename van de verharde oppervlakte vermindert de infiltratiecapaciteit en wordt het water versneld afgeleid. Dit is één van de oorzaken van de verhoogde overstromingsrisico's in Vlaanderen. Het water vindt zijn natuurlijke bedding niet, laat staan zijn eigen ritme om langzaam in de grond te trekken. Hierdoor daalt ook het grondwaterpeil en treedt er verdroging op. In stedelijke omgeving is de bodemafdichting medeoorzaak van het hitte-eilandeffect.

1.3.8 | Bodemverontreiniging

Bodemverontreiniging wordt veroorzaakt door economische of particuliere risicoactiviteiten, waarbij door menselijke activiteiten milieugevaarlijke stoffen in de bodem terecht komen zodat de kwaliteit afneemt.

De oorzaken zijn uiteenlopend: de belastende industriële activiteiten zelf, maar ook ongevallen of productiefouten, lekkende tanks en pijpleidingen, onzorgvuldige opslag van grondstoffen, eindproducten of afvalstoffen. Ook het morsen bij vervoer of bij op- of overslag van producten kan aanleiding geven tot bodemverontreiniging. Ook huishoudens kunnen de bodem verontreinigen. Het meest gekende voorbeeld zijn de stookolietanks.

Bodemverontreiniging heeft vaak slechts lokaal een effect op de grond waar de verontreiniging tot stand kwam. Een immobiele verontreiniging in de onverzadigde zone heeft zelden een grote impact op de omgeving. Ingeval een verontreiniging zich heeft verspreid naar het grondwater is de kans zeer reëel dat ze zich verspreidt naar aangrenzende gronden. Meestal blijft deze verspreiding beperkt tot de nabije omgeving.

1.4 | Beleid

In het kader van duurzame ontwikkeling is het bodembeleid zowel op Europees als gewestelijk niveau voortdurend in ontwikkeling. Daarnaast zijn er al heel wat kaderrichtlijnen van kracht die – zij het onrechtstreeks – van toepassing zijn voor bodembescherming.

Op Europees niveau is er een ontwerp-kaderrichtlijn Bodembescherming, die de uitkomst is van de thematische strategie bodem. Tot op heden bestaat er voor bodem, in tegenstelling tot lucht en water, geen Europees juridisch kader. Andere Europese wetgeving heeft een invloed op bodembescherming, maar volstaat niet en mist coherentie.

Op basis van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid van de EU vormt kruisconformiteit of cross compliance een van de in te zetten instrumenten om duurzaam bodemgebruik in de landbouw te bevorderen en ongewenst bodemgebruik in de landbouw te ontmoedigen. Het beginsel dat landbouwers bepaalde eisen betreffende milieubescherming moeten naleven om in aanmerking te komen voor marktsteun is opgenomen in de Agenda 2000-hervorming. In het nieuwe GLB vanaf 2015 wordt de cross compliance minder streng gemaakt en wordt het principe van vergroening ingevoegd.

In 1991 is de Europese Nitraatrichtlijn ingevoerd met twee bedoelingen: de waterverontreiniging door nitraten uit agrarische bronnen terugdringen en verdere verontreiniging voorkomen. In de richtlijn is ook de maximumhoeveelheid stikstof uit dierlijke mest vastgesteld die in de nitraatgevoelige gebieden per hectare mag worden toegepast. Meer informatie over het Vlaamse mestbeleid is terug te vinden in

de Voortgangsrapporten Mestbank (o.a. VLM, 2010) en op de website van de Vlaamse Landmaatschappij. Met deze beperking van de meststofgift is ook een beperking gesteld aan de hoeveelheid organische stof die kan toegediend worden.

Naast bovenvermeld beleid, geldt er Vlaamse wetgeving en regelgeving die aspecten van de bescherming van de bodem regelt voor volgende thema's:

- erosie
- delfstoffen
- bodemsanering
- waterbodems
- bodemverzet
- bescherming van het archeologische patrimonium
- ruimtelijke ordening
- ...

2 | Organische stof in de bodem

2.1 | Mechanismen

2.1.1 | Wat is organische stof in de bodem?

Organische stof in de bodem omvat de volledige niet-minerale fractie van de bodem en is een van de belangrijke onderdelen van de bodem. Organische stof is afkomstig van vers organisch materiaal. Vers organisch materiaal is plantaardig en dierlijk materiaal dat nog niet is omgezet, zoals grasmaaisel, bladeren, takken en dierlijke afvalproducten. Dit organisch materiaal wordt in de bodem door micro-organismen afgebroken. Wanneer dit vers organisch materiaal door de afbraak onherkenbaar is geworden, spreken we van organische stof in de bodem.

Organische stof in de bodem bestaat uit vele duizenden verschillende complexe chemisch-organische verbindingen met een hele waaier aan afbraaksnelheden. Koolstof (C) vormt het belangrijkste bestanddeel van organische stof. Er wordt aangenomen dat organisch materiaal in de bodem gemiddeld 58 % koolstof bevat. Een leemgrond met 1,6 % C in de massa van de bouwlaag (bovenste 23 cm) heeft bijgevolg 2,8 % organische stof of 89 ton organische stof per hectare.

In een gezonde bodem is de bovenste laag donkerder van kleur dan de onderliggende lagen. Hoe donkerder de kleur, hoe hoger vaak het humusgehalte.

2.1.2 | Beschrijving van de verstoring

Het organische stofgehalte van de bodem en meer bepaald van de bouwvoor is een van de belangrijkste kwaliteitskenmerken van landbouwgronden. Zowat alle dynamische bodemeigenschappen, zowel chemische, fysische als biologische, worden beïnvloed door het organische stofgehalte.

Sinds de jaren 90 begon een systematische afname van het organische stofgehalte in akkerbouwpercelen in Vlaanderen, die zich na de eeuwwisseling verderzette. In de periode 2004-2007 had meer dan de helft van de percelen waarin het koolstofgehalte gemeten werd een te laag gehalte en werden percelen rijk aan organische stof stilaan een zeldzaamheid (Boon et al., 2009). Met de invoering van een Vlaams mestbeleid in 1996 werd met een beperking van de meststofgift ook een beperking gesteld aan de hoeveelheid organische stof die kan toegediend worden. Dat verklaart de achteruitgang van het organische stofgehalte in landbouwbodems voor twee regio's met een hoge dierlijke productie, de Noorderkempen en de West-Vlaamse Zandstreek. In de rest van Vlaanderen verklaart het Mestactieplan de daling van het organische stofgehalte niet. De verklaring is eerder te vinden in de veelvuldige omzettingen van permanent grasland naar akkerland (VILT, 2014) door de opkomst van de maïsteelt ten nadele van grasland en graanteelt.

2.1.3 | Belang van organische stof in de bodem

In een aanzet tot een Europese Thematische Strategie inzake Bodembescherming (EC, 2006) wordt het organische stofgehalte in de bodem gedefinieerd als dé sleutelindicator voor bodemkwaliteit en -functionaliteit. Een optimaal gehalte aan organische stof komt overeen met goede bodemcondities zowel vanuit landbouw- als vanuit leefmilieu-standpunt. Meer bepaald zijn de volgende aspecten belangrijk:

Vanuit milieukundig perspectief

- Aggregaatstabiliteit: Organische stof vormt het cement waarmee bodemdeeltjes aan elkaar klitten tot aggregaten. Hierdoor stabiliseert de bodemstructuur, waardoor ook de kans op erosie, verdichting en verslemping afneemt.

- Waterbergend vermogen en infiltratiesnelheid: Organische stof kan een grote hoeveelheid water vasthouden in de bodem en draagt op die manier bij aan het waterbergend vermogen van de bodem, wat vooral in zandige gronden van groot belang is. Een hoger organische stofgehalte leidt ook tot een hogere infiltratiesnelheid. In de praktijk betekent dit dat bij intensieve regenbuien minder snel run-off en erosie zal optreden, maar ook dat de neerslag efficiënter zal worden benut, dus meer zal opgenomen worden in de bodem.
- Bodembiodiversiteit: Zonder organische stof is de bodem slechts een dood substraat. Koolstof vormt de chemische hoeksteen van alle leven op aarde. Organische stof vervult een belangrijke ecologische functie in de vorm van voedselbron en habitat voor het bodemleven en het is tevens een afbraakproduct van de bodemorganismen.
- Koolstofvastlegging: Terrestrische ecosystemen worden als een grote potentiële sink van CO₂ (belangrijkste broeikasgas) beschouwd. Het is niet enkel mogelijk om koolstof vast te leggen in vegetatie (waarbij men het vooral heeft over het bosareaal), maar ook bodems zelf hebben een duidelijk potentieel voor koolstofopslag. De hoeveelheid koolstof in bodems wordt hoofdzakelijk bepaald door de input van organisch materiaal. De hoeveelheid koolstof opgeslagen in bodems is het dubbele van de hoeveelheid koolstof in de atmosfeer. Kleine wijzigingen in de koolstofhuishouding van bodems hebben dan ook een duidelijke invloed op de CO₂-concentraties in de atmosfeer.
- Mineralisatie: Organische stof in de bodem kan ook een negatieve invloed hebben vanuit milieukundig standpunt. Een grote toevoer van organisch materiaal en een hoog gehalte aan organische stof kunnen aanleiding geven tot hoge stikstofmineralisatie op momenten dat er een geringe opname is door het gewas. Daardoor ontstaat een verhoogd risico op stikstofuitspoeling. Daarnaast kan een ruime aanwezigheid van goed afbreekbaar organische stof onder natte omstandigheden leiden tot emissies van de broeikasgassen N₂O en CH₄. Hieruit blijkt dat onder bepaalde omstandigheden verschillende doelstellingen met betrekking tot het optimaliseren van het organische stofgehalte in de bodem tegengestelde effecten kunnen hebben op het milieu.

Vanuit landbouwkundig perspectief

- Nutriënten: Organische stof vormt een zeer belangrijke bron van voedingsstoffen voor de aanwezige gewassen. De organische stof zorgt ervoor dat nutriënten kunnen vastgehouden en nadien ook weer geleidelijk beschikbaar gesteld worden voor de planten. Algemeen kan gesteld worden dat de organische stof in de bodem zeer nauw verbonden is met de bodemvruchtbaarheid en een verandering van deze organische stofvoorraad ook een verandering in bodemvruchtbaarheid met zich meebrengt. Tijdens de mineralisatie van organische stof komen nutriënten vrij zoals N, P en S. Stikstofmineralisatie is een van de belangrijkste aanvoerposten van stikstof doorheen het groeiseizoen van zowel akker- als tuinbouwgewassen.
- Buffering: Organische stof heeft, net als kleimineralen, de eigenschap om kationen te adsorberen aan het oppervlak. Wanneer het organische stofgehalte van een bodem toeneemt, betekent dit dus ook een stijging van de kationen-uitwisselingscapaciteit (CEC). Het vermogen van een bodem om kationen vast te houden beïnvloedt de gewasproductie. De bufferende werking van een bodem ligt immers hoofdzakelijk verval in de geadsorbeerde kationen aan het oppervlak van organische stof en kleimineralen. Het grote belang van deze bufferende eigenschap is het voorkomen van grote schommelingen van de bodem-pH of zuurtegraad. De grootte van de CEC bepaalt ook de buffercapaciteit voor zware metalen en andere verontreinigingen. Dit houdt in dat hoe meer organische stof aanwezig is, hoe beter de bodem zal gebufferd zijn. Dit is van belang aangezien gewassen slechts optimaal groeien binnen relatief nauwe pH-grenzen.
- Bodemstructuur en bewerkbaarheid: Organische stof is van groot belang voor de bodemstructuur en daarmee samenhangend de lucht- en waterhuishouding en de bewerkbaarheid. Voldoende organisch materiaal gaat verslumping tegen, zorgt voor een betere zuurstoftoestand in de bodem en vermindert erosie. Door de betere bewerkbaarheid is het mogelijk om te werken met lichtere machines en zal het risico op bodemverdichting afnemen.
- Vochthuishouding en waterbeschikbaarheid: Organische stof absorbeert water en vormt als dusdanig een buffer voor het waterleverend vermogen van de bodem, wat vooral in zandige gronden van groot belang is. Een verhoogd organische stofgehalte gaat samen met een groter poriëngehalte. Hierdoor neemt de vochtretentie van de bodem toe en verhoogt zowel de onverzadigde als de verzadigde watergeleiding in de bodem, evenals de infiltratiesnelheid ter hoogte van het maaiveld. De hoeveelheid voor de plant beschikbaar vocht neemt toe. De

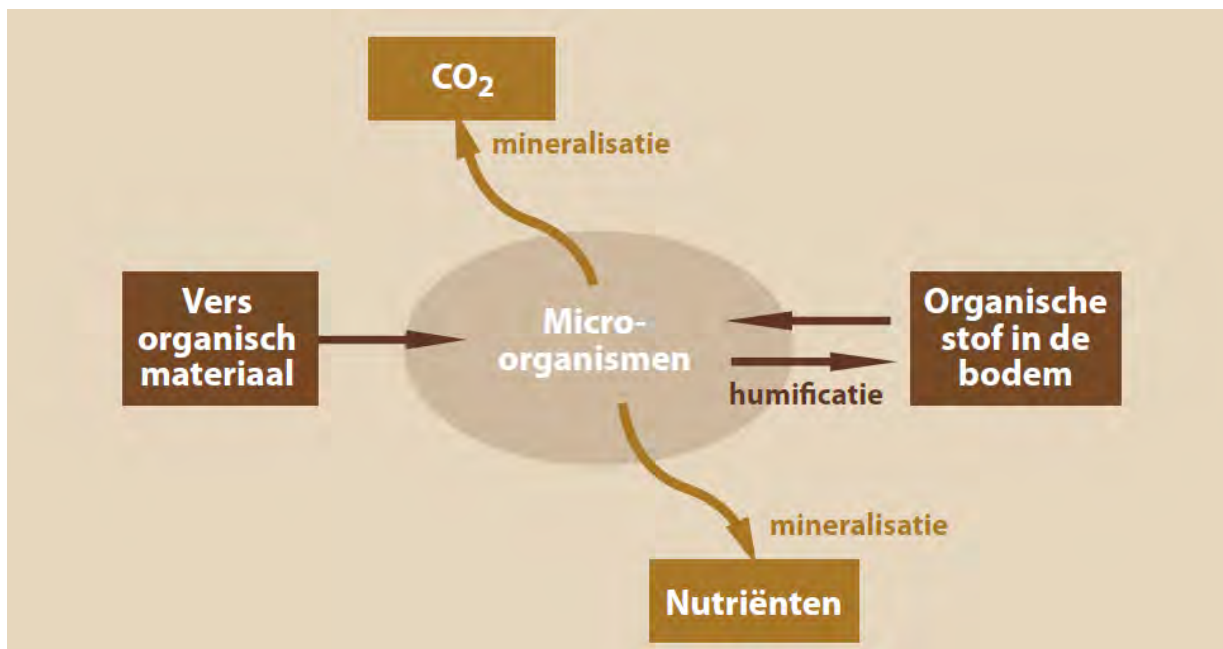
opneembare vochtreserve neemt significant toe naar mate het organische stofgehalte in de bodem toeneemt. De vochtvoorziening van een gewas beïnvloedt in verregaande mate de ontwikkeling van het gewas. Veranderingen in de vochtretentiekenmerken van de bodem onder invloed van een veranderend organische stofgehalte, zullen dan ook onmiddellijk effect hebben op de gewasproductie.

- Warmte: Bodems met een hoog organische stofgehalte vertonen vaak een donkere kleur. Hierdoor nemen ze meer warmte op. Het gebruik van de warmte van de eerste voorjaarszon kan van belang zijn onder andere bij het kweken van primeurgroenten: door de snellere opwarming van de bodems kan je groenten sneller planten en ook sneller oogsten.

2.1.4 | Opbouw en afbraak van bodemorganische stof

Een van de meest universele bodemvormende processen is de omzetting van organisch materiaal tot organische stof (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Hierbij spelen voornamelijk twee processen: mineralisatie en humificatie.

Figuur 2: Cyclus van bodemorganische stof



Bron: LNE (2009a)

Bij mineralisatie van recent organisch materiaal of van organische stof wordt de koolstof in het organisch materiaal omgezet naar onder andere CO_2 , dat vervluchtigt. Daarenboven worden nutriënten zoals N, P en S die aanwezig zijn in de organische stof omgezet naar NH_4^+ , PO_4^{3-} en SO_4^{2-} . Hierdoor is de bodemorganische stof een reservoir en een bron van nutriënten.

Door humificatie wordt een deel van het vers organisch materiaal omgevormd tot de meer stabiele organische stof in de bodem. De meer stabiele organische stof in de bodem wordt op zijn beurt ook afgebroken door micro-organismen en ondergaat opnieuw mineralisatie en humificatie. Door humificatie van organische stof worden meer stabiele fracties van organische stof gevormd. Organische stof wordt vaak opgesplitst in een gemakkelijk afbreekbare fractie (= labiele fractie) en een moeilijk afbreekbare fractie (= stabiele fractie of humus) maar is in feite een mengsel van fracties met een waaier aan afbraaksnelheden. De stabielere fracties mineraliseren veel trager dan gemakkelijk afbreekbare fracties.

De in de bodem aanwezige organische stof is voortdurend onderhevig aan microbiële afbraak. De meeste akkerlanden in Vlaanderen bevatten zo'n 110 ton bodemorganische stof of 64 ton organische koolstof in de bovenste 30 cm. Per jaar wordt ongeveer 2 % van de organische stof afgebroken tot

CO₂, wat overeenstemt met zo'n 1,3 ton organische koolstof per hectare per jaar (BDB & UGent, 2008). Maar mineralisatie en humificatie zijn biologische, dus 'levende' processen en de exacte jaarlijkse afbraak hangt af van allerlei factoren zoals het organische koolstofgehalte, de bodemtextuur (zand, zandleem, leem, klei), de bemestingshistoriek (zware organische bemesting, enkel minerale bemesting, vroeger weiland ...), de drainagetoestand (diepte grondwatertafel en vochtdoorlaatbaarheid), de weersomstandigheden (temperatuur, neerslag), enz.

Om de vruchtbaarheid van de bodem op peil te houden moet de jaarlijkse afbraak van organische stof gecompenseerd worden door de aanvoer van organisch materiaal. Bij de aanvoer van organisch materiaal moet rekening gehouden worden met het rendement voor de organische stofopbouw, aangeduid met de term effectieve organische stof. De effectieve organische stof is de hoeveelheid van het toegediende organisch materiaal dat na 1 jaar nog in de grond aanwezig is. Van bovengrondse plantenresten blijft ongeveer 25 % van het organisch materiaal nog achter in de bodem, bij stalmest is dit 50 % en bij stabiele compost meer dan 80 %.

Over de rol van micro-organismen in de bodem en het overige bodemleven, weidt hoofdstuk 5. Biodiversiteit in de bodem uit.

2.2 | Maatschappelijke activiteiten en gevolgen

2.2.1 | Maatschappelijke activiteiten

Het organische stofgehalte in de bodem varieert sterk met landgebruik en -beheer. Op gebied van maatschappelijke activiteiten zijn het vooral de landbouwactiviteiten die een invloed uitoefenen. Verschillende landbouwpraktijken, zoals teeltrotatie, braakperiode, cultuurtechnieken en veebezetting van het land, bepalen de toevoer van vers organisch materiaal en de afbreeksnelheid van de organische stof in de bodem.

Toevoer van organische stof: De toediening van dierlijke en andere organische mest, het niet-afvoeren van oogstresten en het inzaaien van groenbemesters bepalen de aanvoer van vers en jong organisch materiaal. Een streng mestbeleid kan leiden tot verminderde aanvoer van organische stof, indien hiervoor niet gecompenseerd wordt.

Bodembewerking: Ook bodembewerking is van belang. Niet alleen de ploegdiepte, maar ook het aantal grondbewerkingen en technieken zoals niet-kerende grondbewerking hebben een invloed. Dieper ploegen betekent verdunning van de aanwezige koolstof in de diepere bouwvoor. Door intensievere grondbewerking en dus intensievere verstoring van het bodemprofiel kan de afbraaksnelheid van de organische stof verhogen.

Landgebruik: Landgebruiksveranderingen spelen een grote rol in de hoeveelheden organische stof. De voorraden organische stof kunnen sterk verschillen tussen permanent grasland, permanente akkerbouw en wisselbouw. Weilanden die worden omgezet in akkerland kennen een dalend verloop van het koolstofgehalte. Ook de teeltrotatie bij akkerbouwteelten speelt een rol. Omschakeling naar meer granen, met niet-afvoeren van stro en gebruik van groenbemesters kunnen zorgen voor een toename van het organische stofgehalte (Mulier et al., 2006).

Klimaatverandering: Ten slotte moet ook rekening gehouden worden met de invloed van de recente klimaatopwarming. Een aantal studies suggereren dat een gedeelte (maximum 10 à 20 %) van de koolstofafname in de bodem een gevolg zou zijn van het warmer worden van ons klimaat sinds het einde van de jaren 80 (Boon et al., 2009). Zowel de natuurlijke cyclus van fotosynthese als de microbiële afbraak van organische stof in de bodem nemen toe met de temperatuur. De afbraak van organische stof stijgt over het algemeen echter sneller met de temperatuur dan fotosynthese, wat ervoor zorgt dat klimaatverandering een netto toename van CO₂ in de atmosfeer tot gevolg heeft. Men is het echter niet eens over de grootte van deze positieve terugkoppeling tussen klimaat en de terrestrische koolstofcyclus (Gillabel, 2010). Deze koolstofafname door opwarming zou zich vooral voordoen in bodems waar het organisch materiaal weinig beschermd is: veenbodems en polaire bodem die niet langer permanent bevroren zijn. Andere bodems zijn door de vormingsprocessen en de stabiliteit van het organisch materiaal meer beschermd (Gillabel, 2010). Daarenboven kunnen langdurige droogtes ten gevolge van de klimaatverandering de afbraak van organische stof verminderen.

2.2.2 | Gevolgen

Een dalend of stijgend organische stofgehalte in de landbouwbodem heeft ecologische (milieukundige) en economische (landbouwkundige) gevolgen. Deze gevolgen kunnen afgeleid worden uit de functies die organische stof vervult. Bijkomend hier wordt de financiële impact van dalende organische stofgehalte besproken.

Naar de financiële implicaties van dalende koolstofgehalten of actief koolstofbeheer is momenteel nog weinig of geen kwantitatief onderzoek verricht. Dit wordt gemakkelijk verklaard door de hoge complexiteit van deze materie, waarbij rekening dient worden gehouden met zowel technische als economische en zelfs beleidsmatige randvoorwaarden (BDB & UGent, 2008).

Grove schattingen door Lal (communicatie EU Studiedag klimaatsverandering 12 juni 2008 Brussel) begroten de waarde van organische stof in de bodem op ongeveer 200 dollar per ton. Verwijzend naar de waardering voor CO₂-emissierechten in de grootteorde van 20 tot 30 dollar per ton, schatten Sandor en Skees (1999) de potentiële inkomsten voor Amerikaanse landbouwers op 4 tot 6 miljard dollar, of ongeveer 10 % van het bedrijfsinkomen. Deze schatting houdt enkel rekening met de vergoeding die landbouwers in het kader van de koolstofsequestratie zouden ontvangen, los van de verbetering van de intrinsieke waarde van de bodemkoolstof. Antle et al. (2001) geven een zeer brede range voor de marginale kostprijs van koolstofopslag in landbouwgrond (12 tot 500 dollar per ton), afhankelijk van het soort contract of betalingsmechanisme, de hoeveelheid vastgelegde koolstof en de plaats specifieke kenmerken van het gebied waar de sequestratie plaatsvindt. De evolutie van de koolstofprijs op de markt van emissiehandel is veranderlijk. En daarmee is het voorbeeld van Sandor & Skees (1999) gedateerd. Maar als denkprincipe is het nog wel hanteerbaar.

In Duitsland wordt door de VHE (Verbände der Humus- und Erdenwirtschaft) op basis van de marktwaarde van stro de waarde van een kg bodemkoolstof op 0,04 euro geschat wat overeenkomt met 40 euro per ton C. Bij de berekening van de 'navette', de vergoeding die een pachter dient te betalen of ontvangt bij de teruggave van het gepachte land is de factor organische stof een belangrijke maar moeilijk in te schatten parameter.

Vergelijkende berekeningen van de kostprijs van verschillende vormen van ruwvoederwinning uitgevoerd in 2000 door een werkgroep bestaande uit medewerkers van het Ministerie van Middenstand en Landbouw, ALT, Boerenbond, Bodemkundige Dienst en PDLT Antwerpen houden rekening met de invloed van elk type van winning op de hoeveelheid organische stof. Hierbij wordt een waarde gehanteerd van 38 euro per ton organische koolstof in de bodem. Op het Vlaamse niveau omvat actief koolstofbeheer maatregelen met betrekking tot een aangepaste vruchtafwisseling, toediening van organisch materiaal en het niet-afvoeren van oogstresten. Wat dit laatste betreft is vooral het niet-afvoeren van stro een belangrijke factor omwille van de vermarktbaarheid van het product. Verkoopprijzen van stro variëren sterk van plaats tot plaats en in de tijd, en lopen op tot 100 à 150 euro per hectare. Omgerekend naar effectieve organische koolstof zou dit neerkomen op ongeveer 46 à 69 euro per ton koolstof in de bodem. De meerwaarde hiervan is moeilijk in te schatten. Meestal wordt het afvoeren van stro daarom aanzien als een interessant alternatief. Voor de meeste andere oogstresten bestaat momenteel geen afzetmarkt als dusdanig, maar ook dit zou kunnen veranderen wanneer de vraag naar grondstoffen voor vergisting of andere vormen van valorisatie zou stijgen.

Ook wat betreft de toediening van organisch materiaal ligt de situatie in Vlaanderen erg complex vermits dierlijke mest of andere organische meststoffen en bodemverbeteraars naargelang de situatie zowel een positieve als een negatieve waarde kunnen hebben. Deze laatste worden bovendien beïnvloed door de prijsevolutie van minerale meststoffen.

Nog complexer is de inschatting van de impact van een wijzigende bedrijfsvoering in functie van koolstofbeheer. Aanpassingen in de bedrijfsvoering die nieuwe en specifieke investeringen zouden vragen, zijn niet te verwachten, zeker zolang de financiële voordelen van een verbeterde koolstoftoestand niet concreet kunnen begroot worden.

Gebruik van GFT-compost naast drijfmest en aanvullend kunstmest op een gemiddeld akkerbouwbedrijf in Zuid-Nederland resulteert in een positief saldo van gemiddeld 55 euro/ha ten

opzichte van de basissituatie waarin de maximaal toegelaten hoeveelheid drijfmest en kunstmest wordt gebruikt (de Wit, 2013).

2.3 | Verbanden met andere thema's

2.3.1 | Andere bodemthema's

Het behoud van organische stof in de landbouwbodem is uitgewerkt in deze themabeschrijving bij:

- Erosie
- Bodemverdichting
- Bodembiodiversiteit

2.3.2 | Vermesting en verzuring

Eenzijds is het vanuit bodemkwaliteitstandpunt aangewezen om een voldoende hoeveelheid organische stof in de bodem te hebben en moet men regelmatig supplementair organisch materiaal toedienen, aangezien de oogstresten van de gewassen niet volstaan om de afbraak van de bodemorganische stof te compenseren.

Anderzijds is de toegelaten hoeveelheid dierlijke of andere organische mest beperkt door de maximaal toegelaten stikstof- en fosfaatgiften per hectare en per jaar volgens het mestdecreet. Tevens moet tijdens de periode van 1 oktober tot en met 15 november het nitraatstikstofresidu in het bodemprofiel tot een diepte van 90 cm lager zijn dan 66 à 90 kg N/ha, afhankelijk van de teelt, bodemtype, al of niet beheerovereenkomst en/of focusgebied.

Hieruit blijkt dat beide wetgevingen niet altijd compatibel zijn en dat kennis omtrent N- en P_2O_5 -inhoud, N- en P_2O_5 -werkingscoëfficiënten en effectieve organische stof van de toegediende organische materialen onontbeerlijk is voor een goed beheer van organische stof in de bodem met respect voor beide wetgevingen.

2.3.3 | Klimaatverandering

Het verband met klimaatverandering wordt verklaard doordat organische stof deel uitmaakt van de koolstofcyclus, waarbij het broeikasgas CO_2 ook betrokken is.

Koolstof volgt een bepaalde kringloop op aarde, die de koolstofcyclus wordt genoemd (Figuur 3). Door het volgen van de koolstofcyclus kunnen we ook de energiestromen op aarde bestuderen, omdat de meeste chemische energie die nodig is voor het leven in de vorm van verbindingen tussen koolstofatomen en andere atomen opgesloten zit in organische stoffen. Het terrestrische deel van de mondiale koolstofcyclus heeft te maken met de verplaatsing van koolstof door aardse ecosystemen. De koolstofcyclus is gebaseerd op koolstofdioxide (CO_2), dat in gasvormige staat in de lucht gevonden kan worden en in opgeloste vorm in het water. In de biosfeer vindt een voortdurende cyclus plaats van CO_2 -fixatie en afbraak van koolstofverbindingen. Terrestrische planten gebruiken koolstofdioxide uit de atmosfeer om zuurstof te genereren dat van levensbelang is voor dieren. Bij de fotosynthesereactie zetten planten en andere producenten koolstofdioxide uit de atmosfeer en water onder invloed van zonlicht om in complexe koolwaterstoffen, zoals glucose, waarbij zuurstof vrijkomt. Koolstof dat gebruikt wordt door producenten, consumenten en reduceren verplaatst zich behoorlijk snel door de lucht, het water en de levensvormen.

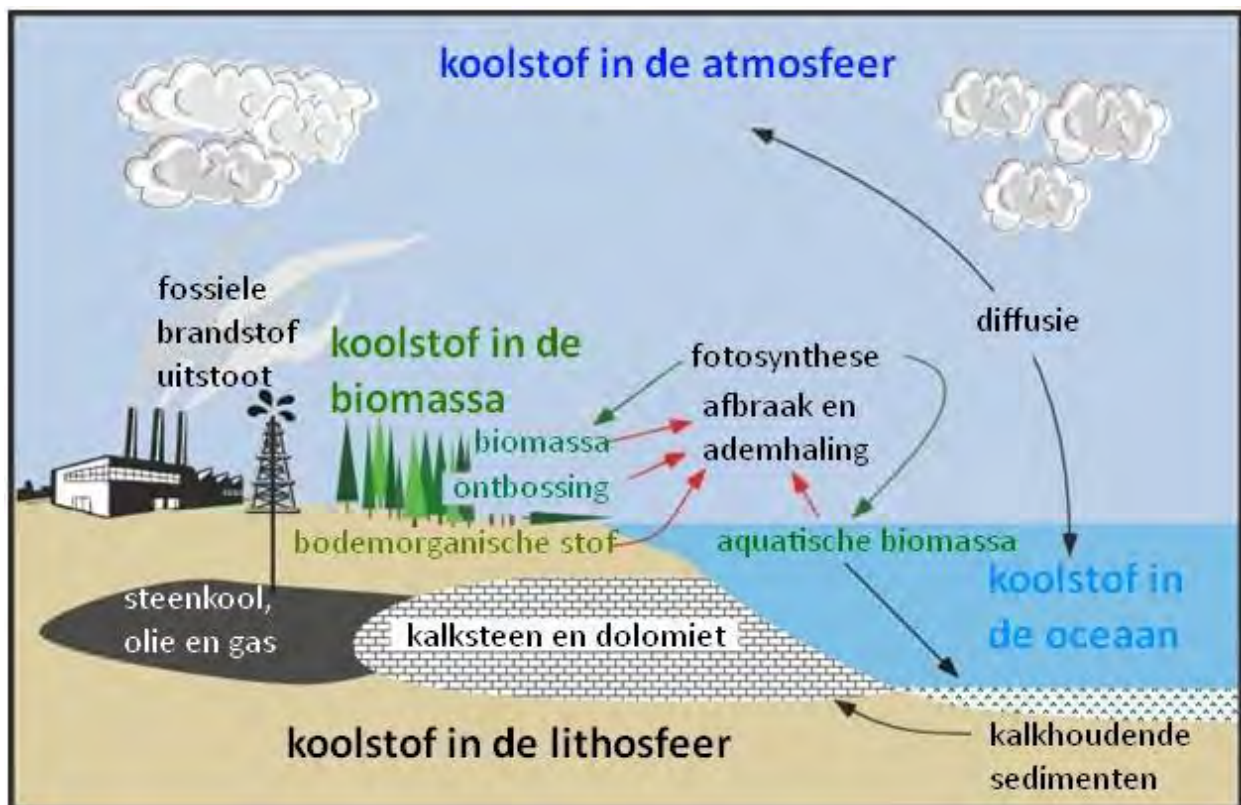
Niet al het organisch materiaal in de bodem wordt meteen verteerd. Koolstof kan opgeslagen worden als biomassa in de wortels van bomen en in ander organisch materiaal en daar decennia lang blijven. Deze koolstof komt uiteindelijk weer vrij door vertering. Onder sommige omstandigheden hoopt organisch materiaal zich sneller op dan dat het in het ecosysteem wordt afgebroken. De resten worden opgesloten in ondergrondse bergplaatsen. Wanneer sedimentlagen deze materie samenpersen, kunnen er door de eeuwen heen fossiele brandstoffen gevormd worden. Langdurige geologische processen kunnen de koolstof in deze brandstoffen na een lange tijd blootstellen aan de lucht, maar tegenwoordig komt de koolstof vooral vrij door menselijk handelen, zoals

verbrandingsprocessen. Koolstofdioxide is een broeikasgas en staat dan ook in relatie tot de opwarming van de aarde en de klimaatverandering.

Het organische stof in de bodem speelt een belangrijke rol in de mondiale koolstofcyclus; naar schatting is het koolstofgehalte in de bodem van dezelfde grootteorde als de koolstof aanwezig in de atmosfeer en biosfeer samen. Organische stof in de bodem is een sink voor koolstof. Wereldwijd wordt deze voorraad tot een diepte van 1 m ingeschat op 1 500 Gton C. Deze bodemvoorraad is tweemaal de atmosferische voorraad van 768 Gton C. Meer cijfers staan vermeld in de MIRA Themabeschrijving Klimaatverandering, in Gillabel (2010) en in IPCC (2007).

In mondiale koolstofcycli wordt aangenomen dat de evolutie van organische stof in de bodem een relatief traag proces is dat gewijzigd wordt bij veranderingen in landgebruik of -beheer. Bovendien is er een grote ruimtelijke en temporele variabiliteit in koolstofreserves in de bodem.

Figuur 3: De koolstofcyclus



Bron: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/9r.html>, Dr. Michael Pidwirny, University of British Columbia Okanagan

2.4 | Maatregelen

Het organische stofgehalte in de landbouwbodem kan bijgestuurd worden door maatregelen zoals aanpassen van het landgebruik en bodembeheer en verhogen van de aanvoer van organisch materiaal. De teelt van groenbedekkers of vanggewassen als nateelt is een goed voorbeeld van aangepast landgebruik. Landbouwpraktijken die de aanvoer verhogen zijn het achterlaten van oogstresten, het toevoegen van stro, compost of organische mesten waarbij rekening wordt gehouden met de verschillen tussen de gewassen, het inpassen van groenbedekkers in het teeltplan en een beredeneerde bemestingskeuze. Tabel 1 toont technieken voor het verhogen van het organische stofgehalte. Technieken bruikbaar in België worden hieronder kort toegelicht. Meer informatie is te vinden in BDB & UGent (2008).

Organische stof wordt in de bodem voortdurend afgebroken en aangevoerd. De afbraak van organische stof in de bodem is zeer variabel en afhankelijk van tal van factoren. Ook de aanvoer van vers organisch materiaal zal verschillen van jaar tot jaar, onder andere afhankelijk van de geteelde

gewassen en het gevoerde management. Er moet dan ook op langere termijn gekeken worden of het lukt om voldoende organische (kool)stof in de Vlaamse akkers en graslanden te behouden.

Tabel 1: Technieken voor het verhogen van het organische stofgehalte in de bovenste bodemlagen

akkerbouw	grasland
conserveringslandbouw biologische landbouw groenbemesters tijdelijk grasland niet-afvoeren van oogstresten (inclusief stro) toediening van organische meststoffen uitgebreide vruchtwisseling positieve nutriëntenbalans waterbeheer	gecontroleerde begrazing geschikte species agroforestry bemestingsmanagement gras-klaver

Bron: Lal (2007), aangevuld met VILT (2014)

Regelmatige **toediening van organisch materiaal** leidt tot het hoger organische stofgehalte in de bodem en dit zelfs op korte termijn. Dit geldt niet enkele voor de toediening van dierlijke mest, maar ook voor diverse composten (zoals GFT-compost en boerderijcompost) en andere secundaire grondstoffen op basis van organische biologische afvalstoffen (zoals slib uit de voedingsindustrie) (Houot et al., 2007; Leroy et al., 2007). De stijging van het organische stofgehalte is daarbij sterk afhankelijk van de kwaliteit van het toegediende materiaal, waarbij materialen met een hogere stabiliteit (hogere lignine gehalte) zorgen voor een grotere stijging van het organische stofgehalte.

De **gewasrotatie** speelt een belangrijke rol in de evolutie van het organische stofgehalte in de bodem. Welke rotatie is het interessantst om het niveau van organische koolstof in de bodem op peil te houden? Dit wordt voornamelijk bepaald door de hoeveelheid en effectiviteit van de ingewerkte oogstresten. De omschakeling naar meer granen en het niet-afvoeren van stro heeft een positieve invloed op het organische koolstofgehalte. Bij akkerbouwrotaties typisch voor rundveehouderijen zullen teeltplannen waarin luzerne wordt opgenomen en waarbij korrelmaïs vaker voorkomt dan snijmaïs, beter presteren in de opbouw van organische koolstof in de bodem dan de gebruikelijke rotaties. Ook het inlassen in de rotatie van graangewassen, waarbij het stro wordt achtergelaten op het veld, en gras als groenbedekker hebben een erg positieve invloed op het koolstofgehalte van de bodem. Een andere, zeer effectieve maatregel is het inlassen van tijdelijk grasland in de teeltrotatie, zeker wanneer het twee jaar of langer duurt eer het weer gescheurd wordt. Minder voor de hand liggend, al geven bioboeren het goede voorbeeld, is vlinderbloemigen telen voor het vee. Vandaag kopen de meeste boeren die nutriënten aan onder de vorm van krachtvoeder zodat er geen organische stof wordt aangebracht.

Groenbedekkers kunnen niet alleen gebruikt worden voor het vasthouden van stikstof tijdens de winter, maar ook om het organische stofgehalte op peil te houden. Door de lage C/N ratio van de meeste groenbedekkers en de beperkte hoeveelheid moeilijk afbreekbaar materiaal, is de hoeveelheid aan effectief organische stof (EOS) die door deze gewassen geleverd wordt echter beperkt (Curtin et al., 2000). Uit onderzoek door Ninane et al. (1994) blijkt dat slechts bij een herhaaldelijke toediening van groenbedekkers (hier gele mosterd) aan de bodem de koolstofverliezen konden gecompenseerd worden. Vanaf dan steeg het organische stofgehalte, waarbij tevens het huminegehalte steeg, wat een indicatie is voor een toename van de meer stabiele organische koolstoffractie.

Omschakeling van akkerbouw naar **tijdelijk of permanent grasland** zorgt voor een enorme verhoging van het organische stofgehalte en vertegenwoordigt dus een van de meest efficiënte mogelijkheden voor het verhogen van het organische stofgehalte (Van Camp et al. 2004). Kortleven (1963) stelt dat in Nederland het organische stofgehalte onder grasland 2 tot 5 keer hoger was dan onder akkerbouw. Terwijl Romkens et al. (1999) stelden dat 9 jaar na conversie van akkerbouw naar grasland 90 % van het organische stofgehalte, dat was gemineraliseerd tijdens de 26 jaar monocultuur maïs, geregenereerd was en dat het risico op uitspoeling van opgeloste organische koolstof gedaald was.

Vaak wordt gesteld dat conversie van conventionele landbouw naar no-till (gecombineerd met specifiek management van oogstresten en bemesting) wereldwijd 0,6 tot 1,2 Gt/jaar aan C kan

opslaan in de bodem of 15 % van de totale hoeveelheid aan antropogene emissies (Lal, 2004). Uit een studie van D'haene et al. (2006) blijkt over het algemeen dat in België percelen onder **conserveringslandbouw** een duidelijke toename van het percentage aan organische stof in de bovenste bodemlagen (bovenste 10-15 cm) vertonen, maar meestal werd een lager percentage organische stof gevonden in de diepere lagen. De stijging van het organische stofgehalte in de bovenste bodemlagen is uiteraard van zeer groot landbouwkundig belang aangezien organische koolstof vooral in de bovenste lagen cruciale functies uitoefent (aggregaatvorming, tegengaan van verslemping en erosie, vrijstelling van nutriënten ...). Door het niet meer of ondieper bewerken van de bodem wordt het organisch materiaal dat toegevoegd wordt aan de bodem minder verdund en wordt de organische stof geconcentreerd daar waar ze van belang is.

Gezien de bemesting in de **biologische landbouw** nagenoeg uitsluitend organisch is, en er een groter aandeel (tijdelijk) grasland en groenbemesters/vanggewassen is, wordt er globaal gezien meer C in de bodem gebracht dan in de gangbare sector. Hoewel de resultaten van onderzoek hieromtrent niet steeds in dezelfde richting wijzen, is er toch een tendens voor globaal hogere organische koolstofgehalten in biologische bodems. Uit recent onderzoek blijkt dat biologische landbouwbedrijven in Vlaanderen gemiddeld een hoger organische stofgehalte hebben dan conventionele bedrijven en dat er meer bedrijven zijn met een hoog organische stofgehalte dan bij de conventionele bedrijven. Dit gehalte was positief gecorreleerd met de intensiteit van het management (hogere gehalten bij intensievere bemesting) (D'haene et al. 2006).

Hoe wordt koolstofbeheer het best aangepakt? Dat is het onderwerp van de brochure 'Organische stof: sleutel tot bodemvruchtbaarheid' en het handige computerprogramma 'KOOLSTOFSIMULATOR' uitgegeven door de dienst Land en Bodembescherming van de Vlaamse overheid (LNE, 2009a, 2009b) (www.lne.be/themas/bodem/organische-stof/organische-stof-sleutel-tot-bodemvruchtbaarheid). Je vindt er ook gegevens over de koolstofaanvoer door verschillende gewassen en meststoffen.

3 | Erosie

3.1 | Mechanismen van bodemerosie en sedimentaanvoer

Bodemerosie is het losmaken, de opname, het transport en de afzetting van bodemdeeltjes (sediment) door een bewegend agens, zoals water, wind en bodembewerking. Bodemerosiesnelheden worden uitgedrukt in ton/ha.jaar. Traditioneel onderscheidt men watererosie, winderosie (Van Kerckhoven et al., 2009) en massatransport (Van Den Eeckhaut et al., 2007). Onderzoek (Govers et al., 1994; Van Muysen et al., 2000) heeft aangetoond dat er ook een belangrijke bodemverplaatsing optreedt als gevolg van bodembewerkingen (bewerkingserosie). Bewerkingserosie kan gedefinieerd worden als de netto-hellingafwaartse beweging van bodemmateriaal die optreedt bij het mechanisch of manueel bewerken van de bodem op hellende percelen. Ten slotte is ook de export van bodemmateriaal door het oogsten van gewassen (Poesen et al., 2001) zoals aardappelen en suikerbieten, een actief bodemerosieproces in Vlaanderen. Hoewel bewerkingserosie en bodemexport door rooien in Vlaanderen in intensiteit minstens even belangrijke processen zijn als bodemerosie door het afstromen van regenwater, heeft dit laatste proces meer ingrijpende milieu-impacten aangezien een groot gedeelte van het losgemaakte sediment door het afstromend water terecht komt in beken en rivieren (Verstraeten et al., 1999).

Bodemerosie en sedimentaanvoer zijn verbonden met de thema's Verspreiding van pesticiden, Verspreiding van zware metalen en Kwaliteit van het oppervlaktewater. Sediment in de waterloop is ook een bron van verontreiniging, gelet op de rechtstreekse ongewenste effecten van een overmatige sedimentlading (dichtslibben beken, rivieren en wachtbekkens, ruimingsoperaties). Verder zullen agro-chemicaliën en andere contaminanten, afkomstig van huishoudelijk en industrieel afvalwater dat in de waterlopen wordt geloosd, zich hechten op de sedimentpartikels en via het sediment doorheen het riviersysteem verspreid worden.

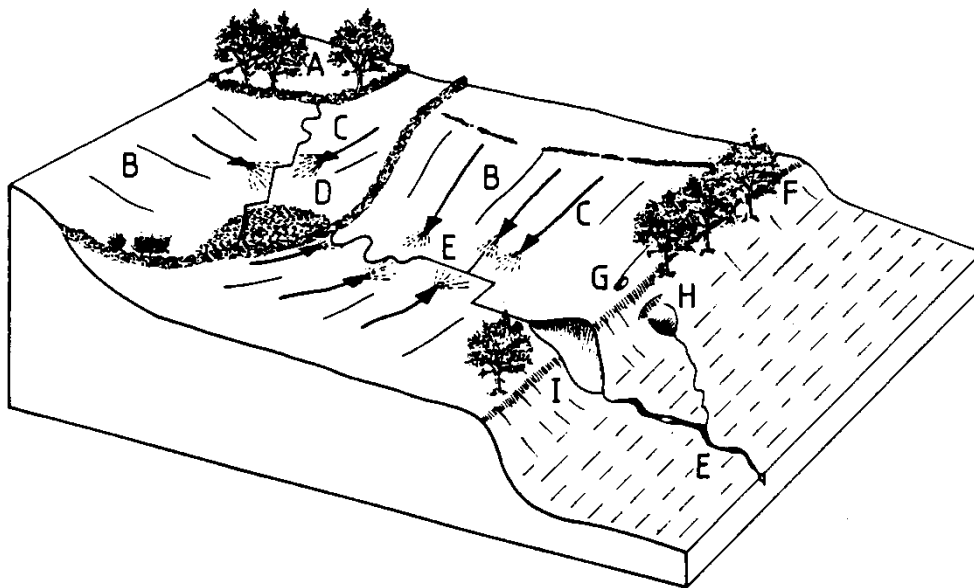
De mens heeft in Vlaanderen vooral via het bodemgebruik een grote invloed op het bodemerosieproces. Onder bos of weiland treedt er nagenoeg geen bodemerosie op, maar op akkerland kunnen de bodemverliezen dus aanzienlijk zijn. De impact van maatschappelijke activiteiten op bodemerosie en sedimentaanvoer vertaalt zich daarom uitsluitend in de evolutie van de erosiegevoeligheid van het agrarisch landgebruik. De sector landbouw heeft een aandeel van bijna 100 % in de erosiegevoeligheid van het totale landgebruik.

Afgezien van het feit dat landbouwactiviteiten vrijwel volledig voor het optreden van bodemerosie verantwoordelijk zijn, dient er ook op gewezen te worden dat beleidsmaatregelen met betrekking tot landbouw en/of open ruimte dikwijls onverwachte positieve of negatieve gevolgen hebben op bodemerosie. Zo werd de vervanging van boomgaarden door akkers in het Hageland gestimuleerd door de opening van de Europese markt, met een verhoging van het erosierisico tot gevolg. Ook de stimulering van de maïssteelt als voedergewas ging ten koste van het areaal weiland, met een verhoging van het erosierisico.

3.1.1 | Watererosie

Bodemerosie door water is de resultante van de interactie van 4 hoofdfactoren: erosiviteit van de neerslag, reliëf (hellingsgraad- en lengte), erosiegevoeligheid van de bodem en erosiegevoeligheid van het landgebruik of gewaserosiegevoeligheid. Bodemerosie is een proces dat ook in natuurlijke omstandigheden voorkomt maar de erosiegevoeligheid van het agrarisch landgebruik kan met een factor 100 tot 1 000 toenemen door agrarische activiteiten. Figuur 4 geeft de meest voorkomende bodemerosieprocessen door water weer.

Figuur 4: Illustratie van de meest voorkomende bodmerosieprocessen door water



A = productie van oppervlakkige afvoer (Hortonianse afvoer) als gevolg van bodemverdichting; B = intergeulerosie; C = geulerosie; D = colluvium; E = tijdelijk ravijn; F = berm; G = pijpingang; H = pijpuitgang; I = bermravijn

Bron: Poesen et al. (1996)

Intergeulerosie is een erosievorm die optreedt wanneer de impact van vallende regendruppels het voornaamste proces is dat bodemmateriaal losmaakt. Dit leidt tot een laagsgewijze erosie die bijna niet detecteerbaar is. Geulerosie treedt op wanneer afstromend water het voornaamste losmaakagens is. Dit leidt tot de vorming van kleine, uitgeschuurde kanaaltjes. Indien de uitgeschuurde kanalen niet langer door normale landbouwbewerkingen kunnen worden weggewerkt (dwarsdoorsnede $>930 \text{ cm}^2$) spreekt men van ravijnerosie.

Een gedeelte van de geërodeerde bodemdeeltjes wordt stroomafwaarts terug afgezet op het land. Maar door het afstromend water komt ook een gedeelte van de losgemaakte bodemdeeltjes terecht in beken, rivieren en wachtbekkens. De sedimentaanvoer uit een stroomgebied is de hoeveelheid bodemmateriaal die in een stroomgebied wordt losgemaakt en getransporteerd tot aan een waterloop. De absolute sedimentaanvoer van een stroomgebied wordt uitgedrukt in ton.j^{-1} . De oppervlakte-specifieke sedimentaanvoer van een stroomgebied wordt uitgedrukt in $\text{ton.ha}^{-1}\text{j}^{-1}$. De sedimentaanvoer-ratio van een stroomgebied (sediment delivery ratio) is de verhouding van de hoeveelheid bodemmateriaal die door de waterlopen wordt afgevoerd ten opzichte van de totale hoeveelheid bodemmateriaal die door watererosieprocessen in het stroomgebied wordt losgemaakt. De sedimentaanvoer-ratio is afhankelijk van de dichtheid van het drainage-netwerk en de ruimtelijke configuratie van het landgebruik en de topografie.

De gevolgen van bodmerosie door water situeren zich dus zowel lokaal als stroomafwaarts. Lokaal leidt bodmerosie tot een verlies van de vruchtbare bodemtoplaag en een vermindering van de gewasopbrengsten. Stroomafwaarts veroorzaakt sedimentaanvoer problemen in verband met de bevaarbaarheid van waterlopen en vermindert het bufferend vermogen van rivieren en wachtbekkens, waardoor de kans op overstromingen toeneemt. Bovendien maken de pollutanten en nutriënten die op de geërodeerde bodemdeeltjes gefixeerd zijn, en die zowel van het akkerland (bv. fosfaten) als van lozingen van huishoudelijk en industrieel afvalwater afkomstig zijn (bv. zware metalen), de opruiming van vervuilde waterbodems door de waterloopbeheerder moeilijker. De wetgeving VLAREBO (Vlaams reglement betreffende de bodemsanering en de bodembescherming) en VLAREA (Vlaams reglement betreffende afvalvoorkoming en -beheer), bepalen dat het ruimen van waterbodems met de nodige zorg en dus kosten moet gebeuren.

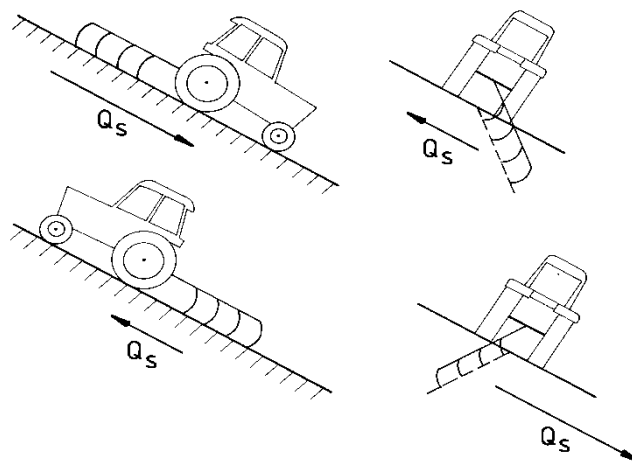
Watererosie in gematigde klimaten is inherent verbonden aan akkerlandbouw. Er zijn dan ook indicaties dat er reeds significante (zij het wellicht eerder lokale) erosie optrad in het Neolithicum. De voortdurende schaalvergroting in de landbouw heeft sinds WO II geleid tot grotere landbouwpercelen

in Vlaanderen waardoor de debieten van het afstromend water steeds groter werden. Algemeen wordt aangenomen dat het gemiddeld jaarlijks bodemverlies door water en de sedimentaanvoer naar waterlopen in Vlaanderen sinds de jaren 60 sterk is toegenomen. De toename van de perceelgrootte wordt ook gedeeltelijk gecompenseerd doordat sinds de Tweede Wereldoorlog de steilste percelen veelal omgezet zijn naar bos of weiland (Van Oost et al., 2000).

3.1.2 | Bewerkingserosie

Bewerkingserosie resulteert uit het verplaatsen van bodemmateriaal door landbouwwerktuigen: bij het ploegen van een hellend perceel worden grote hoeveelheden bodemmateriaal verplaatst. Gewoon ploegen leidt tot het keren van de gehele bouwlaag of van circa 4 000 ton ha⁻¹ bodemmateriaal. Deze verplaatsing is nooit volledig in verticale zin: er treden ook laterale verplaatsingen op. Wanneer een hellend perceel geploegd wordt zal de netto-verplaatsing in hellingafwaartse zin steeds groter zijn dan de verplaatsing in hellingopwaartse zin (Figuur 5, Govers et al., 1994). Het gevolg hiervan is dat het landschap als het ware wordt afgeschaafd: er treedt netto-bodemverlies op op de convexiteiten ('ruggen') en aan de hellingafwaartse kant van perceelgrenzen. In concaviteiten ('kommen') en aan de hellingopwaartse kant van perceelgrenzen wordt dan weer bodemmateriaal afgezet.

Figuur 5: Illustratie van het principe van bewerkingserosie: zowel bij het bewerken in hellingop- en hellingafwaartse richting als bij het bewerken volgens de hoogtelijnen is de verplaatsing in hellingafwaartse zin groter dan in hellingopwaartse zin



Bron: Govers et al. (1994)

De herverdeling van bodemmateriaal die door bewerkingserosie veroorzaakt wordt leidt tot herverdeling van organische stof en nutriënten in het perceel, waarbij er zones kunnen ontstaan die relatief verarmd zijn, terwijl er zich in andere zones een teveel aan nutriënten accumuleert (Van Oost et al., 2005). Verder kan de lokale intense erosie van de bouwlaag op de eroderende gedeelten leiden tot een verlaging van de bodemkwaliteit en dus ook tot een verminderde functionele capaciteit: gewasopbrengsten, maar bijvoorbeeld ook bufferend en filterend vermogen van de bodem kunnen mogelijk afnemen.

Bewerkingserosie is sterk afhankelijk van bewerkingsdiepte en -snelheid (Van Muysen et al., 2000). Deze zijn sinds WO II beide zeer sterk toegenomen en er mag van uitgegaan worden dat de intensiteit van deze bewerkingen tussen 1945 en 1995 ongeveer verdrievoudigd zijn. Sindsdien is de intensiteit van bewerking niet meer verder toegenomen. De toename in bewerkingsintensiteit wordt ten dele gecompenseerd door de toename van de perceelgrootte: deze leidt immers tot een reductie van de totale lengte aan perceelgrenzen en bijgevolg tot het verdwijnen van de bewerkingserosie aan de hellingafwaartse zijde van deze grenzen.

3.1.3 | Bodemverlies door het rooien van gewassen

Bodemverlies door het rooien van gewassen (BRG) is een bodemerosieproces dat optreedt bij gewassen waarvan het opbrengstdeel (gedeeltelijk) onder de grond groeit, zoals suikerbieten, aardappelen, chicoreiwortelen, penen en prei (afgekort als BRG-gewassen). Tijdens het rooien blijven bodemdeeltjes aan het gewas kleven en kunnen bodemkluiten en stenen door de rooimachine worden opgepakt. Wanneer de rooimachine deze aanhangende bodemdeeltjes, bodemkluiten en stenen niet van het gewas kan scheiden, worden ze samen met het gewas van het veld geëxporteerd, wat dus een bodemverlies betekent voor het perceel waar het gewas werd geteeld. BRG is gedefinieerd als massa ovendroge bodem en wordt uitgedrukt in $\text{ton} \cdot (\text{ton netto opbrengst})^{-1}$, $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{oogst}^{-1}$ en $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jaar}^{-1}$. Deze laatste eenheid drukt een gemiddeld bodemverlies uit voor een bepaalde teeltrotatie. Het bodemmateriaal dat tijdens de oogst van de akker wordt geëxporteerd kan op verschillende plaatsen terechtkomen, zoals op een perceelrand waar de oogst eventueel tijdelijk opgeslagen wordt, het landbouwbedrijf (vb. indien het gewas daar gereinigd wordt), wasbedrijven, gewasverwerkende bedrijven en de consument.

Op de akkers leidt BRG tot een vermindering van de bodemkwaliteit door een verlies van de vruchtbare bodemtoplaag wat op zijn beurt kan leiden tot een vermindering van gewasopbrengsten. BRG heeft hiernaast nog een aantal andere gevolgen voor de economie en het milieu die te maken hebben met het transport van de bodem, het reinigen van het gewas, het laten bezinken van sediment in bekkens en het afzetten van de bodem.

BRG is afhankelijk van tijdsafhankelijke factoren zoals rooitechnieken, het percentage akkerland dat voor wortelgewassen gebruikt wordt en de gewasopbrengst. Voornamelijk omwille van de mechanisatie stegen bodemverliezen door rooien in België van $0,4 \text{ ton} \cdot (\text{ha} \cdot \text{jaar})^{-1}$ in 1846 tot $2,4 \text{ ton} \cdot (\text{ha} \cdot \text{jaar})^{-1}$ in de jaren 70 en begin de jaren 80 van de vorige eeuw waarna de jaarlijkse bodemverliezen terug begonnen te dalen tot $1,8 \text{ ton} \cdot (\text{ha} \cdot \text{jaar})^{-1}$ in 2003 (Ruysschaert, 2005).

3.2 | Gevolgen van erosie

3.2.1 | Verlies aan bodemkwaliteit

Erosie draagt op verschillende wijzen bij tot een vermindering van de bodemkwaliteit. Vermits het hoofdzakelijk de toplaag is die wordt geërodeerd, treedt er verlies op van nutriënten en organische stof. Het verlies aan organische stof dient echter genuanceerd te worden: de schaarse gegevens die beschikbaar zijn tonen aan dat de begraving van organische stof in afzettingsgebieden (colluviale hellingen, riviervalleien) én de aanmaak van nieuwe organische stof op geërodeerde plaatsen het verlies aan organische stof door netto-export en mineralisatie meer dan compenseren (Van Oost et al., 2005). De totale hoeveelheid organische stof daalt dus niet noodzakelijk onder invloed van erosieprocessen: wel kunnen binnen landbouwpercelen zones ontstaan die duidelijk verarmd zijn aan organisch materiaal.

Erosie leidt ook tot een verminderde diepte van het bewortelbare profiel en van het vermogen van de bodem om water op te slaan voor de planten. Deze effecten kunnen de gewasproductiviteit aantasten: in een moderne, intensieve landbouw op diepe bodems zijn deze effecten echter vrij beperkt en geen directe bedreiging voor de voedselproductie. Uit een meta-studie concludeerden Bakker et al. (2004) dat een bodemverlies van 0,1 m gemiddeld leidde tot een productiviteitsverlies van 4 %. Erosiewaarden in Vlaanderen bedragen op perceelniveau maximaal circa $10\text{-}30 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jaar}^{-1}$, wat neerkomt op een verlies van 0,0007 tot $0,0022 \text{ m} \cdot \text{jaar}^{-1}$. Op dergelijke percelen komt dit dus neer op een rendementsverlies van circa 0,03 tot 0,09 % per jaar. Op de meeste percelen zal het direct verlies aan rendement echter veel kleiner zijn.

De relevantie van deze ogenschijnlijk zeer kleine verliezen hangt af van de tijdschaal die men beschouwt: bovenstaande berekeningen maken duidelijk dat op korte tot middellange termijn bodemverliezen weinig impact zullen hebben op landbouwrendementen. Er dient echter rekening gehouden worden met het feit dat het bodempatrimonium onvervangbaar is: op lange termijn kunnen relatief kleine rendementsverliezen toch een bedreiging vormen voor de landbouwproductiviteit. Zo leidt het geen twijfel dat de zeer lage productiviteit van vele landbouwgebieden in het Middellandse Zeebekken mede veroorzaakt wordt door de schade aan het bodempatrimonium veroorzaakt door millennia van water- en bewerkingserosie.

3.2.2 | Verlies aan archeologisch en landschappelijk patrimonium

Erosie leidt tot het verdwijnen van de bovenste bodemhorizonten én dus ook van de archeologische resten die er eventueel in bewaard zijn. Verder is een bodem ook een archief van landschappelijke veranderingen, veroorzaakt door klimaat en/of menselijke activiteiten. Erosie kan er voor zorgen dat deze archieffunctie van de bodem in belangrijke mate aangetast wordt. De kosten hiervan kunnen onmogelijk begroot worden: zij hebben zowel betrekking op het vaste patrimonium (overblijfselen) dat verloren gaat als het verlies van middelen om inzicht te verwerven in de spreiding en leefwijze van pre- en protohistorische samenlevingen.

3.2.3 | Sedimentaansvoer naar Vlaamse waterlopen

De aansvoer van sediment naar de waterlopen leidt onder andere tot de dichtslibbing van wachtbekkens en slibvangen, vaak al in een termijn van enkele jaren, met frequente ruiming tot gevolg die een belangrijke natuurverstoring inhouden. Het bergen van grote slibvolumes zorgt voor een bijkomende verstoring van het landschap. Op basis van gemeten sedimentvolumes in 20 wachtbekkens kan een gemiddelde jaarlijkse sedimentopslag in de 100 tot 150 wachtbekkens in heel Vlaanderen voorzichtig geschat worden op 100 000 tot 200 000 ton (Verstraeten, 2000). Niet alleen wachtbekkens maar ook rivieren slibben langzaam dicht in Vlaanderen. De totale aansvoer van slib naar rivieren en wachtbekkens wordt immers geschat op circa 360 000 ton (Beel et al., 2006). Een gedeelte van het sediment dat naar de waterlopen wordt aangevoerd wordt er ook afgezet. Vlaanderen heeft door het niet tijdig ruimen van dit sediment een behoorlijke baggerachterstand opgelopen. In 1999 werd de totale hoeveelheid te baggeren slib in de Vlaamse bevaarbare en onbevaarbare waterlopen 1^e categorie geschat op 27,6 miljoen m³ wat een totale kostprijs vertegenwoordigde van 305 miljoen euro (Cauwenberghs, 2000). Aangezien het sediment in de waterlopen wordt gemengd met afvalwater van huishoudens en industrie, zal ook een aanzienlijk deel van het sediment worden vervuild. Dit maakt het ruimen en storten van dit sediment nog aanzienlijk duurder.

3.2.4 | Belasting van oppervlaktewater met nutriënten en contaminanten

Het door erosie afgevoerde sediment bevat ook nutriënten en contaminanten. Voor wat betreft nutriënten is fosfor waarschijnlijk het belangrijkste omdat dit sterk op het sediment gefixeerd is. Experimentele metingen hebben aangetoond dat ongeveer 50 % van de totale fosfor-input in de Dijle stroomopwaarts van Leuven te wijten is aan erosie. Deze hoge nutriëntentoevoer kan bijdragen tot de eutrofiëring van zoetwater-ecosystemen.

De voornaamste contaminanten die via het sediment in de waterlopen terechtkomen zijn metalen en residu's van landbouwchemicaliën. De aansvoer van landbouwchemicaliën door erosie is bijzonder moeilijk te kwantificeren: het gaat immers om zeer lage concentraties die bovendien zeer sterk variëren in ruimte en tijd.

3.3 | Maatregelen

In het verleden bleef de aanpak van bodemerosie vaak beperkt tot het stroomafwaarts bestrijden van water- en modderoverlast, via het bouwen van wachtbekkens, het plaatsen van roosters in de weg, het verhogen van de waterloop- en rioolcapaciteit, enz. Die symptoomgerichte aanpak helpt uiteraard niet om bodemerosie, en dus bodemdegradatie, op akkers te voorkomen. Om de bodem op zich te beschermen en al zijn functies zoveel mogelijk te bewaren, zijn meer brongerichte maatregelen nodig.

De wijze waarop de mens kan ingrijpen op de factoren die bodemerosie veroorzaken, is sterk plaatsafhankelijk. Daarbij moet rekening gehouden worden met de lokale fysische, technische en sociaal-economische randvoorwaarden.

Deze titel is gebaseerd op de brochure Erosie in Vlaanderen - 2011 (LNE, 2011)

3.3.1 | Teelttechnische maatregelen in de landbouw

Teelttechnische maatregelen om bodemerosie te voorkomen, zijn landbouwpraktijken die bijdragen tot de vorming van een goede bodemstructuur; de ruwheid van het bodemoppervlak vergroten en de bodem zo veel en zo lang mogelijk bedekt houden.

Landbouwpraktijken die bijdragen tot de vorming van een goede bodemstructuur

Het organische stofgehalte verhogen via een verhoogde toevoer en/of een verminderde afbraak of afvoer van organische stof, door onder meer:

- organische bemesting toe te dienen, bij voorkeur stalmest en compost;
- graangewassen op te nemen in de teeltrotatie en stro in te werken;
- korrelmaïs op te nemen in de teeltrotatie in plaats van snijmaïs, zodat meer gewasresten ter plaatse blijven;
- groenbedekkers op te nemen in de teeltrotatie, zoals gele mosterd en phacelia;
- tijdelijk grasland op te nemen in de teeltrotatie (wisselbouw);
- akkerland om te zetten in meerjarig of permanent grasland;
- niet-kerende bodembewerking, niet-ploegen en directe inzaai.

De bodem-pH optimaliseren door bekalking.

Bodemverdichting voorkomen door onder meer:

- trekkers en machines te voorzien van lage drukbanden met breed draagvlak;
- het aantal werkgangen te beperken door gebruik van combinatiemachines;
- percelen te bewerken in droge omstandigheden;
- gebruik te maken van vaste rijpaden.

Deze landbouwpraktijken zijn ook gunstig voor het bodemleven. Het bodemleven, van microscopisch klein (bacteriën en schimmels) tot grotere insecten en wormen, speelt een rol bij het verkleinen van organisch materiaal, het vrijmaken van nutriënten uit organische stof (mineralisatie), het opbouwen van stabiele organische stof (humificatie) en het verkrijgen van een goede bodemstructuur. Het bodemleven is essentieel voor de bodemkwaliteit en de opbrengst van een landbouwperceel.

Landbouwpraktijken die de ruwheid van het oppervlak vergroten

- **Het zaaibed zo grof mogelijk** klaarleggen, aangepast aan de algemene weersomstandigheden en aan het zaaitijdstip.
- **Oppervlakkige insporing wegwerken** door een ganzenvoet of triltand achter de wielen te monteren.
- **De bodem bewerken na de oogst** om verslemping en/of verdichting op te heffen, zodat de oppervlakteruwheid en de infiltratiecapaciteit van de bodem opnieuw toenemen. Eventueel kan het nodig zijn de ploegzool te breken met een diepwoeler. Let wel, deze maatregel heeft slechts een kortetermijneffect en draagt niet bij tot de opbouw van een goede bodemstructuur op lange termijn. Een mechanisch losgemaakte bodem is weinig stabiel, zodat de kans op verdichting bij een volgende werkgang reëel blijft. In ieder geval mag de bodem enkel bewerkt worden in droge omstandigheden, zo niet werkt men verdichting juist in de hand. Als de gewasresten van de voorgaande teelt een goede bescherming van het bodemoppervlak bieden, wordt bij voorkeur in het voorjaar geploegd.
- **Contourbewerking:** Als men de bodem loodrecht op de hellingrichting bewerkt, komen de door het ploegen gevormde 'voren' en 'ruggen' dwars op de helling te liggen en wordt het water minder gemakkelijk hellingafwaarts getransporteerd. Het water in de 'voren' wordt namelijk opgehouden door de 'ruggen', die fungeren als kleine dammetjes. Contourbewerking houdt echter steeds het risico in dat bij hevige neerslag het water over de 'ruggen' heen kan stromen, en dat zo het effect

van lokale berging verloren gaat. Naarmate de helling steiler is, is dit risico ook groter en is contourbewerking minder zinvol.

- **Drempeltjes:** Ruggenteelt, zoals bij aardappelen, houdt een groot risico in op geulvorming in de voren en op doorbraak van de ruggen in droge valleien. Drempels in de voren tussen de ruggen kunnen hier nuttig zijn. Hierdoor wordt de afstroming in de voren geremd en krijgt het water meer kans om in de bodem te infiltreren. Voor het toepassen van deze techniek werden recent speciale werktuigen ontwikkeld die drempels vormen tijdens het aanaarden.

Landbouwpraktijken die een maximale gewasbedekking realiseren

- Teelten vermijden die de bodem niet goed bedekken tijdens het late voorjaar en/of de zomer, wanneer de meest intense regenbuien verwacht worden. Voorbeelden hiervan zijn groenten, maïs, chicorei, aardappelen, bieten en zomergranen.
- Het dubbel inzaaien van granen in droge valleien, waar het water geconcentreerd afstroomt.
- Een groenbedekker voorzien om ook in het najaar en tijdens de winter bescherming te bieden.
- Gewasresten zoveel mogelijk aan het oppervlak bewaren door minimale bodembewerking of directe inzaai: bij niet-kerende bodembewerking, niet-ploegen en directe inzaai blijven de gewasresten van de tussenteelt (groenbedekker) of van de laatste oogst grotendeels aan de oppervlakte bewaard.

3.3.2 | Erosiebestrijdingswerken

Erosiebestrijdingswerken zijn ingrepen in het landschap om afstromend water en sediment te geleiden, op te vangen en vertraagd af te voeren. Om water- en modderoverlast brongericht aan te pakken, worden de maatregelen zo hoog mogelijk in het stroomgebied aangelegd. Sommige maatregelen grijpen ook in op het bodemerosieproces zelf door het vertragen van afstromend water en het bevorderen van infiltratie.

De voornaamste maatregelen zijn:

- grasbufferstroken en grasgangen;
- kleine landschapselementen;
- dammen in diverse maten en materialen;
- bufferbekkens en buffergrachten.

De 'Code van goede praktijk Erosiebestrijdingswerken' bevat een gedetailleerde beschrijving van het ontwerp en de uitvoering van deze erosiebestrijdingswerken, op basis van de meest actuele kennis en praktijkervaring (www.vlaanderen.be/erosiebestrijding).

3.3.3 | Landinrichtingsmaatregelen

Landinrichtingsmaatregelen zijn maatregelen die ingrijpen op de vorm, grootte en oriëntatie van de kavels en op het landgebruik. Ze omvatten onder meer:

- herverkaveling;
- strokenbouw;
- wisselbouw;
- behoud en aanleg van strategisch gelegen grasland;
- behoud en herstel van bestaande bossen en bebossing van landbouwpercelen.

Deze maatregelen maken deel uit van een gebiedsgerichte en geïntegreerde aanpak van water- en modderoverlast. Ze kunnen onder andere via ruilverkavelings- en landinrichtingsprojecten ingezet worden. Landinrichtingsmaatregelen gaan hand in hand met grasbufferstroken, grasgangen, kleine landschapselementen, dammen, bufferbekkens en buffergrachten, en andere infrastructurele maatregelen. Zo kan het plaatsen van een wegrooster of de aanleg van een wegdrempel er voor zorgen dat afstromend water van de weg wordt geleid, naar bijvoorbeeld een opvangsysteem.

3.3.4 | Geïntegreerde aanpak

Bodemerosie moet voldoende (h)erkend worden en de oorzaken ervan moeten goed geanalyseerd en geïnterpreteerd worden. Pas dan kan men het probleem aanpakken. Om goede resultaten te bereiken, is een geïntegreerde aanpak nodig. Een dergelijke aanpak bestaat uit het combineren van maatregelen op verschillende niveaus, gaande van teelttechnische maatregelen tot erosiebestrijdingswerken en landinrichtingsmaatregelen.

Via teelttechnische maatregelen kan men het proces van infiltratie, afstroming en bodemerosie beïnvloeden. Deze maatregelen zijn het meest brongericht en kunnen in principe op grote oppervlakten worden toegepast. Aandacht en respect voor de bodem als essentiële maar kwetsbare productiefactor, zijn noodzakelijk om duurzaam aan landbouw te kunnen doen. Kennis en ervaring zijn van cruciaal belang voor het vakkundig toepassen van bodembeschermende technieken. Daarom maken ook kennisoverdracht en sensibilisatie deel uit van een geïntegreerde aanpak. Teelttechnische maatregelen kunnen extra kosten met zich meebrengen. Voor bepaalde van deze maatregelen worden die kosten (deels) vergoed door de overheid.

4 | Bodemverdichting

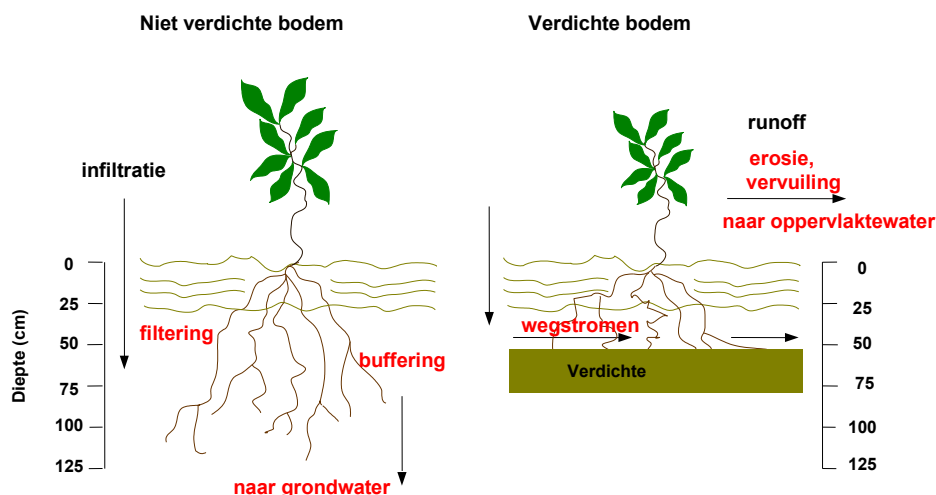
4.1 | Mechanismen van bodemverdichting

4.1.1 | Beschrijving van de verstoring

De bodemstructuur is de onderlinge rangschikking en samenhang van vaste bodemdeeltjes. Samenhangende bodemdeeltjes die met organische stof (OS) een stabiele structuur vormen, worden ook aggregaten genoemd. Deze liggen min of meer los van elkaar. Tussen en in de aggregaten zitten poriën, die lucht en water kunnen bevatten. De microporiën zijn in staat water vast te houden en de macroporiën zijn meestal gevuld met lucht. Bij een goede bodemstructuur wordt in natte perioden overtollig water snel afgevoerd en blijft er voor droge perioden voldoende water achter. De bodemstructuur is zeer belangrijk voor een goede plantengroei. De ideale bodem is niet te vast, zodat de wortels er goed in kunnen doordringen, het overtollige water kan afgevoerd worden en er voldoende zuurstof is voor wortelgroei en voor de opname van water en nutriënten door de wortels, terwijl de door de plantenwortels geproduceerde koolstofdioxide kan worden afgevoerd. De ideale bodem is niet te los, zodat hij voldoende water kan vasthouden en de nutriënten niet te snel uitspoelen (Vandergeten & Roisin, 2004 en Shepherd et al., 2008).

Bij verdichting wordt de bodem samengedrukt en vervormd, waardoor de totale en luchtgevulde hoeveelheid poriën daalt (Figuur 6). Allereerst worden de macroporiën dichtgedrukt en in tweede instantie de kleinere microporiën. Dit resulteert zowel in een afname van het volume aan macroporiën als een onderbreking van de continuïteit ervan. Verdichting kan zich vormen door natuurlijke omstandigheden maar ontstaat echter vaak onder menselijke invloed. De gevoeligheid van een bodem voor verdichting hangt af van de textuur, schijnbare dichtheid en weersomstandigheden: hoe natter de bodem, hoe fijner de textuur en hoe lager de dichtheid, hoe meer vatbaar een bodem is voor verdichting. Versmering kan een belangrijke aanleiding vormen voor latere verdichting. Ook de impact van verdichting op gewasgroei en omgeving is zeer weersafhankelijk, met de grootste gevolgen gedurende opvallend droge of natte jaren (Poesen et al., 1996; Esteve et al., 2004; Jones et al., 2004 en Reubens et al., 2010).

Figuur 6: Beperking van de wortellengte en toename aan erosie door diepe verdichting van de bodem



Bron: Jones et al. (2004)

Een onderscheid wordt gemaakt tussen oppervlakkige bodemverdichting en diepe bodemverdichting of ondergrondverdichting (Figuur 6). De eerste vorm heeft op korte termijn een grotere impact, maar naar duurzaam bodemgebruik toe, wordt vooral ondergrondverdichting als problematisch beschouwd.

Zelfs bij een eenmalige verstoring kan de verdichting voor tientallen jaren aanwezig blijven en voor opbrengstderving zorgen (Ide, 1985; Jones et al., 2004 en Reubens et al., 2010).

4.1.2 | Meting van de verstoring

Landbouwers zijn zich vaak heel bewust van de fysische kwaliteit van hun bodems door een gedetailleerde kennis van hun percelen en het gebruik van hun zintuigen. Kwalitatieve veldmethoden – bijvoorbeeld ‘soil health cards’ (Romig et al., 1996) en ‘visual soil assessment’ (VSA) (Shepherd, 2000) – werden ontwikkeld zodat de landbouwers zonder opleiding hun bodems kwalitatief kunnen beoordelen door de bodem te bekijken, voelen en/of ruiken. Daarnaast zijn er nog semi-kwantitatieve veldtestkits – bijvoorbeeld ‘soil quality test kit’ (NCRS, 1999) en testkit bodemkwaliteit (Koopmans & Brandt, 2001) – ontwikkeld om op de percelen metingen te doen.

De schijnbare dichtheid kan zowel in het labo als met veldmethoden gemeten worden en is een directe maat van bodemverdichting (Koopmans & Brandts, 2001). Schijnbare dichtheid is de droge massa per eenheidsvolume bodem in zijn onverstoorde natuurlijke toestand en hangt naast de textuur hoofdzakelijk af van het organische stofgehalte in de bodem: hoe hoger dit gehalte, hoe lager de schijnbare dichtheid. Voor leem- en kleibodems varieert de schijnbare dichtheid van $1,1 - 1,6 \text{ g cm}^{-3}$, voor zandige texturen van $1,3 - 1,7 \text{ g cm}^{-3}$ en voor compacte lagen van $1,7 - 2 \text{ g cm}^{-3}$ (Coorevits, 2009).

Voor akker- en tuinbouwbodems met een organische stofgehalte lager dan 4 % zijn er grenswaarden voor wortelgroei opgesteld. Bij zandbodems treedt de belemmering van de wortelgroei pas bij $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ op, terwijl de groei bij leem- en kleibodems al bij $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ bemoeilijkt wordt. Opdat de bodem nog voldoende draagkracht zou hebben, is de minimumwaarde voor zandbodems $1,4 \text{ g cm}^{-3}$. Voor leem- en kleibodems ligt dit minimum op $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ (Koopmans & Brands, 2001).

Uit de schijnbare dichtheid en de dichtheid (i.e. de verhouding tussen de massa en het volume van de vaste bestanddelen en wordt bij minerale bodems $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ genomen) van de bodem, kan het totaal poriënvolume berekend worden. Het totaal poriënvolume geeft een indicatie van de verhouding tussen vast materiaal, lucht en water in de bodem. Een te laag totaal poriënvolume is een indicatie voor bodemverdichting. Het poriënvolume moet minimum 40 % zijn. Bij een laag poriënpercentage kan het zuurstofgehalte te laag en de penetratieweerstand te hoog zijn. Een te laag totaal poriënvolume komt vaak voor in kleibodems en is vooral bij teelten met dikkere wortels (vb. maïs, ui of prei) een probleem (van den Akker & de Groot, 2008).

De verkruijmelbaarheid geeft het gemak aan waarmee de bodem zich laat verkruijmel en kan door de landbouwer in het veld bekeken worden (Figuur 7). Door de verkruijmelbaarheid van de bodem te bepalen, krijg je een idee van de dichtheid en zodoende de doorwortelbaarheid, de bewerkbaarheid en de toegankelijkheid van de bodem voor het bodemleven. Bij heel droge kleiige gronden kan de verkruijmeling zo slecht worden dat de grond wel beton lijkt. Een natte grond kan zo plastisch worden dat versmering optreedt. Een bodem met een goede structuur heeft minimum 25 % kruijmel (aggregaatjes $<1 \text{ cm}$), met een optimum van 100 %. Scherpblokkige structuurelementen zijn afwezig. De meeste structuurelementen zijn afgerond (Koopmans & Brands, 2001).

Figuur 7: Visuele voorstelling van structuurelementen voor een klei-, leem- en zandtextuur - bovenaan: 'goede' structuur: afgerond blokkige elementen - onderaan: 'slechte' structuur: scherpblokkige elementen



Bron: Danckaert & Delanote (2007)

De penetratieweerstand geeft de drukweerstand van de bodem voor wortelpenetratie. Vaak wordt aangenomen dat de gemiddelde weerstand die wortels nog kunnen weerstaan tussen 25 en 30 bar ligt. Toch is deze maximale grenswaarde gewas- en perceelafhankelijk en vaak is een weerstand van 30 tot 40 bar ook nog goed doorwortelbaar. Wormgangen en andere macroporiën kunnen door de wortels gebruikt worden, zodat in dergelijke situaties een groeiremming van de wortels pas bij 40 tot 50 bar plaatsvindt (Coorevits, 2009). Het gebruiken van een prikstok geeft een snel idee over de aanwezigheid van een verharde laag in het bodemprofiel (Shepherd et al., 2008).

Gevoeligheids- en risicokaarten

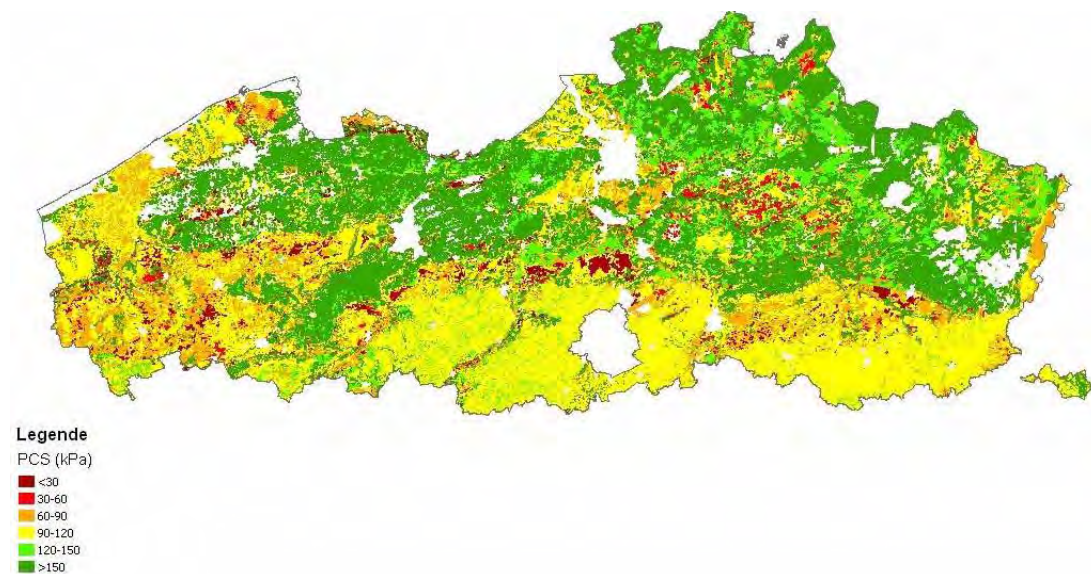
In een verkennende studie rond bodemverdichting werden gebiedsdekkende gevoeligheids- en risicokaarten voor Vlaanderen gemaakt. De 'precompressiestress' (PCS) werd als maat voor de structurele sterkte van een bodem en als indicator voor de gevoeligheid van een bodem voor verdichting genomen. De mate waarin de bodem reageert op mechanische stress, dit wil zeggen de gevoeligheid van de bodem voor verdichting, is afhankelijk van de sterkte van de bodem. Sommige bodems zijn voldoende sterk om te kunnen weerstaan aan alle te verwachten belastingen, terwijl andere bodems zo zwak zijn dat ze zelfs onder een lichte belasting reeds verdicht worden. Zolang de verticale spanningen in de bodem – resulterend uit de op de bodem uitgeoefende mechanische drukken – de PCS-waarde niet overschrijden, reageert de bodem elastisch. Een overschrijding van deze waarde impliceert echter een blijvende en dus plastische vervorming. De PCS wordt dan ook beschouwd als die druk waarbij de vervorming van de bodem overgaat van 'klein, elastisch en omkeerbaar' naar 'plastisch en bijgevolg onomkeerbaar'. Bodemverdichting treedt op wanneer de druk op zekere diepte groter is dan de PCS. Onder dezelfde klimaatcondities en bij hetzelfde landgebruik zullen de PCS-waarden variëren onder invloed van bodemtextuur, de mate van aggregaatvorming en de matrixpotentiaal. Bij een toename van het vochtgehalte daalt de sterkte van de ondergrond, en dus ook de PCS (Van de Vreken et al., 2009).

Er zijn verschillende klassen van PCS (Van de Vreken et al., 2009):

- zeer lage gevoeligheid voor verdichting: >150 kPa;
- lage gevoeligheid voor verdichting: 120-150 kPa;
- matige gevoeligheid voor verdichting: 90-120 kPa;
- hoge gevoeligheid voor verdichting: 60-90 kPa;
- zeer hoge gevoeligheid voor verdichting: 30-60 kPa;
- extreem hoge gevoeligheid voor verdichting: <30 kPa.

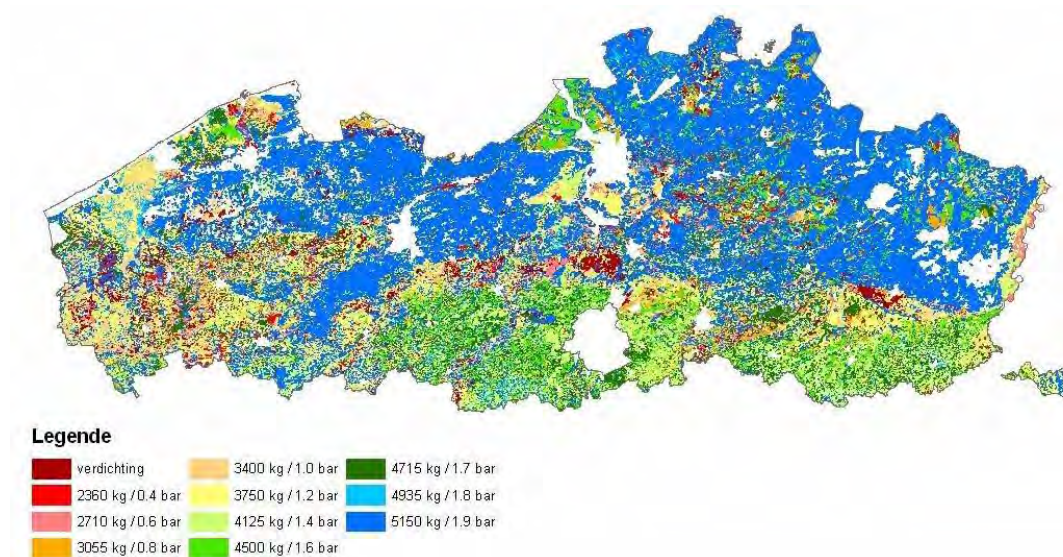
Voor de gevoeligheidskaarten (vb. in Figuur 8) werd telkens het Vlaanderen-dekkende deel van de bodemkaart van België gebruikt als ruimtelijke basis en werd de PCS op 41 cm diepte gehanteerd als indicator voor gevoeligheid. In gebieden met de laagste grenswaarde (<30 kPa) is de kans op verdichting heel groot. Die gebieden staan dan ook op de risicokaart (Figuur 9) als verdicht aangeduid. De risicokaarten geven de grensbelasting aan die mag uitgeoefend worden op een bodemkaartenheid (gekaracteriseerd voor een gegeven diepte met een welbepaald horizont) om een bepaalde structurele sterkte (uit de gevoeligheidskaart) niet te overschrijden. De grensbelasting is daarbij berekend voor een aantal combinaties van wiellasten en bandenspanningen (Van de Vreken et al., 2009).

Figuur 8: Gevoeligheidskaart voor bodemverdichting in Vlaanderen uitgedrukt als de berekende waarde van de structurele sterkte bij pF 2,5 (drogere grond) van het meest waarschijnlijke horizont per kaartenheid waardoorheen het 41 cm-dieptevlak loopt



Bron: Van de Vreken et al. (2009)

Figuur 9: Risicokaart voor bodemverdichting in Vlaanderen, uitgedrukt als de maximale wiellast (in kg) bij de door de bandenfabrikant aangeraden optimale bandenspanning (in bar) voor een typische tractorband (480/80R42), die de structurele sterkte uit de gevoeligheidskaart, berekend bij pF 2,5 (drogere grond) op een diepte van 41 cm, niet overschrijdt



Bron: Van de Vreken et al. (2009)

Aangezien de PCS-waarden gebaseerd zijn op historische data (nl. databank Aardewerk), kunnen de gevoeligheidskaarten als geldig beschouwd worden voor bodems die nog geen of weinig verdichting hebben ondergaan. Deze kaarten kunnen zodoende een basis vormen voor het afbakenen van risicogebieden, wetende dat op een aanzienlijk aantal percelen binnen deze gebieden verdichting intussen is opgetreden. In realiteit is de oppervlakte van donkerbruin gekleurde percelen groter dan aangegeven in Figuur 9. Het risico op verdere verdichting is er afgenomen, maar schade ten gevolge van de opgetreden verdichting is reeds aan de orde (Van de Vreken et al., 2009 en Reubens et al., 2010).

De gevoeligheid voor verdere verdichting is op vele plaatsen vermoedelijk laag tot zeer laag, gezien de reeds vastgestelde verdichting onder de bouwvoor. Veldmetingen tonen aan dat de perceelranden doorgaans meer verdicht zijn dan de rest van het perceel, aangezien daar gekeerd wordt en ze meer bereiden worden dan het midden van het perceel (Van de Vreken et al., 2009 en van den Akker & de Groot, 2008).

Aangezien bodemdichtheid de belangrijkste predictor is in de gebruikte functies voor de PCS-waarde, lijkt de kennis van de actuele bodemdichtheid een belangrijke sleutel te zijn om gevoeligheids- en risicokaarten te maken die beter rekening houden met de compactie die reeds is opgetreden. Aanvullende metingen (bv. ook van bodemsterkte) zijn noodzakelijk. Onderzoek naar een aantal belangrijke aspecten, zoals het zelfherstellende vermogen van een bodem door krimp of beworteling, is op heden ontoereikend (Van de Vreken et al., 2009 en Reubens et al., 2010).

4.2 | Maatschappelijke activiteiten en gevolgen

4.2.1 | Maatschappelijke activiteiten en oorzaken

De voornaamste oorzaken van bodemverdichting zijn het frequent betreden van percelen met zware landbouwvoertuigen, intensieve bodembewerkingen, een tekort aan organische stof in de bodem en eenzijdige teeltrotaties (Jones et al., 2004; Vandergeten & Roisin, 2004; Koopmans et al., 2006 en Reubens et al., 2010).

De voornaamste bedreiging voor bodemverdichting van landbouwgrond ontstaat door het inzetten van allerhande machines. De mate van verdichting is daarbij onder meer afhankelijk van het aantal werkgangen, het type machine en de toegepaste belasting, waarbij de wiellast en de grootte van het contactoppervlak tussen band en bodem de belangrijkste machinekarakteristieken zijn. Op een akkerperceel zou machinegeïnduceerde verdichting zich manifesteren tussen de 10 en 60 cm diepte, met de meest duidelijke effecten in de toplaag (rond 10 cm) (Esteve et al., 2004; Jones et al., 2004 en Reubens et al., 2010).

Een van de redenen voor bodembewerkingen is het opheffen van verdichte lagen. Hoewel dit op korte termijn een efficiënte oplossing kan bieden, maken bodembewerkingen vaak zelf een deel uit van het probleem. Bij ploegen wordt met één rij wielen 'in de voor' gereden, waardoor de druk lokaal sterk toeneemt en het risico op verdichting dus sterk stijgt. Naast de invloed van de tractorwielen heeft ook het zoolijzer van de ploeg zelf een versmerend en daardoor verdichtend effect. Wanneer jaar na jaar op dezelfde diepte geploegd wordt, kan een ploegzool ontstaan waardoor de wortelgroei en watertransport verhinderd worden. Daarnaast geldt dat hoe losser een bodem is, hoe dieper deze verdicht kan worden. Vandaar ook dat een bodem na een intensieve bewerking vaak erg gevoelig is voor nieuwe verdichting. Naast de intensiteit en frequentie van bodembewerking, is ook het tijdstip van de bodembewerking erg belangrijk. Een bodem die te nat bewerkt wordt, versmeert en verdicht (Paauw, 2006; Meuffels, 2010 en Reubens et al., 2010).

De daling van het organische stofgehalte van de Vlaamse landbouwbodems, resulteerde mogelijk in een verdichting. Het organische stofgehalte heeft immers een positief effect op de bodemstructuur. Door het lage soortelijk gewicht van organische stof, betekent een toename in organische stof een afname van de bodemdichtheid. De bodem is door de aanwezigheid van organische stof vaak beter doordringbaar voor wortels, de drainage verloopt vlotter en het risico op verdichting daalt. Een hoger organische stofgehalte stimuleert ook het bodemleven, dat zelf sterk bijdraagt tot opbouw en onderhoud van een goede bodemstructuur. Regenwormen creëren nieuwe poriën. Omgekeerd heeft de bodemstructuur ook een belangrijke impact op organische stofdynamiek (LNE, 2009a en Reubens et al., 2010).

4.2.2 | Gevolgen

Bodemverdichting en vooral ondergrondverdichting worden in de Europese Bodemstrategie (EC, 2006) beschouwd als een belangrijke bedreiging voor de bodem. Ze betekent vaak een vermindering of verlies van meerdere bodemfuncties (Mulier et al., 2005 en Reubens et al., 2010):

- Bodemverdichting verhoogt de schijnbare dichtheid van de bodem en de penetratieweerstand van de bodem.
- De hydrologische eigenschappen worden gewijzigd. Dit resulteert onder meer in een slechte nutriëntenopname en verminderde wateropslagcapaciteit en infiltratie. Door de opbouw van water boven de verdichte laag wordt ook de drainage beperkt en ontstaan te natte bodems in het voorjaar, een hoger risico op erosie en daarmee geassocieerde P-verliezen, en een toenemende laterale watertransfer en dus verontreiniging van oppervlaktewater.
- Ook de beschikbaarheid van water uit diepere lagen wordt verhinderd, en zo treedt in de zomer verdroging op. Dit kan resulteren in een gebrekkige vochtvoorziening voor de plant.
- Het volume bodem dat als buffer tegen verontreiniging kan fungeren, daalt.
- De wortelgroei (o.a. door een afname van poriënbeschikbaarheid) wordt beperkt en het bodemleven wordt verstoord.

4.3 | Maatregelen

Het losmaken van de bodem dient om het poriënvolume te verhogen en zodoende de lucht- en waterhuishouding te verbeteren. Een intensieve en frequente verstoring kan echter nefast zijn voor een stabiele bodemstructuur (Paauw, 2006). Decompactors hebben vaak tot doel een verharde, storende laag los te maken. Bij extreme verdichtingen worden diepwoelers ingezet, die tot dieptes van 50 cm en meer reiken (Van Ormelingen, 2007).

In onze West-Europese landbouw neemt de druk op de bodem steeds verder toe door de inzet van alsmaar zwaardere machines. Een grotere insporingsdiepte betekent niet alleen meer verdichting, maar ook een groter energiegebruik. De keuze voor een juiste band, juiste breedte en aangepaste bandenspanning, kan echter een groot verschil betekenen, zowel naar bodemverdichting als naar trekkracht-efficiëntie toe. Een lage druk betekent een groter contactoppervlak en daardoor minder insporing. Brede banden vergroten het contactoppervlak en reduceren dus insporing en verdichting (Anonymus, 2010 en Reubens et al., 2010).

Ook de teeltrotatie heeft een sterke invloed op de fysische bodemkwaliteit. Het afwisselen van teelten met een verschillende groeikarakteristiek en een verschillend zaai- en oogsttijdstip verdient daarbij doorgaans de voorkeur ten opzichte van monocultuur. Algemeen kan gesteld worden dat de kwaliteit en hoeveelheid geleverd organisch materiaal (OM), de bewortelingsintensiteit en -diepte, en de teeltduur belangrijk zijn (Benjamin et al., 2007 en Reubens et al., 2010):

- Teeltrotaties die het organische stofgehalte verhogen doen het totaal poriënvolume toenemen en de schijnbare dichtheid dalen.
- Ook een intensief wortelend gewas met een uitgebreid netwerk van fijne wortels verlaagt de schijnbare dichtheid.
- Het afwisselen van ondiep met diep wortelende gewassen (vb. granen, maïs) verbetert de gasuitwisseling en drainage. Vooral gewassen met diepgaande, dikkere penwortels maken een snelle waterinfiltratie mogelijk.
- Vooral meerjarige gewassen blijken zeer effectief te zijn in het verbeteren van de bodemfysische eigenschappen. De afwezigheid van werkzaamheden in het voorjaar (bv. ploegen, zaaien) en in het najaar (oogsten) verlaagt het risico op verdichting. Bovendien zorgt het uitgebreid wortelstelsel voor een stabiel poriënnetwerk waardoor volggewassen vlotter kunnen wortelen en minder onderhevig zijn aan droogtestress.

De wortelontwikkeling van groenbedekkers kan bijdragen tot het behoud en de verbetering van de bodemstructuur, via de vele kleine kanaaltjes die op die manier gevormd worden. Hierdoor neemt ook het poriënvolume toe. Verder resulteren ze in een positieve impact op het organische stofgehalte in de bodem en het bodemleven. Groenbedekkers hebben niet enkel een preventieve functie op vlak van

verdichting: diepwortelende groenbedekkers (zoals gele mosterd) kunnen ook ingezet worden om een bestaande verdichting op natuurlijke wijze terug op te heffen (Van de Vreken et al., 2009).

Ook organische bemesting kan een positief effect op de bodemdichtheid hebben. Deze effecten kunnen echter niet steeds aangetoond worden. Wellicht minstens even belangrijk als het type mest is de wijze waarop deze bemesting wordt aangebracht. Zeker bij drijfmest, waarbij zware machines worden gebruikt, is er een risico op verdichting onder de rijsporen. Dit risico is het grootst in de vroege lente wanneer de bodem relatief nat is (Reubens et al., 2010).

5 | Biodiversiteit in de bodem

5.1 | Mechanismen

5.1.1 | Beschrijving van de bodembiodiversiteit en functies

Samen met de lucht en het water vormt de bodem de belangrijkste basis voor het bestaan van leven op onze planeet. De bodem regelt de natuurlijke cycli van materie en energie en is uiterst gevoelig voor de effecten van klimaatverandering en antropogene en historische activiteiten.

Het geheel van alle levende organismen in de bodem vormt samen het bodemleven en bepaalt de bodembiodiversiteit. Het wordt opgebouwd uit verschillende organismen die kunnen worden ingedeeld naar soort, grootte of levenswijze.

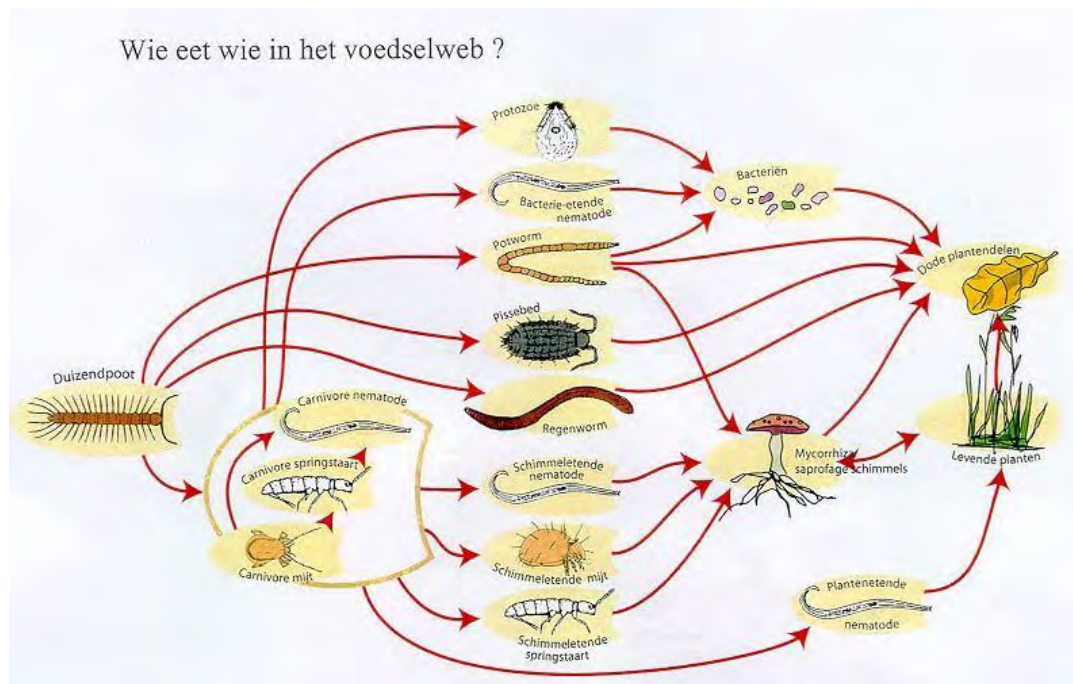
Een veelgebruikte classificatie is deze op basis van afmetingen:

- microflora en -fauna (bv. bacteriën, schimmels, nematoden, protozoa);
- mesofauna (bv. mijten, springstaarten, potwormen, nematoden);
- macrofauna (bv. regenwormen).

Levende micro-organismen in de bodem verzorgen allerlei processen zoals mineralisatie en humificatie. Hoewel het bodemleven minder dan 10 % van de totale organische stof in de bodem bedraagt, kan een landbouwbodem een levende biomassa bevatten van ongeveer 3 ton/ha (Van Camp et al., 2004) en vervult het bodemleven heel wat belangrijke functies. Dit bodemleven vormt een voedselweb (Figuur 10), waarin elke groep van organismen zijn eigen specifieke taak heeft. In de bodem is er een continu biologisch proces aan de gang van opbouw en afbraak van organische stof. Bacteriën nemen de gemakkelijk afbreekbare organische stof voor hun rekening, terwijl schimmels eerder verantwoordelijk zijn voor de afbraak van de moeilijk afbreekbare fractie. Deze twee groepen bodemorganismen worden op hun beurt weer 'gegeten' door andere bodemorganismen zoals protozoa, nematoden, springstaarten en mijten. Regenwormen zorgen voor het incorporeren van aan de oppervlakte aanwezige oogstresten in de bodem waardoor ze beter beschikbaar worden voor microbiële activiteit. Het bodemvoedselweb vormt de bron en de motor van alle transformaties van organische koolstof en nutriënten in de bodem. Het goed functioneren van het volledige bodemvoedselweb is dus van zeer groot belang voor de bodemkwaliteit (De Visser en Hanegraaf; 2003).

Sommige van de bodemorganismen leven van dode planten- of dierenresten, maar een belangrijk deel leeft van andere levende organismen. Zo zijn de nematoden in te delen in plantenetende, schimmeletende, bacterie-etende, carnivore (eten bv. springstaarten, mijten en andere nematoden) en omnivore (eten niet alleen andere organismen maar ook plantaardig materiaal) soorten. Het geheel van onderlinge relaties en energietransfers tussen de verschillende levende organismen in de bodem vormt een ingewikkeld patroon dat men het 'bodemvoedselweb' noemt. Elke soort heeft daarin zijn eigen plaats (Figuur 10).

Figuur 10: Visualisatie van het bodemvoedselweb



Bron: Ron de Goede, Wageningen Universiteit

Een goed functionerend voedselweb vervult verschillende functies. Voor de landbouw zijn de belangrijkste van die functies (van Eekeren et al., 2003 & 2008b en Reubens et al., 2010):

- Reguleren van de nutriëntenstroom: Het bodemleven speelt een grote rol bij het beschikbaar maken van nutriënten uit organische stof. Zo kan deze organische stof verkleind worden door de hogere organismen in het bodemvoedselweb (bv. regenwormen, potwormen, springstaarten). Belangrijker nog is de rechtstreekse consumptie door micro-organismen (bacteriën en schimmels), die het deels gebruiken voor eigen groei. Bovendien kunnen bacteriën en schimmels door hun lage C/N verhouding grote hoeveelheden N opnemen en zo uitspoeling voorkomen. De graasactiviteit van protozoa, mijten en nematoden zorgt dan voor een geleidelijke vrijstelling van de nutriënten in de microbiële biomassa. Op die manier maakt het bodemleven complexe, organische nutriëntenverbindingen beter beschikbaar voor de plant. Ook de symbiotische relaties tussen plantenwortels en nuttige schimmels en bacteriën verhogen de nutriëntenbeschikbaarheid. Zo zijn mycorrhizae verantwoordelijk voor een toename van de opnameoppervlakte van het wortelstelsel. Nitrificerende bacteriën zetten ammonium om naar nitriet en vervolgens nitraat, dat makkelijker opneembaar is voor de plant
- Opbouw en onderhoud van een goede bodemstructuur:
 - Bacteriën en schimmels kitten door respectievelijk slijmvorming en schimmeldraden individuele bodemdeeltjes aan elkaar tot micro- en macro-aggregaten.
 - Regenwormen staan door hun graaf- en mengactiviteiten in voor een intensieve menging van organische en minerale bodembestanddelen waardoor organo-minerale complexen (stabiele humuscomponenten) gevormd worden. Deze stabiele aggregaten beschermen de organische stof tegen afbraak.
 - Daarnaast zijn regenwormen belangrijk voor de vorming en het onderhoud van een goede bodemstructuur door hun intense bodemwoelende activiteit en het graven van gangen.
- Ziekte- en plaagwering: Het bodemvoedselweb beschikt over een aantal mechanismen om ziekten en plagen te reguleren:
 - competitie om voedsel, water en ruimte, waardoor pathogene organismen onderdrukt kunnen worden;
 - predatie van de ziekteverwekkers en plagen door andere organismen;
 - productie van groeiremmende stoffen (antibiotica).

Naast nuttige organismen omvat het bodemleven ook ziekteverwekkende en plaagvormende organismen, die potentieel grote economische schade kunnen veroorzaken. Plantparasiterende nematoden zijn wijd verspreid en veroorzaken aanzienlijke schade aan een brede waaier van belangrijke land- en tuinbouwgewassen (bv. aardappelcystenaaltje, bietencystenaaltje). Ook bepaalde bacteriën en schimmels zijn belangrijke pathogenen. *Fusarium* (verwelkingsziekte) en *Rhizoctonia* zijn maar enkele voorbeelden van schimmels die productieverliezen kunnen veroorzaken. *Streptomyces scabies* is dan weer een voorbeeld van een bacteriële plantenbeschadiger, die gewone schurft bij de aardappel veroorzaakt. Een goed functionerend bodemvoedselweb wordt echter in staat geacht om via de eerder vermelde mechanismen ziekten en plagen te onderdrukken en zo de schadelijke invloed van deze pathogenen te reduceren (ter Berg et al., 2006 en Reubens et al., 2010).

5.1.2 | Meting van de bodembiodiversiteit

Regenwormen kunnen gemakkelijk met het blote oog gedetecteerd worden. Op basis van hun gedrag en morfologische kenmerken worden drie grote groepen onderscheiden: de strooiselwormen, de bodemwoelers en de diepgravers. Omwille van het positieve effect van regenwormen moeten er minimum 15 tot 20 regenwormen per m² aanwezig zijn. Afhankelijk van de textuur en teelt kan het aantal regenwormen van 150 tot 1 000 per m² oplopen. Aangezien de verschillende groepen regenwormen andere functies in de bodem vervullen, is niet enkel het totale aantal regenwormen van belang, maar evenzeer de verhouding tussen de groepen. Het belang van de diepgravers is daarbij relatief het grootst, maar bodems bevatten bij voorkeur wormen uit de drie groepen. In sommige kwalitatieve methoden worden naast of in plaats van de regenwormen zelf, de regenwormgangen geteld (Romig et al., 1996; Shepherd, 2000; Koopmans & Brands, 2001).

Nematoden staan vooral bekend als ziekteverwekkers, hoewel vele functionele groepen ook nuttig zijn. Ze beïnvloeden de beschikbaarheid van nutriënten en zijn zeer gevoelig voor bodemverstoring. Gemiddeld vindt men 10 tot 50 nematoden per gram grond.

Het integreren van trofische niveaus en levensstrategieën in de functionele groepen kan aanleiding geven tot het definiëren van verschillende indices die een beeld geven van de structuur, functie en status van het bodemvoedselweb ten opzichte van veranderingen in de bodem (verstoringen en stress) (Bloem et al., 2003):

- De aanrijksindex (EI) is een maat voor de beschikbaarheid aan voedsel.
- De structuurindex (SI) is een maatstaf voor het aantal trofische niveaus en de ontwikkeling van het bodemvoedselweb.
- De channelindex (CI) is een parameter voor het voorspellen van de wijze van afbraak van de organische stof. Deze index geeft ook een indicatie of de decompositie eerder bacterie-dominant dan wel schimmel-dominant is.

In één gram grond zijn er gemiddeld 600 000 bacteriën en 400 000 schimmels aanwezig, samen goed voor een gewicht tot 15 000 à 16 000 kg per ha. De microbiële biomassa heeft een korte omzettijd (turn-over) (0,2 – 6 jaar), en geeft zo een snelle indicatie van een toekomstige toename of afname van het organische stofgehalte en de beschikbare nutriënten. Een nadeel van deze parameter is dat hij sterk afhankelijk is van verschillende abiotische factoren (vochtgehalte, temperatuur, recente toediening meststoffen of andere verstoringen), waardoor de bekomen waarden moeilijk interpreteerbaar zijn (Bloem et al., 2003).

5.2 | Maatschappelijke activiteiten en oorzaken

Wat zijn de oorzaken van een beperkt bodemleven? Minder organische stof in de bodem betekent minder voedsel voor het bodemleven. Zodoende heeft de daling van het organische stofgehalte in de Vlaamse landbouwbodems waarschijnlijk in een daling van het bodemleven geresulteerd.

Veranderingen in bodembewerking veroorzaken een belangrijke verschuiving in aantal en samenstelling van de bodemfauna en -flora. Dit is vaak het gevolg van een respons op gewijzigde fysische en/of chemische bodemomstandigheden. Algemeen kan gesteld worden dat een vermindering van de intensiteit of frequentie van bodembewerking een positieve bijdrage levert aan de bodembiodiversiteit. Iedere vorm van mechanische verstoring heeft immers een directe impact op de

bodemfauna door het fysiek doden, verwonden en blootstellen aan predatie en een indirecte impact door het vernietigen van hun habitat. De invloed is het grootst voor grotere of langgerekte soorten die zich minder gemakkelijk verplaatsen, of die in diepere bodemlagen niet kunnen overleven. Sterke verstoring stimuleert bodembiota met een hoge reproductiesnelheid en snelle kolonisatiecapaciteit. Op die manier worden mesofauna en bacteriën bevoordeeld ten opzichte van macrofauna en schimmels. Toch dient hier ook het risico aan toegevoegd te worden dat naast functionele organismen ook ziekte- en plaagverwekkende soorten positief beïnvloed kunnen worden (Anonymus, 2010 en Reubens et al., 2010).

Samen met grondontsmetting heeft bodembewerking het grootste effect op de bodembiodiversiteit. De intensiteit van de behandelingen is daarbij belangrijker dan de frequentie, want de zwaarste behandeling is de meest bepalende. Hoe minder intensief deze maatregelen (bv. geen grondontsmetting en een lichtere/minder diepe vorm van bodembewerking), hoe groter ook de invloed van andere maatregelen, zoals de aanwending van organische stof, potentieel kan worden (Anonymus, 2010).

Daarnaast heeft ook de teeltrotatie een belangrijke impact op de bodembiodiversiteit.

5.3 | Maatregelen: hoe kan de verstoring hersteld worden?

Doorgaans stijgt de microbiële biomassa met hogere organische stofgehaltes van de bodem. Toediening van organische bemesting kan de microbiële biomassa dus verhogen. Ook regenwormen hebben nood aan een voldoende aanvoer van organische stof (Peacock et al., 2001; Leroy, 2008 en Valckx et al., 2009a & b).

Er wordt verwacht dat het type van bemesting een impact zal hebben op de nematodengemeenschap omdat die gevoelig is aan verstoringen. Zo wordt een relatief hoog aandeel van schimmeletende nematoden aangetroffen in compost (Steel et al., 2010) en wordt verwacht dat drijfmest bacterie-etende nematoden stimuleert (Koopmans et al., 2006 en Leroy, 2008).

Plantenwortels spelen een belangrijke rol in de vorming van de microbiële bodemgemeenschap en selectie van bepaalde bacteriële groepen, onder meer door de excretie van gewasspecifieke stoffen en de invloed op bodemfysische omstandigheden. Doorgaans is het aandeel schimmels hoger onder permanente/meerjarige teelten, terwijl bij eenjarige gewassen de bacteriën dominant zijn. Zodoende zou een afwisseling van beide kunnen resulteren in een meer diverse microbiële gemeenschap dan een monocultuur (Lupwayi et al., 1998; Moore et al., 2000 en van Eekeren et al., 2008b). Sommige planten scheiden chemische stoffen af als wortellexudaten of tijdens de afbraak van plantenresten. Deze stoffen kunnen de micro- en macrofauna in de wortelzone sterk beïnvloeden (Bailey & Lazarovits, 2003).

Regenwormen gedijen het best onder grasland, dat een stabiele omgeving en een relatief constant aanbod aan organische stof als voedselbron biedt. Onder akkerland liggen de aantallen gevoelig lager. Naast de rechtstreekse impact door bewerking zorgt het afwezig zijn van een permanente bodembedekking onder akkerland voor een grotere variabiliteit in bodemtemperatuur en vochtregime. Ook het gebrek aan voldoende voedsel vormt een serieuze dreiging, vooral bij gewassen die weinig tot geen oogstresten achterlaten (bv. wortel- en knolgewassen). Het inpassen van tijdelijk grasland in een rotatie, of de toepassing van groenbedekkers zorgt voor een substantiële stijging in de regenwormaantallen (van Eekeren et al., 2008b en Valckx et al., 2009a & b).

In permanente systemen (grasland of akkerland) zijn hogere aantallen carnivore en omnivore nematoden aanwezig, wat wijst op een stabielere nematodengemeenschap. Verder blijkt dat de totale nematodenaantallen doorgaans hoger liggen onder permanent grasland. Dit komt voornamelijk door het hoger aantal plantparasitaire nematoden in respons op het uitgebreide wortelstelsel onder grasland. Het akkerland wordt dan weer gedomineerd door bacterievore nematoden. De teeltrotatie neemt een tussenpositie in. Het is dan ook een vaak voorkomende misvatting dat extensivering steeds en per definitie zal leiden tot een verlaging van de ziektedruk. Het aandeel plantparasitaire nematoden kan gereduceerd worden door een meer gevarieerde teeltrotatie. De hoeveelheid vrijlevende nematoden ligt hoger in een teeltrotatie terwijl de plantparasitaire nematoden de bovenhand namen in een monocultuur (Rahman et al., 2007 en van Eekeren et al., 2008b).

Het roteren van verschillende teelten helpt ziekten en plagen in functie van hun mobiliteit en specificiteit te beheersen. Teeltrotatie blijkt erg effectief te zijn als men te maken heeft met bodemgebonden, gewasspecifieke plagen (bv. aardappelcystenaaltje), die met andere woorden enkel kunnen leven en schade veroorzaken bij één gewas. Lang wachten om hier met hetzelfde gewas opnieuw te komen, kan voldoende zijn om de plantenbeschadigers te verminderen in aantal of helemaal te doen verdwijnen, wegens gebrek aan een waardplant (Kurle et al., 2001). Ook de toepassing van variëteiten op verschillende percelen of in verschillende jaren kan hier een interessante optie zijn (Meul et al., 2004).

Het effect van gevarieerde teeltrotaties is echter minimaal wanneer men te maken heeft met mobiele, niet-gewasspecifieke plantenbeschadigers (bv. polyfage bladluisoorten). Ook tegen bodempathogenen die een lange tijd in de bodem kunnen overleven zonder waardplant (bv. *Fusarium*) is de effectiviteit van teeltrotatie beperkt. Een rotatie met de verkeerde gewassen kan de ziektedruk van veel polyfage pathogenen verergeren (Reubens et al., 2010).

De ingewerkte organische stof van groenbedekkers vormt een bron van voedsel en stimuleert zo het bodemleven. Ook de plantenwortels van de nog levende groenbedekkers spelen hier een belangrijke rol. Voor een actief en goed ontwikkeld microbiëel bodemleven is een continue aanvoer van deze stoffen belangrijk, wat de cruciale rol van een tussenteelt met groenbedekkers aantoont. Ook op meso- en macrofauna hebben groenbedekkers een doorgaans stimulerend effect (Thorup-Kristensen et al., 2003; Koopmans et al., 2007 en Valckx et al., 2009a & b).

De keuze van de groenbedekker kan een belangrijke impact hebben op de nematodenpopulatie. Enerzijds kunnen groenbedekkers waardplanten zijn van bepaalde aaltjes, anderzijds kan de teelt van aaltjesresistente groenbedekkers leiden tot een afname van de aaltjespopulatie. Een groenbedekker die de ene aaltjesgroep bestrijdt, kan het probleem met een andere groep net verergeren. Bij de keuze van een groenbedekker zal men daarom rekening dienen te houden met de eigenschappen van de gewassen in het teeltplan, en wordt afgeraden een groenbedekker uit te zaaien die tot dezelfde familie behoort als de volgteelt. Voor een efficiënt aaltjesreducerend effect is niet alleen de soortkeuze belangrijk, maar moet ook de groeiperiode van de groenbedekker voldoende lang zijn en is een tijdige inzaai dus van groot belang (Thorup-Kristensen et al., 2003 en Reubens et al., 2010).

Het toedienen van organisch materiaal leidt tot een stijging van de microbiële biomassa en activiteit (Kandeler et al., 1999; Böhme et al., 2005) waardoor ook de organismen die zich voeden met bacteriën of schimmels, zoals nematoden, toenemen in aantal (Forge et al., 2003; Leroy, 2008). Spinnen en kevers voeden zich met prooien aanwezig in oppervlakkige strooisellagen. De hoeveelheid en kwaliteit aan organisch materiaal aanwezig aan het oppervlak bepaalt dus mede hun aanwezigheid en activiteit. Daarbij leven de larvale stadia van de kevers in de bodem en zorgen oppervlakkige oogstresten voor optimale vocht- en temperatuurcondities (Wardle, 1995). Regenwormen verkiezen een bodem met een hoog organische stofgehalte (Hendrix et al., 1992; Leroy et al., 2007). Meer voedsel en habitat zal niet enkel de biologische diversiteit en activiteit van de organismen onder en op het oppervlakte verhogen, maar ook de biodiversiteit aan organismen hoger in de voedselketen (vogels en zoogdieren) zal positief beïnvloed worden (Mäder et al., 2002).

6 | Bodemafdichting

6.1 | Mechanismen

6.1.1 | Begrippen

De verscheidene termen die courant gebruikt worden binnen het thema bodemkwaliteit of ruimte- of landgebruik zoals bijvoorbeeld verstedelijking, verharding, verstening, afdichting, afdekking, hebben allemaal bepaalde eigenschappen gemeen, maar verschillen van elkaar door kleine nuances in de definitie. De definities geven telkens informatie over de aard van bodembedekking en/of bodemgebruik, behandelen telkens bodembedekking van menselijke oorsprong (antropogeen) dat bestaat uit harde en/of stenige materialen zoals beton, asfalt, (bak)steen of kunststoffen. Verschillen tussen de begrippen zijn hoofdzakelijk terug te brengen tot de benadering van de definitie die ofwel gericht is op de functie van de bodembedekking, ofwel op de aard van bodembedekking, ofwel op de impact van de bedekking. Belangrijke tekortkomingen in de bestaande terminologie komen tot uiting als men bodemafdichting via kaartanalyse gaat bestuderen:

- De bestaande begrippen zijn schaalafhankelijk, maar dat is niet duidelijk aangegeven, zodat ze geen minimale kaarteenheden of resolutie definiëren.
- De lage resolutie waarop de begrippen meestal worden toegepast, laat niet toe om op hoog schaalniveau analyses te maken. (Meeus et al., 2004).

Op basis van deze eigenschappen en tekortkomingen worden in onderstaande tabel (Tabel 2) de termen toegelicht welke sinds 1996 gehanteerd zijn in het MIRA-achtergronddocument thema 'Versnippering' (Gulinck et al. 1997). De definities zijn afgeleid van voorgaande achtergronddocumenten en waar nodig aangepast aan de huidige betekenis.

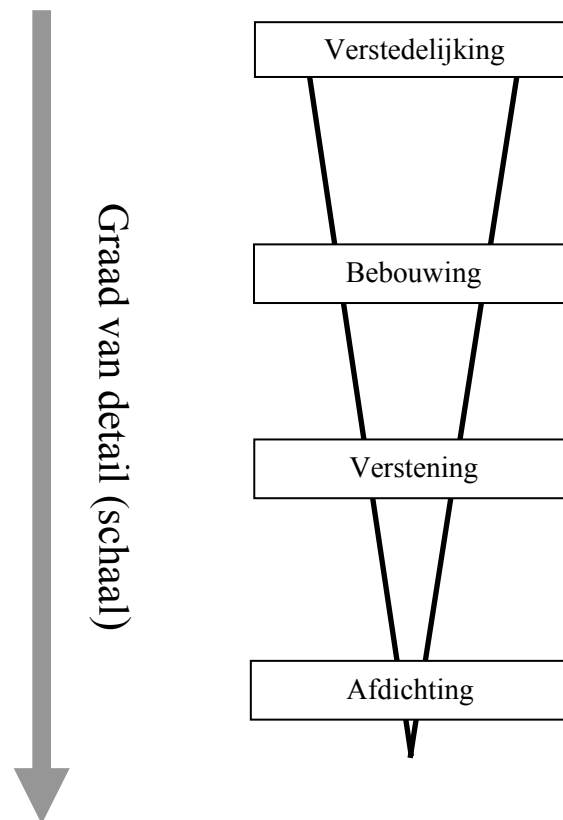
Tabel 2: Terminologie gebruikt in het thema 'Bodemafdichting'

term	definitie	opmerking
versnippering	de versnijding van landschappen door infrastructuur en bebouwing en het verscherpen van contrasten tussen naburige eenheden van bodemgebruik	kwalitatief
verstedelijking	de uitbreiding van het geheel van bouwsels van menselijke oorsprong dat volledig of gedeeltelijk bestaat uit stenig, hard materiaal (beton, baksteen, natuursteen, asfalt of andere niet-natuurlijke harde materialen) én met de functie wonen, industrie, transport, diensten, recreatie en handel	geografisch of planologisch, ruim begrip
bebouwing	de omzetting van niet-bebouwde in bebouwde ruimte	kadastraal niveau
verharding	het wijzigen van de aard en/of toestand van het bodemoppervlak door compactie of door het aanbrengen van artificiële, (semi-) ondoorlaatbare materialen 'met de bedoeling de draagkracht te verhogen'	combinatie van verstening én verdichting
verstening	het aanbrengen van stenige verharding op het oppervlak, door urbanisatie en meer algemeen bebouwing en verkeersinfrastructuur en allerlei kleine artificiële objecten	kwalitatief (versteend of niet) hoge resolutie (m ² -niveau)
verdichting	het samendrukken van de bodem door externe mechanische krachten met het verlies van de bodemstructuur en afname van waterdoorlaatbaarheid als gevolg	zie hoofdstuk 4 Bodemverdichting
afdichting	het aanbrengen van een artificieel, waterondoorlatend oppervlak op het bodemoppervlak (bv. gebouwen, wegen en andere constructies van antropogene oorsprong) zodanig dat het water niet meer kan infiltreren, maar afstroomt via het verharde oppervlak	kwantitatief fractie die versteend én ondoorlatend is (0 - 100 %)

Sinds 2005 is de problematiek opgenomen in het MIRA-achtergronddocument 'Bodem' onder het thema 'Bodemafdichting'. Door in de MIRA-rapporten gebruik te maken van de term 'Afdichting' richt het rapport de kijker op de kern van de problematiek en staat de impact van bebouwing, infrastructuur en andere constructies op de hydrologische cyclus en waterkwaliteit centraal.

Het eindverslag 'Verstening als milieuvariabele' (Meeus et al., 2004) toont aan dat 'verstedelijking' te grof is om de 'peri-urbane zones' (met zowel verstedelijking als open ruimte) in Vlaanderen te beschrijven. Het begrip 'verstedelijking' omvat immers bebouwing, infrastructuurnetwerken, enz. en heeft bovendien een socio-culturele en socio-economische connotatie. Indien het schaalniveau nauwkeuriger wordt, bereikt men via 'bebouwing' de term 'verstening' of de versteende oppervlakken (Figuur 11) (Meeus et al. 2004).

Figuur 11: Conceptuele overgang van 'verstedelijking' tot 'afdichting'



Bron: Meeus et al. (2004)

Hierbij is verstening het type bodembedekking dat van antropogene oorsprong is en bestaat uit stenig materiaal gebruikt voor eender welke vorm van constructie. Op het fijnste niveau beschouwd, kan dit materiaal gedeeltelijk waterdoorlatend zijn (bv. steenslag, doorgroeistenen, etc.). Gedurende opeenvolgende jaren is 'verstening' gehanteerd als fysieke detaillering voor het begrip 'verstedelijking'. Thans gaat echter veel aandacht naar de impact van verstening op de hydrologische cyclus (o.a. toename afvoercoëfficiënt en versnelling van run-off) en de waterkwaliteit. Aangezien hierin de aard van het versteningsmateriaal een belangrijke rol speelt (o.a. afstroomcoëfficiënt, doorlaatbaarheid, etc.), zal het begrip 'verstening' binnen deze context niet meer specifiek genoeg zijn.

Het begrip 'afdichting' speelt in deze context een belangrijke rol aangezien in de definitie ondubbelzinnig de hydrologische impact van het oppervlak vervat zit. Dit maakt het mogelijk te spreken van een 'mate van afdichting'. In deze context kan 'afdichting' gezien worden als het laatste lid in de rij, vertrekkende vanaf 'verstedelijking' (Figuur 11).

Uit Tabel 2 en Figuur 11 blijkt dat doorheen de termen een schaal-gradiënt loopt. 'Schaal' bestaat in deze context uit 3 componenten die met elkaar interageren (Figuur 12):

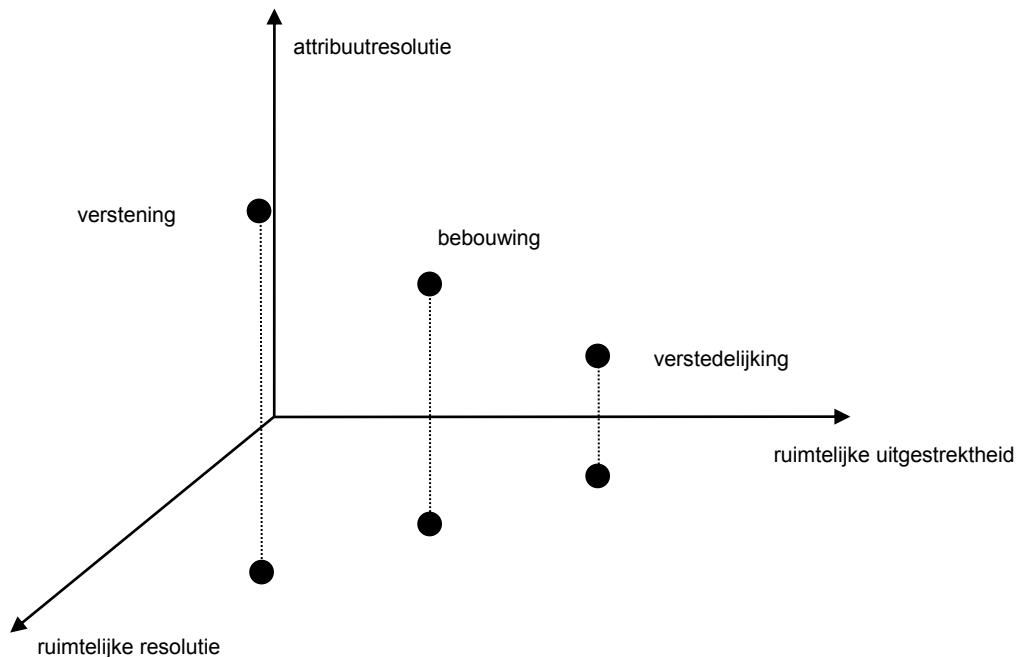
- Ruimtelijke uitgestrektheid: bijvoorbeeld niveau van perceel of niveau van Vlaanderen.
- Ruimtelijke resolutie: bijvoorbeeld op het niveau van Vlaanderen wordt hoofdzakelijk gewerkt op kleine schaal of lage resolutie. Op het niveau van percelen wordt meestal op grote schaal of hoge resolutie gewerkt.
- Attributeresolutie: op hoge resolutie worden andere attributen of eigenschappen onderscheiden (bv. aard van het stenige materiaal) dan op lage resolutie (bv. algemeen onderscheid bebouwing of infrastructuur).

De mate van ruimtelijke uitgestrektheid, ruimtelijke resolutie en attributeresolutie is afhankelijk van term tot term. Bijvoorbeeld:

- De term 'verstedelijking' wordt gekenmerkt door een grote ruimtelijke uitgestrektheid (i.e. een groot gebied), een lage ruimtelijke resolutie (i.e. kleine schaal) en een lage attributeresolutie (vb. onderscheid maken tussen bebouwing en infrastructuur).
- De term 'verstening' wordt gekenmerkt door een kleine ruimtelijke uitgestrektheid (i.e. slechts een klein gebied wordt in rekening gebracht), een hoge ruimtelijke resolutie (i.e. grote schaal) en een hoge attributeresolutie (vb. classificatie op basis van de aard van het stenig materiaal).

De verschillende termen uit Figuur 11 en Tabel 2 kunnen binnen dit diagram gesitueerd worden, zoals voor enkele termen weergegeven in Figuur 12.

Figuur 12: De 3 componenten van 'schaal'



Bron: De Meyer et al. (2011)

6.1.2 | Beschrijving en oorzaken van de verstoring

Bodemafdichting is een fenomeen van verandering in de ruimte waarbij het bodemoppervlak wordt toegedekt met een waterondoorlatende constructie van antropogene oorsprong, zoals gebouwen en wegen. De moeilijk omkeerbare afdichting van bodems heeft verschillende ongunstige gevolgen en dit niet alleen voor de locatie zelf, maar ook voor het omliggende terrein. Mogelijke gevolgen zijn overstromingen, watergebrek in diepere grondlagen, verlies van bodemfuncties en toenemende fragmentatie van het landareaal. Beperking van verdere afdichting zou dus een belangrijke plaats moeten innemen binnen de ruimtelijke ordening. In het Ruimtelijk Structuurplan Vlaanderen (RSV) zijn hiervoor reeds een aantal intenties in het beleid opgenomen zoals het principe van de gedeconcentreerde bundeling en de 60-40-verdeling, voor spreiding van de nieuwbouw in stedelijk versus buitengebied.

In Vlaanderen, maar ook in vele regio's elders in de wereld, maken meerdere maatschappelijke sectoren aanspraak op de onbebouwde ruimte om te voldoen aan de groeiende noden voor infrastructuur gericht op wonen, werken, verplaatsen en recreëren. Inname van ruimte die momenteel gebruikt of beheerd wordt door en voor landbouw, bosbouw of natuur, leidt tot afdichting en veelal tot vernietiging van de bodem.

Toename van bebouwing is een van de belangrijkste oorzaken van bodemafdichting in Vlaanderen. Door de grote toegankelijkheid neemt de bebouwing het meest toe in de buurt van grote wegen, zoals in de stadsranden en in de bebouwde kernen van het buitengebied. Naast bebouwing, levert in Vlaanderen de transportinfrastructuur een belangrijke bijdrage aan de afdichting van de bodem. De

totale oppervlakte van het Vlaamse wegnnet bedraagt immers 74 623 ha (administratie voor wegen en verkeer, gegevens van 2010). Dit komt neer op circa 5,5 % van de totale oppervlakte van Vlaanderen.

6.2 | Gevolgen van bodemafdichting

Bodemafdichting leidt vaak tot de vernietiging van de bodem, met als gevolg dat meerdere van de oorspronkelijke bodemfuncties teloor gaan. Het gaat om:

- het verlies van productiecapaciteit voor biomassa, zoals een verlies van voedsel-, vezel-, hout- en energieproductie.
- vermindering van wateropslag in de bodem. Door de toename van de verharde oppervlakte en de gereduceerde infiltratiecapaciteit wordt het regenwater versneld afgevoerd via het verharde oppervlak. Het afstromende water krijgt niet de kans om langzaam in de grond te trekken, met een vergrote kans op overstromingen tot gevolg. In tegenstelling tot deze overstromingen leidt de gereduceerde infiltratiecapaciteit ook tot verdroging. Door de beperkte infiltratie en insijpeling daalt immers het grondwaterpeil.
- verlies van reactorfunctionaliteit nodig voor transformatie, filtering en opslag van chemicaliën (koolstof, stikstof, fosfor, organische en anorganische polluenten, etc).
- verlies van functionaliteit als biologische habitat en genetische opslagruimte. Het verspreid voorkomen van deze waterondoorlaatbare elementen fragmenteert immers de open ruimte. Wegen vormen dodelijke vallen voor vele dieren, dammen onoverbrugbare barrières voor vissen en de alsmaar grotere afstand tussen natuurgebieden leidt tot isolatie van soorten. De belangrijkste effecten van habitatfragmentatie zijn enerzijds de reductie van de oppervlakte van habitatfragmenten en anderzijds de toename van ruimtelijke isolatie (Verbeylen et al., 2003; Imre, 2004; Merckx et al., 2003). De negatieve effecten van habitatversnippering op zoogdier-, vogel- en insectenpopulaties worden, op basis van empirisch onderzoek, in de literatuur grotendeels bevestigd (bv. Pimm et al., 1988).
- verlies aan cultureel erfgoed. Door bodemafdichting wordt het lokale archeologische, biologische en geologische bodemarchief afgesloten.

6.3 | Maatregelen

Om bodemafdichting aan te pakken moet ruimtebeslag aangepakt worden. Het doel is echter niet de economische ontwikkeling een halt toe te roepen of het huidige grondgebruik voor altijd te bevriezen. Veeleer is het zaak om tot een efficiënter en duurzamer gebruik van de natuurlijke hulpbronnen te komen, waarvan de bodem een belangrijke component is.

De meest geavanceerde maatregelen om bij bouwprojecten de inherent verbonden bodemafdichting te minimaliseren hebben een structuur die drie acties tegelijkertijd toepassen: beperken, verzachten en compenseren. Dit kan best toegepast worden in een hiërarchie gaande van een hoger naar een lager ambitieniveau. Aangezien het er bij de beperking van bodemafdichting op aankomt de omschakeling van groene gebieden en de daaropvolgende afdekking van (een deel van) het oppervlak ervan te voorkomen, is het hergebruik van reeds bebouwde gebieden, bijvoorbeeld brownfields, op te nemen in dit concept. Waar de bodem dan toch afgedekt wordt, worden er gepaste verzachtende maatregelen genomen om een aantal bodemfuncties te behouden en om grote directe of indirecte negatieve effecten op het milieu en het menselijk welzijn te verminderen. Indien de verzachtende maatregelen ter plaatse ontoereikend worden geacht, worden compensatiemaatregelen overwogen (EC, 2012).

Maatregelen en beleidsinstrumenten om bodemafdichting te beperken, te verzachten of te compenseren zijn opgelijst in het EU-werkdocument Richtsnoeren inzake de beste praktijken om bodemafdichting te beperken, te verzachten en te compenseren (EC, 2012) en in onderstaande titels beknopt opgelijst.

Bewustmakingscampagnes kunnen het inzicht versterken over de rol die de bodem in het ecosysteem en de economie speelt, ook het bewustzijn van mogelijke negatieve effecten van ruimtebeslag, vooral op middellange tot lange termijn, rekening houdend met de gevolgen van klimaatverandering.

6.3.1 | Bodemafdichting beperken

De beperking van bodemafdichting heeft altijd voorrang op verzachtende of compensatiemaatregelen, aangezien bodemafdichting een haast onomkeerbaar proces is. Bij beste praktijken is de bodemkwaliteit een belangrijke overweging voor elke ontwikkeling die gepaard gaat met ruimtebeslag, waarbij onvermijdbaar beslag georiënteerd wordt naar bodems van lagere kwaliteit (EC, 2012):

- Het bestaande stadsareaal maximaal benutten, zodat het niet nodig is groene ruimte op te offeren. Dit kan door meer gebruik te maken van bestaande brownfields.
- Stimulansen creëren om leegstaande huizen te huren kan ook bijdragen tot de beperking van bodemafdichting, door nieuwe bebouwing.
- De levenskwaliteit in grote stadscentra verbeteren: stadsvernieuwingsprogramma's hebben bewezen doeltreffend te zijn om nieuwe inwoners aan te trekken, de trek van de stadscentra naar de buitenwijken te keren en nieuwe werkgelegenheid te helpen creëren in verloederende stedelijke gebieden.
- De infrastructuur van het openbaar vervoer verstevigen, met inbegrip van beperkingen op het gebruik van personenwagens.
- Op nationaal/regionaal niveau meer bescherming bieden voor bodems met een hoge tot heel hoge kwaliteit op het vlak van bodemfuncties, met inbegrip van de beperking van het gebruik van bodems van hoge kwaliteit voor stedelijke ontwikkeling, met jaarlijkse controles door de gemeentebesturen.
- Geïntegreerd beheer van het kantoorgebouwenbestand in steden, om nieuwe bouwterreinen of de omschakeling van woonzones te vermijden terwijl er veel bestaande kantoorruimte leegstaat.
- Beperkingen en belastingen op tweede woningen invoeren.
- Besluitvormers, stedenbouwkundigen en bewoners beter bewust maken van de waarde van de bodem voor de levenskwaliteit in stedelijke gebieden wegens het aanbod van ecosysteemdiensten.
- Kostenberekeningsprogramma's gebruiken om het potentieel aan binnenstedelijke ontwikkeling te bepalen en om de kosten van nieuwe projecten transparant te maken.

6.3.2 | Gevolgen van bodemafdichting verzachten

Strategische milieueffectbeoordelingen voor plannen en programma's en milieueffectrapportages voor grotere projecten, kunnen belangrijke instrumenten zijn om ervoor te zorgen dat ruimtebeslag en bodemafdichting zo duurzaam mogelijk verlopen. Aandachtspunten en maatregelen kunnen zijn (EC, 2012):

- Het vermijden van onnodige schade aan bodems die niet rechtstreeks getroffen worden door de bouwactiviteit, bijvoorbeeld grond die als tuin of als gemeenschappelijke groene ruimte gebruikt zal worden.
- Het gebruik van hoogdoorlatende materialen en oppervlakken. Over het algemeen bieden parkeerterreinen vele mogelijkheden voor een doorlatende bedekking van het oppervlak.
- Groene infrastructuur en wateropvang van groeninfrastructuren kunnen mee het hitte-eilandeffect terugdringen in stedelijke omgevingen.
- Een van de doeltreffendste manieren om groene infrastructuur aan te leggen, is grondbeheer op een meer geïntegreerde manier aanpakken.
- Aanleg van ondiepe bekkens om regenwater uit de omgeving op te vangen en de bevordering van ondergrondse infiltratie.
- Wateropvangbekkens of, op kleinere schaal, reservoirs voor huishoudelijk gebruik zijn vaak de meest haalbare techniek voor de opvang van regenwater.

6.3.3 | Bodemafdichting compenseren

Het is van essentieel belang dat bodemafdichting zo veel mogelijk beperkt wordt en dat de negatieve gevolgen ervan verzacht worden. Alleen waar dat niet mogelijk is, wordt 'compensatie' overwogen.

Het is niet zo dat bodemafdichting exact gecompenseerd kan worden door 'ergens anders iets anders te doen'. Het doel bestaat erin in een bepaald gebied (de meeste van) de bodemfuncties in stand te houden of te herstellen. Compensatiemaatregelen zijn er bijgevolg op gericht om bodemfuncties te herstellen of te verbeteren en zo verder reikende schadelijke effecten van bodemafdichting te vermijden.

Er zijn verschillende manieren om het verlies aan bodem en de functies ervan te compenseren:

- wanneer de bodem in een bepaald gebied wordt afgedekt, de afgegraven teelaarde elders hergebruiken;
- in een bepaald gebied open bodem terugwinnen ter compensatie voor bodemafdichting elders;
- wanneer bodemafdichting plaatsvindt, een heffing opleggen die gebruikt wordt voor bodembescherming of andere milieudoelinden.

7 | Bodemverontreiniging

7.1 | Mechanismen

7.1.1 | Begrippen

Bodemverontreiniging wordt in het Bodemdecreet omschreven als de aanwezigheid van stoffen of organismen, veroorzaakt door menselijke activiteiten, op of in de bodem of opstallen, die de kwaliteit van de bodem op rechtstreekse of onrechtstreekse wijze nadelig beïnvloeden of kunnen beïnvloeden. Of eenvoudiger: bodemverontreiniging heeft betrekking op situaties waarbij door menselijke activiteiten milieugevaarlijke stoffen in de bodem terechtkomen zodat de kwaliteit ervan op (on)rechtstreekse wijze nadelig kan worden beïnvloed.

In het Bodemdecreet wordt gesproken over *nieuwe* bodemverontreiniging, als de verontreiniging tot stand gekomen is ná 28 oktober 1995, de inwerkingtreding van het Bodemsaneringsdecreet, en *historische* bodemverontreiniging, als deze tot stand is gekomen vóór 29 oktober 1995. Dit onderscheid heeft belangrijke gevolgen: saneringswerken bij nieuwe bodemverontreiniging zijn namelijk verplicht van zodra de verontreiniging de bodemsaneringsnormen overschrijdt, terwijl saneringswerken bij historische bodemverontreiniging pas verplicht zijn wanneer de verontreiniging een ernstige bedreiging vormt. Ook moet voor nieuwe bodemverontreiniging een bodemsanering onmiddellijk worden uitgevoerd, terwijl voor historische verontreiniging gewacht kan worden op een aanmaning van OVAM. Indien voor een verontreinigende stof nog geen bodemsaneringsnormen gedefinieerd zijn, worden saneringswerken uitgevoerd indien na de uitvoering van een risico-evaluatie blijkt dat de verontreiniging een ernstige bedreiging vormt.

Er is een onderscheid tussen *diffuse bodemverontreiniging* (niet gelokaliseerde bron, sterke verspreiding van de verontreiniging) en *puntverontreiniging* (duidelijk lokaliseerbare bron, beperkte of sterke verspreiding van de verontreiniging).

7.1.2 | Bodemverontreiniging door puntbronnen

Op diverse plaatsen waar een risico-inrichting wordt of werd geëxploiteerd, is de bodem verontreinigd met schadelijke stoffen. De oorzaken zijn uiteenlopend: de belastende industriële activiteiten zelf, maar ook ongevallen of productiefouten, lekkende tanks en pijpleidingen, onzorgvuldige opslag van grondstoffen, eindproducten of afvalstoffen. Ook het morsen bij vervoer of bij op- of overslag van producten kan aanleiding geven tot bodemverontreiniging.

Ook gezinnen kunnen de bodem verontreinigen. Het meest gekende voorbeeld zijn de stookolietanks. Overvulling en corrosie van (ondergrondse) stookolietanks zijn de oorzaak van talrijke calamiteiten met nieuwe bodemverontreiniging tot gevolg.

Bodemverontreiniging heeft vaak slechts lokaal een effect op de grond waar de verontreiniging tot stand kwam. Een immobiele verontreiniging in de onverzadigde zone heeft zelden een grote impact op de omgeving. Als een verontreiniging zich heeft verspreid naar het grondwater is de kans zeer reëel dat ze zich verspreidt naar aanpalende gronden. Meestal blijft deze verspreiding beperkt tot de nabije omgeving. In sommige gevallen is er echter zoveel verontreiniging in of op de bodem terechtgekomen, en is de bodem zo doorlatend en de verontreiniging zo mobiel, dat ze zich in de ruimere omgeving verspreid heeft. Hierdoor is sprake van bodemverontreiniging die ontstaan is in een puntbron maar zich via het grondwater in de ruime omgeving heeft verspreid en dus over zeer grote oppervlaktes voorkomt. Zeker in een dichtbebouwde regio als Vlaanderen zijn de gevolgen hiervan vaak niet te onderschatten. Vele relatief oude industrieterreinen en KMO-vestigingen bevinden zich aan de rand van of midden in een woonzone. Indien de grondwaterverontreiniging zich verspreidt tot onder de woningen, indien het grondwater zich ondiep bevindt en de verontreinigende stoffen relatief vluchtig zijn, kunnen de verontreinigende stoffen migreren en de luchtkwaliteit in de woningen aantasten. In relatief landelijke gebieden speelt mogelijk ook het feit dat niet alle woningen zijn aangesloten op het openbaar drinkwaternet en dat de verontreiniging mee opgepompt wordt als consumptiewater. Of er worden, al dan niet vergunde, ondiepe grondwaterwinningsputten geplaatst die moeten voorzien in drinkwater voor vee of sproeiwater voor groenten.

Gelijkaardige problemen kunnen zich echter ook voordoen op industrieterreinen waar een bedrijf het grondwater oppompt als proceswater. Indien dit grondwater verontreinigd is en de verontreinigende stoffen relatief vluchtig zijn, kunnen gezondheidsrisico's ontstaan voor de werknemers van het bedrijf in kwestie die werken in de buurt van installaties die gebruik maken van dat water. Anderzijds is de kans zeer reëel dat de verontreiniging ontoelaatbaar is in het productieproces zoals bijvoorbeeld in de voedingssector. De schade aan een productieproces kan dan aanzienlijk zijn. Indien een risicolocatie gelegen is in de buurt van een waterwinningsgebied (of zelfs in de beschermingszone) spreekt het voor zich dat een grondwaterverontreiniging op zeer korte termijn nefaste effecten kan hebben op de waterwinning. De kwaliteitseisen voor drinkwater zijn dermate streng dat zelfs een relatief geringe verontreiniging kan betekenen dat een pompput moet gesloten worden.

In een beperkt aantal gevallen kan de grondwaterverontreiniging dermate ernstig zijn, dat het grondwater in een grote regio wordt aangetast en dat kwel van verontreinigd grondwater optreedt naar het oppervlaktewater.

Een niet te onderschatten vorm van bodemverontreiniging over grote oppervlaktes is de waterbodemverontreiniging. Lozing van verontreinigd water (eventueel via riool, puntbron) in oppervlaktewater leidt per definitie tot verontreiniging van de bodem van de waterloop door sedimentatie. Het jarenlang ongecontroleerd ruimen van de waterloop, waarbij ruimingsspecie aangebracht werd op de oever zonder enige kwaliteitscontrole, heeft vaak geleid tot verontreiniging van de oeverstrook.

Ook het ontgraven en hergebruik van potentieel verontreinigde bodem kan een verontreiniging veroorzaken. Deze ontgraven grond kan afkomstig zijn van kleinschalige projecten zoals de onderkeldering van een nieuwbouwwoning of van grote werken zoals (her)aanleg van wegen of de bouw van een ondergrondse parkeergarage. Als deze uitgegraven bodem verontreinigd is, kan hij een nieuwe bron van bodemverontreiniging vormen op de locatie waar hij wordt aangewend. Hierbij denken we bijvoorbeeld aan een particulier die zijn oprit aanlegt, een natuurbeheerder die bermen aanlegt of een bedrijf dat een fabrieksterrein nivelleert. Pas sinds het Bodemsaneringsdecreet van kracht werd, blijken diverse actoren zich van de risico's bewust: als een grond wordt opgehoogd met verontreinigde bodem en daar de bodemsaneringsnorm wordt overschreden, ontstaat namelijk een zelfstandige saneringsplicht. De regeling grondverzet in het Bodemdecreet zorgt ervoor dat verontreiniging door uitgegraven bodem wordt voorkomen.

7.1.3 | Diffuse bodemverontreiniging

Diffuse bodemverontreiniging is bodemverontreiniging die niet werd veroorzaakt door een gekende puntbron of risicoactiviteit, maar het gevolg is van bijvoorbeeld diffuse emissies zoals afkomstig van verkeer, of van allerlei (beperkte) activiteiten in het verleden waar men nu geen weet meer van heeft, zoals achterlaten van afval, stoken, kleinschalige bedrijfheden ...

In principe kunnen we ook een grootschalige grondwaterverontreiniging die ontstond in een puntbron beschouwen als een diffuse bodemverontreiniging, maar dit is niet gebruikelijk. Zeker bij oude industrieterreinen treffen we echter af en toe een zeer uitgestrekte grondwaterverontreiniging aan waarvan met zekerheid gesteld kan worden dat diverse bronnen aan de oorsprong liggen van de verontreiniging. Vaak gaat het over zeer grote terreinen die gedurende vele tientallen jaren in gebruik zijn of geweest zijn als industrieterrein en waarvan het gebruik en/of het eigendom in de loop der jaren vaak is gewijzigd. Enkele bekende voorbeelden hiervan zijn Petroleuminstelling Zuid in Antwerpen en de oude industriezone Vilvoorde-Machelen. Diverse industriële activiteiten hebben op deze gronden geleid tot een verontreiniging van de bodem; via de bodem is ook het grondwater in sterke mate verontreinigd. Hoewel het vaak met zekerheid is te zeggen dat bodemverontreiniging is tot stand gekomen op diverse percelen die deel uitmaken van het industrieterrein, is het in deze gevallen totaal niet duidelijk wat het aandeel is van de diverse terreinen in de verspreide grondwaterverontreiniging. De Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) spreekt in dit geval over complexe verontreinigingen. Juridisch wordt de aanpak van deze verontreinigingen bijkomend bemoeilijkt doordat vaak ook niet met zekerheid gesteld kan worden in welke periode een bepaalde verontreiniging is ontstaan, waardoor het moeilijk is om te bepalen wie saneringsplichtig of -aansprakelijk is voor welk deel van de verontreiniging.

Ook emissies van verontreinigende stoffen in de lucht kunnen aanleiding geven tot bodemverontreiniging die over zeer grote oppervlaktes voorkomt. Een bekend voorbeeld hiervan is de verontreiniging met zware metalen door atmosferische depositie afkomstig van de vroegere pyro-metallurgische processen (zoals in Hoboken, Lommel, Overpelt, Beerse, Balen, Dilsen, Bocholt ...). De verontreinigende stoffen werden gedurende tientallen jaren geëmitteerd in de lucht via schouwen, via verwaaiing van grootschalige opslag in open lucht van ertsen en via lekken in installaties. Waar de stofdeeltjes neervielen, veroorzaakten ze bodemverontreiniging in een wijde omgeving rond de bedrijven. Sommige zware metalen zijn relatief goed uitloogbaar en veroorzaken zo bijkomend een diffuse grondwaterverontreiniging (zie voor meer informatie de MIRA-themabeschrijving Verspreiding van zware metalen).

Ook burgers en bedrijven hebben in min of meer belangrijke mate bijgedragen aan diffuse bodemverontreiniging via het diffuus gebruik van verontreinigende stoffen. Het onoordeelkundig gebruik van pesticiden (insecticiden, herbiciden, enz.) is waarschijnlijk wel de meest verbreide vorm. Maar ook onvolledige verbrandingsprocessen (bv. in motoren, verwarmingsinstallaties, afvalverbranding in open lucht ...) zijn niet te onderschatten emissies van PAK's. Zowel in oude woonkernen als langs belangrijke verkeersassen worden dan ook verhoogde concentraties aan deze polluenten teruggevonden. Ook treffen we in oude woonkernen vaak verhoogde concentraties aan PAK's aan die veroorzaakt werden door het ledigen van de aslade van de kachel aan de achterdeur, op het tuinpad ... Hierdoor bleven de paden vorstvrij en goed begaanbaar, ook bij streng winterweer. De assen bevatten nog behoorlijk wat materiaal dat niet volledig verbrand was en dus ook hoge concentraties aan PAK's. In de omgeving van bedrijven die restfracties met een hoge mechanische stabiliteit produceerden, werden deze fracties vaak gebruikt als weg- of erfverharding. Diverse wegen, particuliere opritten en erven in de buurt van de oude non-ferro bedrijven werden bijvoorbeeld verhard met lood- en zinkslakken (zie MIRA-themabeschrijving Verspreiding van zware metalen). In de omgeving van (vroegere) asbestverwerkende bedrijven werden ze vaak verhard met asbesthoudende materialen en rond kolengestookte elektriciteitscentrales werden vaak de assen gebruikt. Op het eerste zicht waren deze materialen perfect geschikt als verhardingsmateriaal; ze waren in grote hoeveelheden beschikbaar, (vrijwel) gratis, hadden een goed waterafvoerend vermogen en een grote mechanische stabiliteit. Vaak vormt het verhardend materiaal op zich een verontreiniging en heeft het de grond nabij of onder de verharding verontreinigd. Indien het materiaal uitloogbaar is, vormt het niet zelden ook een min of meer belangrijke bron van diffuse grondwaterverontreiniging.

7.1.4 | Verspreiding van de verontreiniging en blootstelling

Wanneer een verontreinigende stof in de bodem terechtkomt verdeelt deze zich over de drie fasen van de bodem (vaste fase, poriewater, bodemlucht). Afhankelijk van de fysicochemische eigenschappen van de stof en de bodemkenmerken verspreidt de stof zich naar andere milieucompartimenten (grondwater, buitenlucht, binnenlucht, planten ...). Deze verdeling- en transportprocessen zijn mathematisch beschreven in de verspreidingsmodule van het model S-Risk (zie www.s-risk.be).

Wanneer mensen verblijven op of nabij een verontreinigde bodem kunnen ze langs verschillende wegen in contact komen met de verontreinigende stoffen in de verschillende milieucompartimenten. Het belang van de blootstellingswegen wordt bepaald door de menselijke activiteit op een bepaald terrein. Een zekere differentiatie gebeurt door het definiëren van blootstellingsscenario's. Deze scenario's vinden hun weerslag in de bestemmingstypes. Men onderscheidt vijf bestemmingstypes: type I (vb. bos- en natuurgebieden, VEN-gebieden), type II (vb. agrarisch gebied, woongebied met landelijk karakter), type III (vb. woon- en woonuitbreidingsgebieden, scholen), type IV (vb. park- en recreatiegebieden) en type V (industriegebied, KMO-gebied, stortgebied).

Het contact via de verschillende blootstellingswegen resulteert in een globale blootstelling ten gevolge van bodemverontreiniging. Tabel 3 geeft een overzicht van de verschillende blootstellingswegen bij bodemverontreiniging.

Tabel 3: Overzicht van de blootstellingswegen bij bodemverontreiniging

route	blootstellingsweg
oraal (via de mond)	1. inname van bodemdeeltjes (binnen, buiten) 2. inname van water 3. inname van groenten 4. inname van vlees en zuivelproducten
inhalatoir (via inademing)	5. inademing van vluchtige stoffen (binnenlucht, buitenlucht, douchen) 6. inademing van opgewaaide bodemdeeltjes
dermaal (via de huid)	7. bedekking van huid met bodemdeeltjes 8. contact van huid met water

7.2 | Maatschappelijke activiteiten, druk en gevolgen

Niet alleen toename in bebouwing en bevolking of wijzigingen in het landgebruik, beïnvloeden de bodemkwaliteit. De bodem in Vlaanderen wordt door allerlei antropogene invloeden verontreinigd met milieugevaarlijke stoffen zoals zware metalen, organische stoffen en pesticiden. Een vervuilde bodem verliest zelf aan kwaliteit én kan de kwaliteit van het leven bedreigen: mensen, dieren en planten kunnen in contact komen met schadelijke stoffen of het grondwater kan erdoor aangetast worden. Verontreinigingen zijn voornamelijk het gevolg van bepaalde activiteiten van de sectoren industrie, energie, handel & diensten, maar ze worden ook veroorzaakt door de landbouw (nitraten in het grondwater) en de gezinnen. In onze consumptiemaatschappij stijgt immers de vraag naar levensmiddelen, elektriciteit, gas, water, (luke)goederen en bewoning met een versnelling van de productie en het verbruik van energie en natuurlijke hulpbronnen tot gevolg. Ook de hieraan gekoppelde afvalproductie is mee verantwoordelijk voor bodemverontreiniging.

7.2.1 | Verontreinigende stofsoorten in Vlaanderen

De belangrijkste soorten verontreinigende stoffen zijn:

- **minerale olie:** een groepsnaam voor de alifatische koolwaterstoffen. Verontreiniging met minerale olie is meestal het gevolg van lekken en morsen van vloeibare brandstoffen (benzine, diesel, stookolie, kerosine).
- **BTEX:** groepsnaam voor benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen. Deze producten worden frequent gebruikt als solvent en zijn een belangrijke basisstof in de petrochemie. Verontreiniging met benzeen is echter vaak het gevolg van een verontreiniging met benzine.
- **zware metalen:** cadmium, zink, arseen, chroom, koper, kwik, lood en nikkel. Verontreiniging met zware metalen kan te wijten zijn aan diffuse emissies (non-ferro, verbranding van afval, gebruik van loodhoudende benzine) of uitlogen van metaalhoudende afvalstoffen gestockeerd op of in de bodem.
- **gechloreerde oplosmiddelen (VOCI's):** de meest gekende gechloreerde oplosmiddelen tetra- en trichlooretheen werden veelvuldig gebruikt als ontvetters in de metaalbewerking en in de textielreiniging.
- **PAK's:** PAK's is de benaming van een groep pollutanten, de poly-aromatische koolwaterstoffen, waaronder benzo(a)pyreen, naftaleen en fenantreen. PAK-verontreinigingen zijn typisch het resultaat van onvolledige verbrandingsprocessen, en worden dus zeer veelvuldig aangetroffen. In enkele gevallen hebben emissies van grote thermische installaties via de schoorstenen aanleiding gegeven tot diffuse bodemverontreiniging ten gevolge van atmosferische depositie. PAK-verontreinigingen worden ook regelmatig teruggevonden bij oude gasfabrieken. Ten gevolge van verbranding van vloeibare brandstoffen, kan ook verkeer aangewezen worden als een bron van diffuse bodemverontreiniging met PAK's.

Daarnaast hebben ook particuliere verwarmingen aanleiding gegeven tot de uitstoot van PAK's en heeft de oude gewoonte om de aslade van de kachel uit te strooien over aangevroren paden, aanleiding gegeven tot wijdverspreide PAK-verontreinigingen in stedelijke omgeving. PAK's

maken vaak ook deel uit van zwaardere petroleumfracties, zoals zware smeerolie en teer en kwamen in het verleden vaak voor in asfalt. Aangezien PAK's zeer goed adsorberen aan bodemdeeltjes, worden deze pollutanten vrijwel enkel in het vaste deel van de aarde aangetroffen. Ten gevolge van stookolieverontreinigingen komt naftaleen echter meestal voor in combinatie met BTEX in het grondwater.

7.2.2 | Gevolgen van bodemverontreiniging

Bodemverontreiniging heeft zowel in stedelijk als in landelijk gebied vaak ernstige ruimtelijke en economische gevolgen. De gebruiksmogelijkheden van verontreinigde bodems zijn immers beperkt. Als te laat wordt onderkend dat sanering nodig is of als de financiering hiervan te laat wordt geregeld, dan stagneren de ruimtelijke en economische ontwikkelingen van huisvesting, landinrichting, infrastructuur en bedrijventerreinen.

Hoewel in de meeste gevallen de risico's voor de mens de meeste aandacht krijgen, dient ook aandacht te worden besteed aan de risico's voor planten, dieren en het ecosysteem. Bodemverontreiniging kan ook een ongunstige invloed hebben op de biodiversiteit. Gevoelige (groepen van) bodemorganismen kunnen een effect ondervinden van bodemverontreiniging. Hierdoor kunnen cruciale processen (bv. stikstoffixatie door planten) stilvallen of via minder efficiënte wegen verlopen. De effecten van bodemverontreiniging op ecosystemen in kaart brengen is echter complex. In een ecosysteem bevinden zich immers vele verschillende soorten met elk hun eigen gevoeligheden en optimale levensomstandigheden. Ook de biobeschikbaarheid van stoffen en elementen die de levenskwaliteit van een bepaalde soort beïnvloeden, is van belang.

Een sanering kan noodzakelijk zijn omdat de gezondheidsrisico's voor de mens, de risico's voor het ecosysteem of de verspreidingsrisico's te groot zijn.

7.3 | Maatregelen en beleidsinstrumenten

7.3.1 | Lopend beleid

Om de druk op de bodem door de industrie in te schatten, heeft OVAM in 2006 een behoefteraming laten uitvoeren (Ecolas, 2006). In deze studie werd onder andere een raming gemaakt van het aantal risicogronden, gronden waar activiteiten worden of werden uitgevoerd die mogelijk bodemverontreiniging kunnen veroorzaken.

Risicogronden worden onderzocht aan de hand van een oriënterend bodemonderzoek (OBO). Het *oriënterend bodemonderzoek* (OBO) is de eerste stap. Het geeft een beeld van de toestand van de bodem op een volledig perceel. Het houdt een beperkt historisch onderzoek en een beperkte monsterneming in. Op basis van het OBO wordt bepaald of er al dan niet verdere maatregelen dienen genomen te worden, zijnde de uitvoering van een beschrijvend bodemonderzoek (BBO). In een *beschrijvend bodemonderzoek* (BBO) wordt nagegaan tot waar de verontreiniging zich heeft verspreid (de verontreiniging wordt afgeperkt) en wordt de ernst van de bodemverontreiniging vastgesteld. Het onderzoek beschrijft de aard, de hoeveelheid, de concentratie en de oorsprong van de verontreinigde stoffen of organismen, de mogelijkheid op verspreiding daarvan, het gevaar op blootstelling voor mensen, planten, dieren en grond- en oppervlaktewater. Het onderzoek maakt ook een prognose van de spontane evolutie van de verontreinigde bodem. Indien uit dit beschrijvend bodemonderzoek blijkt dat de bodemverontreiniging geen ernstige verontreiniging vormt, dienen geen verdere maatregelen te worden genomen. Indien zich wél een sanering opdringt, start fase één van de bodemsanering: de opmaak van een bodemsaneringsproject (BSP). Het *bodemsaneringsproject* (BSP) is een studie waarin wordt vastgelegd op welke wijze de bodemsanering zal worden uitgevoerd. Hierbij wordt rekening gehouden met de best beschikbare technische oplossingen die met succes in de praktijk zijn toegepast en waarvan de kostprijs niet onredelijk is in verhouding tot het te bereiken resultaat op het vlak van bescherming van de mens en het milieu (BATNEEC). Deze keuze is onafhankelijk van de financiële draagkracht van diegene op wie de saneringsverplichting rust. Op basis van een conform verklaard bodemsaneringsproject worden de bodemsaneringswerken (BSW) uitgevoerd.

De OVAM beheert sinds 1 juni 2008 een grondeninformatieregister (GIR) waarin ze gegevens over gronden opneemt die haar in het kader van het Bodemdecreet bezorgd worden. Zowel de informatie over schone gronden als verontreinigde gronden wordt hier dus in opgenomen.

Op 1 juni 2008 trad de gewijzigde grondverzetsregeling in voege. Met deze wijziging is onder meer de definitie van verdachte gronden gewijzigd. Verdachte gronden zijn nu onder meer risicogronden, gronden opgenomen in het grondeninformatieregister waarvoor in het vaste deel van de aarde concentraties werden aangetroffen boven de richtwaarden. Dit betekent een belangrijke uitbreiding van het onderzoek op gronden die ten gevolge van historische of actuele activiteiten verontreinigd zijn door zowel puntbronnen als door diffuse verontreiniging. De gegevens van de onderzochte gronden worden opgenomen in het databanksysteem van de erkende bodembeheerorganisaties. Met behulp van de gegevens uit de technische verslagen en de bodembeheerrapporten zijn globale kwaliteitsgegevens van de onderzochte gronden beschikbaar.

De bodemsaneringsnormen beantwoorden aan een niveau van bodemverontreiniging waar – bij overschrijding ervan – ernstige nadelige effecten kunnen optreden voor de mens of het milieu. Hierbij houdt men rekening met de kenmerken van de bodem en de functies die deze vervult. Bodemsaneringsnormen worden opgesteld voor de vaste fase (grond) en het grondwater.

7.3.2 | Kostprijs van een bodemsanering

Aan het in kaart brengen en verwijderen van een bodemverontreiniging hangt een hoog prijskaartje. Dit is te wijten aan:

- het beschrijvend bodemonderzoek: sommige bodemverontreinigingen zijn immobiel (vb. sommige PAK's) of hebben de neiging om zich te accumuleren in de bovenste lagen van het grondwater (minerale olie). Deze bodemverontreinigingen zijn relatief eenvoudig in kaart te brengen. Andere bodemverontreinigingen hebben de neiging om uit te zakken in het grondwater omdat hun dichtheid groter is dan water (gechloreerde solventen) of zijn makkelijk oplosbaar in water (zware metalen) waardoor ze zich over grote afstanden, zowel horizontaal als verticaal kunnen verspreiden. Hoe langer de verontreiniging al aanwezig is, hoe meer ze zich kan verspreid hebben. Deze onderzoeken dienen in meerdere fasen te worden uitgevoerd en kunnen zeer duur worden. Bovendien spelen de lokale hydrogeologie en de aanwezige verhardingen, gebouwen of nutsleidingen een belangrijke rol in het bepalen van de onderzoeksstrategie.
- de bodemsaneringswerken: de gebruikte technieken zijn afhankelijk van de parameters waaruit de bodemverontreiniging bestaat, de omvang van de bodemverontreiniging en de plaatselijke omstandigheden, zoals bodemkenmerken, aanwezige gebouwen ... De keuze van de techniek wordt bepaald via het BATNEEC-principe dat stelt dat de best beschikbare techniek dient aangewend te worden, zonder dat hiervoor overmatige kosten worden gemaakt. Bepaalde technieken zoals ontgraving hebben een duidelijke kostprijs omdat ze éénmalig dienen uitgevoerd te worden, voor andere technieken zoals grondwateronttrekking- en zuivering zijn langdurige opstellingen en huur van materiaal nodig en vaak is de duur van de sanering langer dan oorspronkelijk werd geraamd. De keuze en bijgevolg de kostprijs van een bodemsaneringstechniek, wordt bepaald door al deze factoren.

Alhoewel het maatschappelijk belang van het verwijderen van een risicovolle bodemverontreiniging groot is, is dit voor de saneringsplichtige vaak een financiële opdoffer. Immers niet alleen grote industriële bedrijven, maar ook particulieren kunnen een risicoactiviteit uitbaten die een ernstige bodemverontreiniging kan veroorzaken. De beschikbare financiële middelen om een bodemsanering te bekostigen, zijn dan ook vaak niet toereikend, waardoor de ontwikkeling van het bedrijf sterk wordt geremd of de financiële voorraden volledig worden uitgeput met alle gevolgen van dien.

Via prioriteitsstelling en spreiding in de tijd, het oprichten van sectorale saneringsfondsen, de cofinancieringsregeling, het kaderen van een bodemsanering in duurzame ontwikkeling en het koppelen van een bodemsanering aan de overdracht van het terrein of projectontwikkeling, kan de financiële last van een bodemverontreiniging verminderd worden.

De oprichting van een bodemsaneringsfonds per bedrijfssector, waarmee de bodemsaneringswerken worden uitgevoerd in ruil voor een financiële bijdrage die de betrokken bedrijven in het fonds storten, zorgt ervoor dat de kosten solidair worden gedragen binnen de sector en gespreid worden door de jaarlijkse bijdragen. Bodemverontreiniging is immers dikwijls gebonden aan de eigenheid van de activiteit, de aard van de bodem en de situering van een perceel.

Behalve de kosten te spreiden in de tijd en over de hele sector, kunnen bodemsaneringsfondsen ook voorzien in bijstand rond preventie, onderzoek en effectieve sanering. Daarnaast kunnen ze een uitweg bieden aan de mogelijke financieringsproblemen van de individuele exploitant. De bodemverontreiniging is immers niet altijd gerelateerd aan de omvang van het bedrijf. Het solidariteitsprincipe dat structureel in deze fondsen ingebakken zit, moet de reiniging van vervuilde ondergrond financieel haalbaar maken.

Anno 2014 zijn volgende bodemsaneringsfondsen opgericht:

- BOFAS, bodemsanering van benzinestations, gestart in 2005;
- VLABOTEX, bodemsanering voor de droogkuissector, vanaf 2007.

Referenties

Antle J. et al. (2001) Economic Analysis of Agricultural Soil Carbon Sequestration: An Integrated Assessment Approach. *Journal of Agr. and Resource Economics* 26(2):344-367.

Bailey K.L. & Lazarovits G. (2003) Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil & Tillage Research* 72, 169-180.

Bakker M.M., Govers G. & Rounsevell M.D.A. (2004) The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work, *Catena*, 57 : 55-76.

BDB & UGent (2008) Ontwikkelen van een expertsysteem voor het adviseren van het koolstofbeheer in de landbouwbodems. Studie uitgevoerd door de Bodemkundige Dienst van België en de Universiteit Gent, vakgroep Bodembeheer en Bodemhygiëne, in opdracht van de Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, ALBON, Dienst Land- en Bodembescherming, Bodemkundige Dienst van België, Universiteit Gent Vakgroep Bodembeheer en bodemhygiëne.

Beel A., Govers G. & Notebaert B. (2006) Scenario's voor de reductie van erosie en sedimentaanvoer in Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA/2006/12, 22p.

Benjamin J.G., Mikha M., Nielsen D.C., Vigil M.F., Calderón F. & Henry W.B. (2007) Cropping intensity effects on physical properties of a no-till silt loam. *Soil Science Society of America Journal* 71, 1160-1165.

Bloem J., Schouten T., Didden W.A.M., Jagers op Akkerhuis G.A.J.M., Keidel H., Rutgers M. & Breure A.M. (2003). Measuring soil biodiversity: experiences, impediments and research needs. In: *Proceedings from the Organisation of Economic Co-operation and Development, (OECD) Expert meeting 'Agricultural impacts on soil erosion and soil biodiversity: developing indicators for policy analysis'*, Parijs, p. 109-120.

Böhme L., Langer U. & Böhme F. (2005) Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments. *Agr. Ecosyst. Environ.* 109, 141-152.

Boon W., Ver Elst P., Deckers S., Vogels N., Bries J. & Vandendriessche H. (2009) Wegwijs in de bodemvruchtbaarheid van de Belgische akkerbouw- en weilandpercelen (2004-2007). Bodemkundige Dienst van België. 149 pp.

Cauwenberghs K. (2000) Begroting en ruimtelijke afbakening van sedimentafvoer: bodemerosiemodellering op stroomgebiedsniveau: een bodemerosiekaart voor Vlaanderen, Studiedag Erosiebestrijding in Vlaanderen, Technologisch Instituut, genootschap Land, Natuur en Water, 27/09/2000, Bierbeek.

Coorevits L. (2009) Beworteling van groenbedekkers in functie van bodemverdichting - consequenties voor de stikstofdynamiek. Thesis, K.U. Leuven, Leuven, 124 p.

Cuijpers W., Smeding F. & van der Burgt G. (2008) Bodemgezondheid in de biologische kasteelt, Deel 1: definitiestudie. Louis Bolk Instituut, Driebergen, Nederland. 35 p.

Curtin D., Wang H., Selles F., Zentner R.P., Biederbeck V.O., Campbell C.A. (2000) Legume green manure as partial fallow replacement in semiarid Saskatchewan: effect of carbon fluxes. *Can. J. Soil Sci.* 80, 499-505.

De Meyer A., Tirry D., Gulincx H. & Van Orshoven J. (2011) Ondersteunend Onderzoek. Actualisatie MIRA-achtergronddocument Bodem. Thema Bodemafdekking. Eindrapport. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2011/04, SADL & Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, KU Leuven.

de Wit J. (2013) Bedrijfseconomische effecten van verhoging van het bodemorganischestofgehalte, compostgebruik in de akkerbouw. Publicatienummer 2013 005 LbD, Louis Bolk Instituut, www.louisbolk.nl.

D'Haene K., De Neve S., Sleutel S., Kader M.D.A., Gabriels D. & Hofman G. (2006). Evolutie van organische stof en organische stoffracties onder verminderde bodembewerking in België. In *Organische stof in de bodem* (26 oktober 2006), Studiedag ILVO, Melle, België, 45-62.

EC (2006) Thematische strategie inzake bodembescherming. Mededeling van de commissie aan de Raad, het Europees Parlement, het Economische en Sociaal Comité en het Comité van de Regio's. Europese Commissie (EC), 13 p.

EC (2012) Richtsnoeren inzake de beste praktijken om bodemafdekking te beperken, te verzachten en te compenseren, Werkdocument van de diensten van de commissie.

Ecolas (2006) Financiële behoeftebepaling met betrekking tot bodemsanering, studie uitgevoerd in opdracht van OVAM, www.ovam.be.

- Esteve J.F., Imeson A., Jarman R., Barberis R., Rydell B., Sánchez V.C. & Vandekerckhove L. (2004) Pressures and drivers causing soil erosion. In: Van-Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.-R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C. & Selvaradjou S.-K. (Eds.) Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/2, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 133-149.
- Forge T.A., Hogue E., Neilsen G. & Neilsen D. (2003) Effects of organic matter mulches on soil microfauna in the root zone of apple: implications for nutrient fluxes and functional diversity of the soil food web. *Appl. Soil Ecol.* 22, 39-54.
- Gillabel J. (2010) Verkennen van de invloed van klimaatwijzigingen op bodem organische stof dynamiek over het volledige bodemprofiel, doctoraatsthesis KU Leuven, Leuven.
- Govers G., Vandale K., Desmet P., Poesen J, Bunte K. (1994) The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *European Journal of Soil Science*, 45(4) : 469-478.
- Gulinck H., Meeus S., Bomans K., Dewaelheyns V. & Hermans S. (2007) Milieurapport Vlaanderen MIRA-achtergronddocument Thema Versnippering. Afdeling Bos, Natuur en Landschap; Departement Aard- en omgevingswetenschappen, KU Leuven met medewerking van Steenberghen T. & Wijnants J., SADL.
- Hendrickx G., Boon W., Bries J., Kempeneers L., Vandendriessche H., Deckers S. & Geypens M. (1992) De chemische bodemvruchtbaarheid van het Vlaamse akkerbouw- en weilandareaal (1989-1991). Bodemkundige Dienst van België - VLM.
- Houot S., Bodineau G., Rampon J.N., Balesdent J. & Le Villio-Poitrenaud M. (2007) Effect of repeated urban compost applications on soil organic matter. In Proceedings International Symposium of organic matter dynamics in agro-ecosystems (16 -19 juli 2007), Poitiers, Frankrijk, 90-91.
- Ide D. (1985) Onderbodemwoeling van verdichte lagen als bodemverbeteringstechniek. Doctoraat, UGent, Gent.
- Imre A.R. & Bogaert J. (2004) The fractal dimension as a measure of the quality of habitats. *Acta Biotheoretica* 52: 41-56.
- IPCC (2007) Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, (Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M. & Miller H.), Cambridge, Cambridge University Press.
- Jones R.J.A., Le Bissonnais Y., Bazzoffi P., Díaz S.J., Düwel O., Loj, G., Øygarden L., Prasuhn V., Rydell B., Strauss P., Üveges J.B., Vandekerckhove L. & Yordanov Y. (2004) Nature and extent of soil erosion in Europe. In: Van Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.-R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C. & Selvaradjou S.-K. (Eds.), Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/2, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 150-190.
- Kandeler E., Stemmer M. & Klimanek E.M. (1999) Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management. *Soil Biol. Biochem.* 31, 261-273.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F. & Schuman G.E. (1997) Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Koopmans C., Bokhorst J., ter Berg C. & van Eekeren N. (2007) Bodemsignalen: praktijkgids voor een vruchtbare bodem. Roodbont Uitgeverij, Louis Bolk Instituut (LBI), Driebergen, 96 p.
- Koopmans C.J. & Brands L. (2001) Testkit bodemkwaliteit. Ondersteuning van duurzaam bodembeheer. Louis Bolk Instituut (LBI), Driebergen, 92 p.
- Koopmans C.J., Smeding F.W., Rutgers M., Bloem J. & van Eekeren N. (2006) Biodiversiteit en bodembeheer in de landbouw. LBI rapport nr. LB14, Louis Bolk Instituut (LBI), Driebergen, 69 p.
- Kortleven J. (1963) Kwantitatieve aspecten van humusopbouw en humusafbraak. Instituut voor bodemvruchtbaarheid, Groningen, 109 pp.
- Kurle J.E., Grau C.R., Oplinger E.S. & Mengistu A. (2001) Tillage, crop sequence and cultivar effects on Sclerotinia stem rot incidence and yield in soybean. *Agronomy Journal* 93, 973-982.
- Lal R. (2007) Challenges and opportunities in organic matter research. In Proceedings International Symposium of organic matter dynamics in agro-ecosystems (16 -19 juli 2007), Poitiers, Frankrijk, 30-33.
- Leroy B.L.M., Van den Bosche A., De Neve S., Reheul D., Moens M. (2007) The quality of exogenous organic matter: Short-term influence on earthworm abundance. *Eur. J. Soil Biol.* 43, 196-200.
- LNE (2009a) Organische stof in de bodem, sleutel tot bodemvruchtbaarheid. Brochure LNE, Dienst Land- en bodembescherming, www.lne.be.
- LNE (2009b) Koolstofsimulator, adviessysteem voor het koolstofbeheer in akkergronden, handleiding bij het rekenmodel, LNE, Brussel, www.lne.be.

LNE (2011) Erosie in Vlaanderen, brochure, www.lne.be.

Lupwayi N., Rice W.A. & Clayton G.W. (1998) Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Soil Biology & Biochemistry* 30, 1733-1741.

Mäder P., Fliessbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P. & Niggli U. (2002) Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, 1694-1697.

Meeus S. & Gulincx H. (2004) Verstening als milieuvariabele. Eindverslag van het Ondersteunend Onderzoek rond versnippering voor het Milieuraapport 2003-2004. VMM en Laboratorium voor Bos, Natuur en Landschap, KU Leuven. 66p.

Merckx T., Van Dyck H., Karlsson B. & Leimar O. (2003) The evolution of movements and behaviour at boundaries in different landscapes: a common arena experiment with butterflies. *Proceedings of the Royal Society of London series B-biological sciences* 270: 1815-1821.

Meul M., Nevens F. & Reheul D. (2004) Genetische diversiteit van landbouwgewassen in Vlaanderen. Stedula publicatie 7. Steunpunt Duurzame Landbouw, Gontrode, België. 58 p.

MIRA (2011) Milieuraapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2010, Bodem, Overloop S., Tits M., Elsen A., Bries J., Govers G., Verstraeten G., Van Rompaey A., Poesen J., Notebaert B., Ruyschaert G., De Meyer A., Tirry D., Gulincx H., Van Orshoven J., Cardon M., D'Haene K., Oorts K. & Maene S., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieuraapport.be.

Moore J.M., Klose S. & Tabatabai M.A. (2000) Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems. *Biology and Fertility of Soils* 31, 200-210.

Mulier A., Nevens F. & Hofman G. (2006) Daling van de organische stof in Vlaamse landbouwgronden. Analyse van mogelijke oorzaken en aanbevelingen voor de toekomst. Stedula, publicatie 24, januari 2006.

NRCS (1999) Soil Quality Test Kit Guide. Natural Resources Conservation Service (NRCS), Washington, 88 p. http://soils.usda.gov/SQL/assessment/test_kit.html.

Ninane V., Goffart J.P., Meeus-Verdinne K., Destain J.P., Guiot J. & François E. (1995) Inbreng van organisch materiaal en de gevolgen op landbouwkundig en milieukundig vlak. In: Geypens M. & Honnay J.P. (Eds.) Landbouwkundige en milieugerichte functies van de organische stof in de bodem. Comité voor onderzoek van de organische stof in de bodem. IWONL project, pp 67-103.

OVAM (2004) Basisinformatie voor risico-evaluaties. Deel 3-H Formularium Vlier-Humaan, www.ovam.be.

Paauf J. (2006) Aan de slag met erosie. Ploegloze grondbewerking in beweging (2004-2006). PPO rapport 5115105. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO), Wageningen, 18 p.

Peacock A.D., Mullen M.D., Ringelberg D.B., Tyler D.D., Hedrick D.B., Gale P.M. & White D.C. (2001) Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate applications. *Soil Biology & Biochemistry* 33, 1011-1019.

Pimm S.L., Jones H.L. & Diamond J., *On the risk of extinction, American naturalist*, vol. 132 no. 6 (December, 1988), pp. 757-785, ISSN 0003-0147.

Poesen J., Govers G. & Goossens D. (1996) Verdichting en erosie van de bodem in Vlaanderen. *Tijdschrift van de Belg. Ver. Aardr. Studies - BEVAS*, 2: 141-181.

Poesen J., Verstraeten G., Soenens R. & Seynaeve L. (2001) Soil losses due to harvesting of chicory roots and sugar beets: an underrated geomorphological process? *Catena*, 43 (1): 35-47.

Rahman L., Chan K.Y. & Heenan D.P. (2007) Impact of tillage, stubble management and crop rotation on nematode populations in a long-term field experiment. *Soil & Tillage Research* 95, 110-119.

Reubens B., D'Haene K., D'hose T. & Ruyschaert G. (2010) Bodemkwaliteit en landbouw: een literatuurstudie. Studie in opdracht van het Interregproject BodemBreed, Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek (ILVO), Merelbeke, 203 p.

Romig D.E., Garlynd M.J. & Harris R.F. (1996) Farmer-based assessment of soil quality: a soil health scorecard. In: Doran J.W. & Jones A.J. (Eds.) *Methods for assessing soil quality*, Soil Science Society of America (SSSA), Madison, p. 39-60.

Romkens P.F.A.M., Van der Plicht J. & Hassink J. (1999) Soil organic matter dynamics after the conversion of arable land to pasture. *Biol. Fert. soils* 28, 277-284.

Ruyschaert G. (2005) Spatial and temporal variability of soil losses due to crop harvesting. Doctoraal proefschrift, Departement Geografie-geologie, K.U. Leuven, Leuven.

Sandor R. & Skees J. (1999) Creating a Market for Carbon Emissions, Opportunities for U.S. Farmers, *Magazine of the American Agricultural Economics Association*.

- Shepherd T.G. (2000) Visual Soil Assessment. Volume 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. Horizons.mw & Landcare Research, Palmerston North, 84 p.
- Shepherd T.G., Stagnari F., Pisante M. & Benites J. (2008) Visual soil assessment. Field Guides. Annual crops. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, 26 p. ISBN 978-92-5-105937-1.
- Spade (2010) Agrobiodiversiteit en duurzaam bodembeheer, www.spade.nl.
- Steel H., de la Peña E., Fonderie P., Willekens K., Borgonie G. & Bert W. (2010) Nematode succession during composting and the potential of the nematode community as an indicator of compost maturity. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology* 53, 181-190.
- ter Berg C., Bokhorst J., van Eekeren N. & Heeres E. (2006) Bodem in zicht: beoordelen en verbeteren van de bodemkwaliteit. Louis Bolk Instituut (LBI), Driebergen.
- Thorup-Kristensen K., Magid J. & Jensen L.S. (2003) Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79, 227-302.
- Valckx J., Govers G., Hermy M. & Muys B. (2009a) Dieper graven naar het belang van regenwormen in duurzaam akkerbeheer - een toolkit voor ecologische erosiecontrole. Project 040681 (2005-2009) in het kader van het programma Landbouwkundig Onderzoek van het Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen (IWT), Leuven, 34 p.
- Valckx J., Govers G., Hermy M. & Muys B. (2009b) Functionele biodiversiteit en duurzame akkerbouw in erosiegevoelige gebieden: een regenwormen toolkit voor de landbouwer. Eindrapport van project 040681 (2005-2009) in het kader van het programma Landbouwkundig Onderzoek van het Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen (IWT), Leuven, 35 p.
- Van Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C. & Selvaradjou S.K. (2004) Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/3, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Van de Vreken P., Van Holm L., Diels J., Van Orshoven J. & Gobin A. (2009) Verkennende studie betreffende bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting: tussentijds rapport. K.U. Leuven, Leuven, 115 p.
- van den Akker J.J.H. & de Groot W.J.M. (2008) Een inventariserend onderzoek naar ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel. Alterra, Wageningen, 77 p.
- Van Den Eeckhaut M., Poesen J. & Verstraeten G. (2007) Opstellen van een gevoeligheidskaart met betrekking tot massabewegingen (massatransport) voor de Vlaamse Ardennen. Rapport in opdracht van Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijksdommen.
- van Eekeren N., Bommele L., Bloem J., Schouten T., Rutgers M., de Goede R., Reheul D. & Brussaard L. (2008b) Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Applied Soil Ecology* 40, 432-446.
- van Eekeren N., Heeres E. & Smeding F. (2003) Leven onder de graszode: Discussiestuk over het beoordelen en beïnvloeden van bodemleven in de biologische melkveehouderij. Rapport nr. LV 52, Louis Bolk Instituut (LBI), Driebergen, 148 p.
- Van Kerckhoven S., Riksen M. & Cornelis W.M. (2009) Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen. Eindrapport, Universiteit Gent, Vakgroep Bodembeheer, 79p.
- Van Muysen W., Govers G., Van Oost K. & Van Rompaey A. (2000) The effect of tillage depth, tillage speed and soil condition on chisel tillage erosivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 3: 354-363.
- Van Oost K., Govers G. & Desmet P. (2000) Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage, *Landscape Ecology*, 15 (6): 597-591.
- Van Oost K., Govers G., Quine T., Heckrath G., Olesen J.E., De Gryze S. & Merckx R. (2005) Landscape-scale modeling of carbon cycling under the impact of soil redistribution. The role of tillage erosion, *Global Biogeochemical Cycles*, 19 (4): 1-13.
- Van Ormelingen A. (2007) Niet-kerende bodembewerking: vergelijkende studie tussen België en Nederland. Thesis, Katholieke Hogeschool Kempen, Geel, 116 p.
- Vandergeten J.-P. & Roisin C. (2004) Ploegloze teelttechnieken in de suikerbietenteelt. De technische Gidsen van het Koninklijk Belgisch Instituut tot Verbetering van de Biet (KBIVB), KBIVB, Tienen, 22 p.
- Verbeylen G., De Bruyn L., Adriaenssens F. & Matthysen E. (2003) Does matrix resistance influence Red squirrel (*Sciurus vulgaris* L. 1758) distribution in an urban landscape? *Landscape Ecology* 18: 791-805.
- Verstraeten G. (2000) Modderoverlast, sedimentatie in wachtbekkens en begroting van de sedimentexport naar waterlopen in Midden-België, doctoraatsverhandeling Wetenschappen-Geografie, K.U. Leuven.

Verstraeten G., Poesen J., Steegen A. & Govers G. (1999) Bodemerosie door water: bron van vele milieuproblemen in Vlaanderen, @WEL, 2, 8 p.

VILT (2014) Zonder organische stof is de bodem een onvruchtbare zandbak, interview 13/01/2014, www.vilt.be.

VLM (2010) Voortgangsrapport Mestbank 2010 over het mestbeleid in Vlaanderen, VLM, Brussel.

Wardle D.A. (1995) Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. In: Begon M. & Fitter A.H. (Eds.). Advances in Ecological Research. Academic Press, New York, p. 105-185.

Lijst met relevante websites

www.milieurapport.be

www.vmm.be

www.ovam.be

www.lne.be/themas/bodem

Begrippen

Afdichting: kwantitatieve benadering van de fractie (0 – 100 %) van het bodemoppervlakte waarop een artificieel, waterondoorlatend oppervlak (vb. gebouwen, wegen en andere constructies van antropogene oorsprong) is aangebracht zodanig dat het water niet meer kan infiltreren, maar afstroomt via het verharde oppervlak.

Bebouwing: de omzetting van niet-bebouwde in bebouwde ruimte (op kadastraal niveau).

Bouwvoor: de bovenste laag van de bodem die bewerkt wordt. Vaak 23 à 30 cm, afhankelijk van de ploegdiepte.

Brownfield: een geheel van verwaarloosde of onderbenutte gronden die zodanig zijn aangetast, dat zij kennelijk slechts gebruikt of opnieuw gebruikt kunnen worden door middel van structurele maatregelen.

Conserveringslandbouw: landbouwtechniek waarbij de bodem zo weinig mogelijk verstoord wordt, en de aarde zoveel mogelijk bedekt is. Dit kan door minder intensieve bodembewerkingen (directe inzaai, niet-kerende bodembewerking), het laten liggen van gewasresten en het gebruik van groenbedekkers. Zo blijft water veel langer behouden en kunnen de gewassen diepere wortels vormen. De voorstanders zeggen dat de gewassen daardoor minder kwetsbaar zijn voor droogte en er tot een derde minder water gebruikt moet worden. Bij extreme neerslag treedt er bovendien minder erosie en overstromingen op.

Effectief organische stof: effectieve organische stof wordt in deze werkwijze gedefinieerd als dat deel van het organische materiaal afkomstig van een bepaalde bron (bv. gewas, organische meststoffen ...) dat 1 jaar na toediening nog in de bodem aanwezig is en dus nog niet gemineraliseerd is. Men noemt dit ook wel eens meer algemeen 'de stabiele organische stof'.

Erosie: het proces van slijtage van een vast oppervlak waarbij materiaal wordt verplaatst of geheel verdwijnt.

Humus: humus is het traag afbreekbare deel van de organische stof in de bodem.

Koolstofvastlegging: proces van opname van koolstof, zodat het niet meer beschikbaar is als koolstofdioxide in de atmosfeer.

Maaiveld: bodemoppervlak.

Niet-kerende bodembewerking: grondbewerking waarbij de grond niet geploegd wordt. De bovengrond (ongeveer de bovenste 7 tot 15 cm) wordt vaak wel bewerkt. Dit kan meer of minder intensief gebeuren. Denk bijvoorbeeld aan een bewerking met de rotores of pennenfrees, maar ook aan het injecteren van drijfmest.

pF: het verband tussen zuigspanning en vochtgehalte van een grond kan grafisch weergegeven worden door middel van de zgn. waterretentie- of pF curve. De zuigspanning kan hierbij uitgezet worden in bar, cm H₂O, atm. of MPa en het vochtgehalte in volume procenten aan water. Om praktische redenen zet men echter het logaritme van de zuigspanning, uitgedrukt in cm H₂O, uit en spreekt men van pF-waarden.

Run-off: de afstroom van water over land.

Verdichting: het samendrukken van de bodem door externe mechanische krachten met het verlies van de bodemstructuur en afname van waterdoorlaatbaarheid als gevolg.

Verharding: het wijzigen van de aard en/of toestand van het bodemoppervlak door compactie (i.e. verdichting) of door het aanbrengen van artificiële, (semi-) ondoorlaatbare materialen 'met de bedoeling de draagkracht te verhogen' (i.e. verstening).

Verslamping: als een grond verslemt, is er sprake van te weinig binding tussen de bodemdeeltjes. Door de inslag van regendruppels treedt schifting op. Daarbij verstopten de fijnere lutum- en siltdeeltjes de poriën in de bodem. Zo ontstaat een papperig slemlaagje dat na drogen een slempkorst vormt. Vooral lichte kleigronden en lössgronden zijn gevoelig voor slomp. Verslamping kan de kieming van het zaad belemmeren door luchtgebrek en een te grote weerstand.

Versmering: krijg je wanneer fijne grond te vochtig is als je die gaat bewerken. Hierbij wordt over een aanzienlijke oppervlakte in de bodem een bodemlaagje dichtgesmeerd, wat een ernstige vorm van beschadiging van bodemstructuur betekent. Het resultaat is een beperking in de gasuitwisseling.

Versnippering: kwalitatieve benadering van de versnijding van landschappen door infrastructuur en bebouwing en het verscherpen van contrasten tussen naburige eenheden van bodemgebruik.

Verstedelijking: geografisch of planologisch ruim begrip dat uitdrukking geeft aan de uitbreiding van het geheel van bouwsels van menselijke oorsprong dat volledig of gedeeltelijk bestaat uit stenig, hard materiaal (beton, baksteen, natuursteen, asfalt of andere niet-natuurlijke harde materialen) én met de functie wonen, industrie, transport, diensten, recreatie en handel.

Verstening: kwalitatieve benadering (versteend of niet versteend) op grote schaal (m²-niveau) voor de stenige verharding op het oppervlak, door urbanisatie en meer algemeen bebouwing en verkeersinfrastructuur en allerlei kleine artificiële objecten.

Wortelxudaat: een vloeistof die vanuit de wortel van een plant lekt naar de buitenwereld.

Zinkslakken: of zinkassen en sintels: het vaste afvalproduct dat ontstaan is bij zinkproductie in het verleden en dat vaak als puur product werd toegepast in ophogingen, wegfunderingen, erfverhardingen en halfverhardingen.

Afkortingen

ALT: Administratie Land- en Tuinbouw

BATNEEC: Best Available Technology Not Entailing Excessive Cost

BBO: beschrijvend bodemonderzoek

BDB: Bodemkundige Dienst van België

BRG: bodemverlies door het rooien van gewassen

BSP: bodemsaneringsproject

BSW: bodemsaneringswerken

CEC: Cation Exchange Capacity

EC: Europese Commissie

EU: Europese Unie

GFT: groente-, fruit- en tuinafval

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

KMO: kleine en middelgrote onderneming

LNE: (Departement) Leefmilieu, Natuur en Energie (van de Vlaamse overheid)

MER: milieueffectenrapport

OBO: oriënterend bodemonderzoek

OVAM: Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij

PAK: poly-aromatische koolwaterstof

PCS: precompressiestress

PDLT: Provinciale Dienst voor Land- en Tuinbouw

UGent: Universiteit Gent

VEN: Vlaams Ecologisch Netwerk

VILT: Vlaams Informatiecentrum Land- en Tuinbouw

VLAREA: Vlaams reglement betreffende afvalvoorkoming en -beheer

VLAREBO: Vlaams reglement betreffende de bodemsanering en de bodembescherming

VLAREM: Vlaams reglement betreffende de milieuvergunning

VLM: Vlaamse Landmaatschappij

[Terug naar Inhoudsopgave](#)