

# KLIMAATROBUUSTE RUWVOEDERTEELT WP2: REGENWORMEN

LITERATUURSTUDIE: HOE KUNNEN REGENWORMEN BIJDAGEN AAN HET VERBETEREN VAN  
DE WATERBUFFERCAPACITEIT EN DE DOORWORTELING VAN DE BODEM IN EEN  
VERANDEREND KLIMAAT?

31 JANUARI 2024

AUTEUR: JAN VALCKX



Wim Govaerts & Co

Inleiding .....	3
Infofiche.....	3
Literatuuroverzicht .....	5
Zeg niet zomaar worm tegen een worm.....	5
Strooiselwormen, ‘rode’ wormen of epigeïsche wormen.....	5
Bodemwoelers, ‘grauwe’ wormen of endogeïsche wormen .....	5
Diepgravers, pendelaars of anekische wormen .....	5
Hoe beïnvloeden regenwormen de groei van planten? .....	7
Wat doen regenwormen precies in en op de bodem? .....	7
Biogene structuren .....	7
Box 1: Regenwormen als bodemingenieurs.....	8
Gangenstelsels.....	8
Uitwerpselen.....	10
Strooiselhoopjes of middens .....	11
Interacties tussen regenwormen en plantenwortels.....	12
Effect van droogte en klimaatverandering op regenwormen.....	14
Handvaten voor regenwormbeheer op het veebedrijf.....	16
Conclusies .....	18
Literatuurlijst .....	18

## INLEIDING

---

Het wijzigende klimaat zorgt voor extremere weersomstandigheden: enerzijds periodes met hevige neerslag, maar ook periodes van langdurige droogte. Dit stelt (biologische) veehouders voor de uitdaging om in deze veranderlijke context voldoende ruwvoeder van voldoende kwaliteit te blijven produceren.

Het CCBT-project 'Klimaatrobuuste ruwvoederproductie' (2021-2023) reikt hiervoor enkele handvaten voor veehouders aan.

Binnen het project werd hiervoor een ruimere strategische aanpak ontwikkeld. Veehouders kunnen namelijk via keuzes in bodembeheer en/of aangepaste gewaskeuzes het productie- en kwaliteitsniveau van het ruwvoeder op peil houden. De voor- en nadelen van keuze voor droogteresistente eenjarige teelten zoals sorghum, alternatieve droogtetolerante (kruidenrijke) grasmengsels en vernieuwende meerjarige droogtetolerante voedergewassen zoals zonnekroon worden elders besproken.

Dit rapport bevat een literatuuroverzicht dat focust op de rol die bodembeheer, en in het bijzonder van bodemingenieurs zoals regenwormen, hebben in een robuust en veerkrachtig bodemecosysteem dat de ruwvoederproductie optimaal ondersteunt bij een wijzigend klimaat.

In de wetenschappelijke literatuur zijn – enigszins verrassend - op vandaag weinig tot geen studies te vinden die expliciet het verband tussen regenwormen en landbouwproductie onderzoeken onder omstandigheden die kenmerkend zijn voor het wijzigende klimaat in onze contreien, met name langere periodes van droogte, afgewisseld met periodes van intense neerslag. In dit rapport kunnen we eveneens niet terugvallen op de resultaten van een gepland veldexperiment, dat door een wijziging van prioriteiten binnen het project niet heeft kunnen plaatsvinden. Dat veldexperiment had net tot doel de relatie tussen proefvlakken met gemanipuleerde regenwormaantallen en ruwvoederproductie over een droogtegradiënt te onderzoeken. Het relaas hieronder put noodzakelijkerwijs uit studies die zich richten op de effecten van regenwormen op bodemvariabelen die aannemelijk de randvoorwaarden voor een goede gewasopbrengst bepalen onder droge omstandigheden: een voldoende waterbergend en -houdend vermogen van de bodem, en een voldoende groot doorwortelbaar bodemvolume.

## INFOFICHE

---

De inzichten van voorliggende literatuurstudie werden overzichtelijk en samenhangend samengevat in een handige infofiche. Deze fiche op A3-formaat in recto-verso kan fysiek worden opgevraagd bij de auteur ([jan@wimgovaertsenco.be](mailto:jan@wimgovaertsenco.be)) en is te downloaden op deze locatie: <https://www.ccbt.be/nl/regenwormen>.

De infofiche is opgevat als een 'grote spiekbrief' voor veehouders, die het associatief denken van veehouders ondersteunt en in een begrijpbare boerentaal is opgesteld en via het nodige beeldmateriaal sterk visueel aanspreekt (Figuur 1).

# Ruwvoer produceren in een veranderend klimaat

Regenwormen ter hulp bij te weinig én te veel neerslag

Auteur: Jan Valckx, W. Govaerts & Co, [janwimgovaertsenco.be](mailto:janwimgovaertsenco.be)

De klimaatverandering confronteert ons aan de ene kant met langere en frequentere droogteperiodes en hittegolven. Anderzijds mogen we ook frequentere periodes van extremere neerslag verwachten. Regenwormen, gekend als uitstekende bodemingieurs, kunnen ons helpen de negatieve effecten te verzachten door hun invloed op de waterhuishouding van de bodem.

## Wat doen regenwormen op je bedrijf?

Het zijn niet de kabouteren, maar een heel leger 'zwartwerkers' die heten werk voor je bedrijf verrichten. Regenwormen zijn belangrijk voor de afbraak van organische stof, het beschikbaar maken van nutriënten,

behoud van bodemstructuur, menging van bodemdelftes, waterbinding, besparingen en uiteindelijk voor gasopbrengst. Ook zijn wormen voedsel voor andere dieren (bv. weidevogels).

## Hoeveel GVE onder de grond?

In bemeste, permanente velden op niet of te arme bodems (genoeg voedsel, weinig bodemverstoring) leven makkelijk zo'n 1,5 ton regenwormen per hectare. Dat betekent dus minstens evenveel kilo's regenwormen onder de grond als er bovengronds kilo's koeken grazen (2 GVE ha). In het zop van deze regenwormen ontstaan ideale leefomstandigheden,

voor tal van andere bodemorganismen. Hierdoor bereikt de totale biomassa van ondergronds leven op een hectare de 4 à 5 ton, of het equivalent van 7 tot 8 volwassen koeken. Telle in een spadesteek (20x20x20 cm<sup>3</sup>) in je veldland tussen de 10 en 20 wormen, dan heb je een prima regenwormpopulatie.

## Zeg niet zomaar worm tegen een worm

In Vlaanderen leven zo'n 20 verschillende soorten regenwormen in alle maten en vormen. We kunnen ze onderscheiden in 3 grote groepen: de strooscheurders, de bodemwoelers en de pendelaars (zie tekening en tabel rechts).

## Pendelaar is onmisbaar

Pendelaars graven verticale gangen tot 3 meter diepte met verskeide wanden en diameters tot 12 mm. Deze snebegen van watertransport vervoeden de waterinfiltratie bij hevige neerslag. Wortels gebruiken de gangen om tot diepere lagen te komen. Hierdoor kunnen zij beschikbare water en de nutriënten beter benut worden. Geen enkel ander bodemorganisme of vorm van mechanische bodembewerking kan de unieke pendelaars op dat vlak overtreffen.



Kenmerk	Strooscheurders	Bodemwoelers	Pendelaars
Grootte	Klein (50-100 mg)	Tussenmaat	Groot (1-10 g)
Diepte	0-20 cm	5-40 cm	0-300 cm
Kleur	Bruin-donkerrood	Bleek (beige, roze, grijs of groen)	Donkere schuifkleur aan rugzijde
Leefwijze	Strooscheurder	Tijdelijke, horizontale gangen, ondiep	Permanente, verticale gangen, diep
Voedsel	Vers organisch materiaal aan het bodemoppervlak (mest, gewaasresten)	Ouder organisch materiaal in de bodem (humus)	Vers organisch materiaal aan het bodemoppervlak (mest, gewaasresten) gemengd met bodemdelftes
Belangrijkste functie	Vertering organisch materiaal	Structuur en porositeit	Vertering organisch materiaal, water- en luchthouding
Voorbeeld	<i>Eisenia fetida</i>	<i>Aporodectes caliginosa</i>	<i>Lumbricus terrestris</i>

## Regenwormen verbeteren... waterhuishouding

Verbeteren waterinfiltratie en verminderen oppervlakkige afspoeling (erosie). De met wormrijn gestabiliseerde verticale gangen van pendelaars zijn bij hevige regen in staat veel water te slikken en te pletten in kleine infiltranten. Dit vult de watersoortdoel aan. Ook de oppervlakkige afspoeling van overtollig water, met daarin opgesloten nutriënten en bodemdelftes/erosie, daalt enorm door de activiteiten van pendelaars.

Verbeteren bodemstructuur en spoorverking. Bodemwoelende wormen eten zich een weg door de bodem. Daarbij creëren ze een mix van stabiele bodempartikels met daartussen holtes van variërende grootte. Die holtes houden water vast en laten het weer los afhankelijk van de vochttoestand van de bodem, net zoals een spons. Dit zorgt ervoor dat planten over een brede reange van vochttoestand van de bodem toch aan voldoende water geroken.



## ... en doorwortelbaarheid

Het zijn vooral de bodemwoelende soorten die zorgen voor een luchtiger en daardoor beter bewortelbaar bodemvolume in de bouwvoor. Daarbovenop worden meer dan 90% van wortelgangers door wortels gekoloniseerd. Wortels kunnen op die manier zonder weerstand doordringen in diepere bodemlagen. Daar vinden ze voedingsrijke regenwormuitwerpselen en gangen, water en lucht.

Naarmate je dieper in het bodemprofiel gaat, vind je wortels nauwelijks in de bouwvoor. Door hun grote spierkracht zijn pendelaars in staat verdichte lagen zoek een fasegroot of ondiepe kleilaag te doorbooren. Plantenwortels dalen maar al te graag mee de diepte in, op zoek naar extra waterreserves. Dit kan het verschil betekenen tussen groei- en/of afsterven of bijten en produceren in tijden van droogte.



Figuur 1. De 'look and feel' van de laagdrempelige infofiche gericht aan veehouders. Een fysiek exemplaar is op te vragen bij de auteur ([jan@wimgovaertsenco.be](mailto:jan@wimgovaertsenco.be)) of kan digitaal verkregen worden via <https://www.cbct.be/nl/regenwormen>.

---

## LITERATUUROVERZICHT

---

---

### ZEG NIET ZOMAAR WORM TEGEN EEN WORM

---

In Vlaanderen komen maar liefst 25 regenwormsoorten voor, alle uit de familie van de *Lumbricidae*. Een zevental soorten daarvan komen regelmatig voor in landbouwbodems (Valckx *et al.*, 2009; Valckx, 2011; Vandermersch en Valckx, 2012).

Op grond van lichaamskenmerken en ecologie worden regenwormen ingedeeld in drie ecologische groepen (Bouché, 1972; Valckx *et al.*, 2009) (Tabel 1):

---

#### STROOISELWORMEN, 'RODE' WORMEN OF EPIGEÏSCHE WORMEN

---

Epigeïsche wormen leven in het organisch materiaal aan het bodemoppervlak (strooisel, compost, mest, rottend hout). Ze hebben onvoldoende spierkracht om gangen in de bodem te graven. Ze voeden zich met niet of deels afgebroken organisch materiaal.

Gezien ze aan het bodemoppervlak leven zijn ze vaak blootgesteld aan ongunstige weersomstandigheden, die tot sterfte kan leiden. Daarom kunnen ze goed beschermde cocons vormen en kunnen ze zich ook snel voortplanten. Het leven aan de oppervlakte stelt hen ook vaak bloot aan predatie door vogels. Als bescherming daartegen hebben ze een veelal donkerrode schutkleur. Gezien (bos-)strooisel vaak zuur is, zijn heel wat soorten zuurtolerant.

In de regel zijn het eerder kleine wormen (50 à 100 mg versgewicht) zodat ook hun ecologische impact in natuurlijke systemen redelijk beperkt blijft. Hun vlotte reproductie laat toe om ze in grote dichtheden te kweken. Sommige soorten zijn zeer populair voor de compostering (bv. *Eisenia fetida* of mestworm), en daarom worden ze ook wel compostwormen genoemd, en het resultaat van hun werk 'wormencompost'.

---

#### BODEMWOELERS, 'GRAUWE' WORMEN OF ENDOGEÏSCHE WORMEN

---

Endogeïsche wormen leven in de bodem. Ze voeden zich met de karige voedingsstoffen aanwezig in de humusfractie van de bodem. Om voldoende voedingsstoffen op te nemen moeten ze daarom enorme hoeveelheden grond door hun darmkanaal laten passeren. Al etend graven ze zich dus een weg door het bodemprofiel. Hun gangenstelsels lopen min of meer horizontaal in de bovenste 20 à 30 cm van de bodem en zijn niet permanent.

In ongunstige omstandigheden gaan ze over naar een rusttoestand waarbij het vochtgehalte en het metabolisme sterk vermindert (quiescentie). Gezien ze weinig of niet aan predatie door vogels blootstaan, hebben ze geen donkerrode of zwarte schutkleur. Ze zijn meestal beige, roze, grijs of soms groenachtig van kleur. De meeste soorten zijn weinig zuurtolerant.

---

#### DIEPGRAVERS, PENDELAARS OF ANEKISCHE WORMEN

---




Anekische wormen leven in permanente, min of meer verticale gangenstelsels in de bodem, maar voeden zich 's nachts aan het oppervlak met strooisel/gewasresten. Vaak wordt het

organisch materiaal in de gangen getrokken en pas verorberd nadat het vochtiger is geworden of een microbiële voorafbraak heeft ondergaan.

Het zijn grote wormen (1 à 10 g versgewicht) met aanzienlijke spierkracht, die in grote mate bijdragen aan de strooiselafbraak. Hun uitzicht weerspiegelt de graafcapaciteit: afgeplatte staart en verlengde graafborstels op de buikzijde van de voorste lichaamssegmenten. De gangen kunnen tot meer dan een meter diep gaan. Daarin verblijven ze op de diepte waar zich de beste temperatuur/vochtverhoudingen voordoen. Ze zijn langlevend en planten zich slechts traag voort. Om de zomerdroogte te overleven gaan sommige soorten in een voorgeprogrammeerde rustfase (diapauze). Gezien ze vooral 's nachts aan predatie kunnen blootstaan hebben ze op de rugzijde een donkere, meestal zwarte, schutkleur. Ze zijn kieskeurig qua habitat en komen enkel voor waar het strooisel en/of de bodem van voldoende kwaliteit zijn. Ze zijn zuurschuwend.

In werkelijkheid zijn de grenzen tussen de ecologische categorieën niet haarscherp afgelijnd. Sommige soorten vertonen intermediaire kenmerken tussen twee categorieën. In de meest recente wetenschappelijke literatuur doet men pogingen om naar een meer functionele indeling van regenwormsoorten te gaan, dus niet alleen gebaseerd op gedrag en uiterlijk, maar ook op hun impact op het bodemecosysteem (Bottinelli *et al.*, 2020).

Tabel 1. Overzicht van de kenmerken van de ecologische categorieën van regenwormen

Kenmerk	Epigeïsche wormen of strooiselwormen	Endogeïsche wormen of bodemwoelers	Anekische wormen of diepgravers/pendelaars
Grootte	Kleine wormen (50-100 mg)	Tussenformaat	Grote wormen (1-10 g)
Kleur	Bruin-donkerrood	Beige, roze, grijs of groen	Donkere schutkleur aan rugzijde
Habitat	Organisch materiaal (mest, gewasresten) op het bodemoppervlak	Tijdelijke (sub-)horizontale gangen, vnl. tot op 20 cm diepte	Permanente verticale gangen, vaak meer dan 1 m diep
Voedsel	Vers organisch materiaal aan het bodemoppervlak (mest, gewasresten)	Ouder organisch materiaal in de bodem (humus)	Vers organisch materiaal aan het bodemoppervlak (vnl. gewasresten) gemengd met bodemdeeltjes
Reactie op ongunstige omstandigheden	Goed beschermende cocons en snelle reproductie	Quiescentie (door omgeving gestuurde rust)	Diapauze (hormonaal gestuurde rust)
Functie in de bodem	Strooiselverkleining en -afbraak	Bodemaggregaatvorming en -porositeit	Strooiselverkleining en -afbraak, water- en luchthuishouding
			
	<i>Eisenia fetida</i>	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	<i>Lumbricus terrestris</i>

## HOE BEÏNVLOEDEN REGENWORMEN DE GROEI VAN PLANTEN?

---

Vijf mechanismen zijn verantwoordelijk voor het positieve effect van regenwormen op plantaardige productie (Scheu, 2003; Brown *et al.*, 2004; Bertrand *et al.*, 2015):

- (i) verhoogde mineralisatie van organisch materiaal, waardoor de beschikbaarheid van nutriënten toeneemt, in het bijzonder stikstof;
- (ii) wijziging van de porositeit en aggregaatvorming in de bodem, wat leidt tot veranderingen in de beschikbaarheid van water en zuurstof voor planten;
- (iii) biologische bestrijding van ziekten, plagen en parasieten;
- (iv) productie van plantengroei-regulators door stimulering van microbiële activiteit
- (v) stimulatie van symbionten

Op de ondergrondse wortelbiomassa hebben regenwormen vaak geen of eerder een beperkt negatief effect. Wel is er onder impuls van regenwormen een verschuiving naar meer fijne wortels te zien die dienen voor nutriëntenopname. Ondergronds zorgen regenwormen dus eerder voor een kwalitatief dan een kwantitatief effect op planten(wortel)groei. Het meest uitgesproken positieve effect op plantengroei is op de bovengrondse biomassa (stengel, blad) waar te nemen. Regenwormen zorgen bijna zonder uitzondering voor een hogere scheut/wortel verhouding van planten (van Groenigen *et al.*, 2014). Dat is natuurlijk interessant in een landbouwkundige context waarin we meestal geïnteresseerd zijn in de oogst van de bovengrondse biomassa.

Deze literatuurstudie focust in het licht van waterregulatie in tijden van klimaatverandering op mechanisme (ii). Bemerkt dat er vaak meerdere mechanismen tegelijk spelen en onderlinge interacties optreden. De wetenschap is nog steeds bezig met dit fascinerend samenspel te ontrafelen.

## WAT DOEN REGENWORMEN PRECIES IN EN OP DE BODEM?

---

### BIOGENE STRUCTUREN

---

Regenwormen, net zoals mieren en termieten (in de tropen), beïnvloeden als bodemingenieurs (zie Box 1) de bodem- en strooiselomgeving zowel rechtstreeks als onrechtstreeks door het produceren en onderhouden van zogenaamde biogene structuren. Onder biogene structuren verstaan we de tijdelijke (endogeiische wormen) en permanente (anekische wormen) gangenstelsels, boven- en ondergrondse uitwerpselen en strooiselhoopjes ('middens' in het Engels). We bespreken deze kort en illustreren welk belang ze hebben voor een klimaatrobuuste gewasproductie.



---

## BOX 1: REGENWORMEN ALS BODEMINGENIEURS

---

Wetenschappers delen regenwormen, net zoals bv. bomen of olifanten, in bij de ecosysteemingenieurs. Dat zijn organismen die (on)rechtstreeks het fysische milieu en de beschikbaarheid van hulpbronnen voor andere organismen veranderen, in stand houden of creëren (Jones *et al*, 1994). Een sprekend voorbeeld van 'ecosystem engineering' is de bever die een dam bouwt, die de loop van een rivier en de eraan gekoppelde organismen drastisch beïnvloedt, ten opzichte van de situatie zonder beverdam.

Op gelijkaardige wijze maar op kleinere schaal hebben regenwormen een grote impact op de bodemomgeving: in uitwerpselen, gangen en strooiselhoopjes van regenwormen komen een grotere, meer diverse en actievere set van bodemorganismen voor dan in de omliggende bodem. Vrij vertaald kan je regenwormen dan ook als bodemingenieurs benoemen.

Doordat hun boven- en ondergrondse activiteiten zo'n ingrijpende invloed hebben op de organisatie en de processen van het bodemecosysteem, dragen regenwormen in grote mate bij aan de bodemvruchtbaarheid, een luchtige bodemstructuur, een goede waterhuishouding en uiteindelijk de gewasopbrengst in landbouwbodems (Lavelle *et al.*, 1997; Jouquet *et al.*, 2006; Lavelle *et al.*, 2006).

Door deze buitenproportionele impact op het functioneren van het bodemecosysteem, zullen de effecten van landbouwkundige ingrepen (bodembewerking, bemesting,...) en klimaatverandering op regenwormen zich versterkt doorzetten op het leveren van cruciale bodemecosysteemdiensten zoals koolstofopslag, waterberging,...Voldoende aandacht en gepaste beheermaatregelen voor deze gratis ondergrondse helpers zijn dus van groot belang (Jouquet *et al.*, 2014).

---

## GANGENSTELSELS

---

Diepgravende (anekische) regenwormen maken individuele, permanente gangen die ze ook goed onderhouden (Figuur 2). De continue quasi-cilindrische gangen zijn zo goed als verticaal georiënteerd, hebben een of meerdere openingen hebben aan het bodemoppervlak, en reiken van het bodemoppervlak tot soms wel drie meter diep. Diameters variëren van 1 tot 12 mm, afhankelijk van de grootte van het bewonende individu.

De wanden van de gangen worden versterkt met uitwerpselen en proteïnerijk slijm, dat ook de beweging van de regenworm vergemakkelijkt. Het zijn dus stevige, langlevende structuren met een behoorlijke diameter die een vlotte verticale uitwisseling van water, daarin opgeloste stoffen (bv. meststoffen), en gassen (zuurstof, koolstofdioxide, dikstikstof voor stikstoffixatie door vlinderbloemigen,...) toelaten over een aanzienlijke bodemdiepte.



Ook plantenwortels verkiezen deze 'toegangspoort' tot een groter bodemvolume, omwille van de lagere penetratieweerstand, de beschikbaarheid van water en zuurstof, en nutriënten in de wand van de regenwormgangen. Ook na het afsterven van de bewonende regenworm blijven deze macrobioporien vaak hun belangrijke functie van snelweg voor water, gas, en plantenwortels behouden. Tenzij ze natuurlijk vernietigd worden door bodembewerkingen (ploegen) of vertrappeling door het vee (zie verder). Schattingen van het aantal verticale gangen in bodems van de gematigde streken variëren tussen 100 en 800 per m<sup>2</sup>, maar de meeste bodems vertonen een gangendichtheid van 50 tot 200 gangen per m<sup>2</sup> (Kretzschmar, 1982).



Figuur 2. Diepgravende regenwormsoorten zoals *Lumbricus terrestris* graven quasi-vertikale gangen tot drie meter diepte met verstevigde wanden en diameters van 1 tot 12 mm. Bij hevige neerslag zorgen deze open gangen voor aanzienlijke plaatselijke waterinfiltratie en dus aanvulling van de watervoorraad om droogteperiodes te overbruggen.

Wanneer bij intense neerslag de bodemmatrix en de macroporiën van plantenwortels verzadigd zijn met water, en wanneer door het zwellen van klei de meeste bodemholtes dichtgegaan zijn, blijven regenwormgangen van anekische soorten open omwille van hun verstevigde wanden. In combinatie met hun verticale oriëntatie, hun continuïteit en hun relatief grote afmetingen, vormen deze gangen preferentiële verplaatsingswegen voor water en de daarin meegevoerde stoffen (bv. meststoffen, pesticiden).

Dit type van gangen zorgt er dus voor dat bij intense buien het water niet oppervlakkig afstroomt maar de bodem ter plekke infiltreert en zo als voorraadbuffer kan dienen voor drogere periodes, en/of het grondwaterniveau kan aanvullen. Dit effect is aanzienlijk en in geval van een grote anekische regenwormpopulatie (> 300 kg/ha) kan de oppervlakkige afstroming van water tot zo goed als 0 herleid worden. Water dat niet oppervlakkig afstroomt, kan bovendien ook geen erosie veroorzaken, wat mooi meegenomen is om geen vruchtbare aarde en bodemkoolstof te verliezen.

Anderzijds bewegen bodemwoelende (endogeïsche) soorten zich in tijdelijke, veeleer horizontaal georiënteerde gangen op geringe diepte (0-30 cm, maar vnl. 0-10 cm). Dit type van gangen ontstaat door het opnemen en weer uitscheiden van grote hoeveelheden bodem in de zoektocht naar voedsel of geschikte temperatuur- en vochtomstandigheden. Functioneel zijn dit type van gangen dus meer een niet-continue opeenvolging van holtes variërend in grootte dan echte gangen.

Omdat ze hun activiteiten beperken tot de oppervlakkige bodemlagen, dragen endogeïsche regenwormen wellicht niet rechtstreeks bij tot waterbeweging diep in het bodemprofiel. Het feit dat op zijn minst gedeelten van hun gangen verstopt zitten met uitwerpselen beperkt verder hun efficiëntie in water- en gastransport. Toch dragen de endogeïsche gangen substantieel bij tot een verhoogde bodemporositeit, en zo tot de algemene luchtigheid en doorwortelbaarheid van de bovenlaag van de bodem. Samen met het organisch materiaal in de bodem zorgen de activiteiten van endogeïsche regenwormen voor de belangrijke en na te streven 'sponswerking' van de bodem: een groot waterregulerend vermogen van de bodem dat in tijden van overvloed water kan opslaan in poriën met diverse grootte, en weer met mondjesmaat kan afgeven bij drogere omstandigheden.

Het is door een diversiteit van regenwormen (anekische + endogeïsche) te koesteren en na te streven, dat gezamenlijk een positieve impact op de waterbeschikbaarheid en de doorwortelbaarheid van de bodem wordt bekomen.

---

### UITWERPSELEN

---

Regenwormuitwerpselen bestaan uit minerale bodempartikels, gemengd met verkleind en verteerd organisch materiaal, micro-organismen en eenvoudige suikerverbindingen geproduceerd in het darmkanaal van de worm (Figuur 3) (Shipitalo en Le Bayon, 2004). De vorm en grootte zijn variabel en soortspecifiek en gaat van ronde tot ovale keutels van één tot enkele millimeter in diameter tot een modderachtige brij. Diepgravende regenwormsoorten produceren hun uitwerpselen voornamelijk aan het bodemoppervlak, in de buurt van gangopeningen, of als onderdeel van strooiselhoopjes (zie verder). Anderzijds zetten diepgravende worms ook uitwerpselen af onder de grond, waar ze de gangwand verstevigen, deels de gang opvullen, of worden afgezet in andere bodemholtes.

Endogeïsche soorten scheiden hun uitwerpselen in de regel uit onder de grond in tijdelijke gangen of andere holtes.



Figuur 3. Regenwormuitwerpselen bestaan in vele vormen en afmetingen, afhankelijk van de soort die ze produceert. Ze kunnen zowel onder- als bovengronds worden afgezet. Bovengronds dragen ze bij tot de bodemruwheid waardoor afstromend water wordt afgeremd en meer water de bodem kan indringen. Uitgeharde uitwerpselen zijn stabielere dan omliggende bodemaggregaten en dragen bij tot een stabiele bodemstructuur, bescherming van bodemkoolstof tegen verdere afbraak en een verhoogde porositeit en dus waterbergend vermogen.

Het aantal regenwormuitwerpselen aan het bodemoppervlak is een goede indicatie voor de graad van activiteit van regenwormen. In onze gematigde contreien worden de meeste bovengrondse uitwerpselen in het najaar en in mindere mate in het voorjaar waargenomen. De productie van uitwerpselen is laag in de winter, hoog in lente en herfst, en valt in droge zomers stil. De jaarlijkse productie van bovengrondse uitwerpselen wordt gemiddeld geschat op vijf ton per ha in gematigde streken waar diepgravende wormen dominant zijn. Maar door de moeilijk in te schatten hoeveelheid ondergrondse uitwerpselen, is de hoeveelheid bodem die jaarlijks door het verteringsstelsel van regenwormen passeert wellicht een factor groter. Op jaarbasis passeert wellicht 25 % van de bouwvoor door het darmkanaal van regenwormen.

Regenwormuitwerpselen bevatten doorgaans meer klei en leem en minder zand dan de omringende bodem omwille van selectieve opname door regenwormen. Dit effect is meer uitgesproken voor endogeïsche soorten, die in de regel kleiner zijn dan anekische regenwormen.

Verder vertonen regenwormuitwerpselen een hogere bulkdensiteit dan de niet-opgenomen bodem - tenzij in reeds gecompacteerd bodems. Ze hebben een hogere pH, bevatten meer beschikbare nutriënten, en worden gekenmerkt door een hogere microbiële activiteit. Verse, vochtige uitwerpselen zijn minder water-stabiel dan niet-opgenomen bodem. Verouderde (droge) uitwerpselen zijn doorgaans veel stabielier dan natuurlijke bodemaggregaten.

Het produceren van uitwerpselen beïnvloedt de droogteresistentie van de bodem op drie verschillende manieren: de bodemporositeit verhoogt (meer waterbergend vermogen), de bodemstructuur wordt stabielier (betere en diepere doorworteling), en er wordt een resistente laag aan het oppervlak gecreëerd die de bodem beschermt tegen erosie (meer infiltratie, minder afstroming) en capillaire opstijging (verdamping).

---

## STROOISELHOOPJES OF MIDDENS

---

Middens bestaan uit organische resten verzameld aan het bodemoppervlak, uitwerpselen en soms ook kleine keien boven de openingen van de permanente gangen van diepgravende (anekische) regenwormsoorten (Figuur 4). Ook *Lumbricus rubellus*, een epigeïsche soort die zich soms anekisch gedraagt, produceert kleine middens.

Diameters variëren sterk, maar bedragen meestal 7-10 cm. Middens worden beschouwd als 'biodiversiteitshotspots' met een verhoogde microbiële activiteit en een grotere diversiteit aan bodemorganismen zoals micro-arthropoden, enchytraeïden, maar ook van epigeïsche en endogeïsche wormen dan de omliggende bodem.

Regenwormen verplaatsen (verticaal en horizontaal) en eten selectief van plantenzaden. In strooiselhoopjes komen vaak zaden tot kieming, doordat ze makkelijker kiemen na een passage door het verteringsstelsel van regenwormen en in de 'vruchtbare aarde' van regenwormuitwerpselen en ander afbrekend organisch materiaal een goede kiemingsbodem vinden. Hoewel het onderzoek nog pril is, zijn er aanwijzingen dat regenwormen op die manier de samenstelling van de vegetatie kunnen beïnvloeden (bv in kruidenrijke grasklaver).



Figuur 4. Strooiselhoopjes of middens gefabriceerd door de diepgravende regenwormsoort *Lumbricus terrestris*. Middens beschermen de gangopeningen en vormen een tijdelijke voedselvoorraad die na voorvertering door schimmels en bacteriën gemakkelijker te consumeren is door de wormen. De wormen gebruiken alle beschikbare materialen om middens te construeren, zoals gewasresten, gevallen bladeren, mest,.....

## INTERACTIES TUSSEN REGENWORMEN EN PLANTENWORTELS

Er bestaat een sterke wisselwerking tussen activiteiten en constructies van regenwormen en plantenwortels. Enerzijds bepaalt het bewortelingspatroon van plantensoorten voor een stuk de diepte en het patroon van regenwormactiviteiten. Bijvoorbeeld, plantensoorten met penwortels die dieper het bodemprofiel ingaan, hebben als effect dat regenwormgangen ook dieper terug te vinden zijn. Dit heeft niet met 'begrazing' van wortels door regenwormen te maken, zoals foutievelijk wel eens werd gedacht vroeger. Wellicht wel met het feit dat regenwormen hun dieet aanvullen met bacteriën, protozoa, schimmeldraden en andere micro-organismen die zich in de wortelzone (rhizosfeer) voeden met wortellexudaten van de planten. In de wei bepalen grazende dieren voor een groot deel de samenstelling en hoogte van de grasmat. Door het effect van begrazing op de wortelkwantiteit en -kwaliteit, kan begrazingsbeheer significante effecten hebben op de ondergrondse activiteiten van regenwormen, en bijgevolg indirect van invloed op de bodemstructuur en stabiliteit. Omgekeerd zijn er ook aanwijzingen dat regenwormen niet alleen de productiviteit van het gewas mee sturen, maar ook de samenstelling (eiwitgehalte, secundaire plantmetabolieten). De wisselwerkingen tussen detritivoren, plant en herbivoren lijken daarmee speerpunten van toekomstig onderzoek.

Regenwormgangen vormen vaak de voorkeursroute met de minste weerstand voor plantenwortels in de bodem. Dit fenomeen is duidelijk waar te nemen wanneer plantenwortels mee de diepte induiken waar regenwormgangen een voor plantenwortels ondoordringbare laag zoals een ploegzool doorbreken. Ze profiteren daarbij niet enkel van de verbeterde beluchting en gasuitwisseling, maar ook van het nutriëntenrijke bezetsel van de gangwanden.

Regenwormuitwerpselen vormen ook 'hotspots' van nutriëntenbeschikbaarheid, waar wortelgroei zich concentreert. Zeker uitwerpselen op grotere diepte in het bodemprofiel zijn geliefde wortelplekjes, omdat daar het contrast met de nutriëntenarmere omgevende bodem meer uitgesproken is.

Plantenwortels kunnen zich enkel 'strekken' en 'aandikken' door de omliggende bodemdeeltjes weg te drukken. Dat wegdrukken lukt enkel als er voldoende 'lege ruimtes' zijn, met andere woorden als er voldoende porositeit is. In gecompacteerdde lagen of bodems zorgt het gebrek aan 'lege ruimtes' ervoor dat plantenwortels niet meer verder groeien (naast vaak een gebrek aan zuurstof en beschikbaar water).

Regenwormen bewegen zich op twee manieren voort door de bodem: enerzijds door bodemdeeltjes weg te drukken door peristaltische bewegingen van het wormenlichaam (vergelijkbaar dus met plantenwortels), anderzijds door bodemdeeltjes op te eten en elders weer te deponeren in vorm van uitwerpselen (Engels: 'casts', een intieme mix van organische, minerale en microbiële bestanddelen na passage door het verteringsstelsel van regenwormen). Deze laatste manier van voortbewegen zorgt voor tijdelijke (endogeïsche soorten) of permanente (anekische soorten) macroporiën die door plantenwortels gebruikt kunnen worden.

Wist je trouwens dat endogeïsche regenwormen hun bodemlosmakende activiteiten opschroeven als de bodem gecompacteerd is geraakt, door bijvoorbeeld zware landbouwmachines in natte omstandigheden? Uiteraard binnen bepaalde grenzen, want te veel compactie met anaerobe omstandigheden verdragen deze wormen ook niet.

Er is nog een belangrijk verschil tussen plantenwortels en regenwormen: de snelheid waarmee ze bewegen! Regenwormen kunnen zich per dag een 20 cm lange weg door de bodem banen door bodemdeeltjes weg te drukken (bodemdeeltjes opeten en weer uitscheiden buiten beschouwing gelaten). Daarvoor hebben ze de helft van hun dagelijks energiebudget nodig. Omgerekend is dat het energie equivalent dat vrijkomt bij afbraak van organisch materiaal dat tussen 5 en 15% van de netto primaire productie van het gewas bedraagt. Plantenwortels penetreren de bodem ongeveer 20 keer trager dan regenwormen (1 cm per dag). Gemiddeld gebeurt de creatie van macroporiën in de bodem ten gevolge van biotische processen (regenwormen en plantenwortels samen genomen) op zijn beurt 20 keer sneller dan van abiotische processen (bv. zwel en krimp van klei). Regenwormen en plantenwortels zijn dus in staat om de bodemstructuur na degradatie (bv bodemcompactie door oogsten in slecht weer) een orde van grootte sneller te herstellen dan enkel abiotische processen.

Tussen regenwormen en vlinderbloemige plantensoorten (bv. klaver, luzerne, veldbonen, voedererwten) doet zich een interessante positieve terugkoppeling voor. Regenwormen staan erom bekend dat ze sporen van symbiotische maar immobiele *Rhizobium*-bacteriën transporteren doorheen de bodem en in contact brengen met de wortels van de vlinderbloemige gastplant. Regenwormen zorgen er vervolgens voor dat de wortels van vlinderbloemigen meer gekoloniseerd worden door *Rhizobium spp.*, en dat er effectief ook meer wortelknobbeltjes gevormd worden. Ook blijken de goed doorluchte permanente gangen van anekische regenwormen een positief effect te hebben op vrijlevende stikstoffixerende bacteriën. Zo oefenen regenwormen onrechtstreeks een positieve invloed uit op de beschikbaarheid van stikstof voor het gewas, en dus de gewasopbrengst. Een hogere gewasopbrengst impliceert op zijn beurt een potentieel groter voedselaanbod voor regenwormen, waardoor we in een opwaartse spiraal terechtkomen.

Tot slot zijn er geen aanwijzingen dat regenwormen doelbewust plantenwortels eten, ondanks dat er resten van dode en levende plantenwortels (vnl. wortelharen) teruggevonden worden in hun spijsverteringsstelsel. Alles wijst erop dat dit een gevolg is van het aselectief opnemen van bodem waarin toevallig deze bestanddelen zitten. Soms zorgen regenwormen voor een lagere wortelbiomassa van planten, maar tegelijk ook voor een hogere worteldichtheid van meer fijne wortels die dienen voor nutriëntenopname.



Er zijn wel aanwijzingen dat regenwormen eerder van de wortelzone profiteren, omdat er wortel-exudaten weglekken, die bacteriën, protozoa en andere micro-organismen voeden. Een deel van het dieet van regenwormen bestaat ook uit bacteriën, schimmeldraden en -sporen, en protozoa.

Omgekeerd zijn ontbindende wormenlichamen een interessante nutriëntenbron voor planten. Hier bestaat echter nauwelijks onderzoek over.

## EFFECT VAN DROOGTE EN KLIMAATVERANDERING OP REGENWORMEN

Als afstammelingen van zoetwaterorganismen zijn regenwormen aangepast aan het leven in voldoende vochtige bodems. Het feit dat ze ook in rivierbodems of overstroomde gebieden overleven, en dat ze geen longen bezitten maar ademen via hun vochtige huid, getuigt nog van dat verleden. In dat opzicht is het belangrijk om te weten dat regenwormen als bodemingenieurs (zie Box 1) er alles aan zullen doen om optimale leefomstandigheden (lees: voldoende vochtig) voor zichzelf te creëren. Onrechtstreeks voorzien ze in hun zog zo ook de ideale leefomstandigheden voor tal van andere organismen zoals bacteriën, schimmels, protozoa, ...en planten (Siebert *et al.*, 2019).

Ondanks de toenemende frequentie en het toenemende belang van droogte in veel regio's van de wereld, hebben slechts enkele studies de effecten van droogte op regenwormgemeenschappen onderzocht (zie voor een overzicht Singh *et al.*, 2019). Regenwormen hebben slechts zeer beperkte morfologische of fysiologische middelen om het watertransport door hun huid te verminderen. Ze zijn bovendien alleen actief als er vrij water in de bodem aanwezig is (Lee, 1985). Logisch dan ook dat de groeisnelheid van volwassen en juveniele dieren evenals de productie van cocons dramatisch afneemt als reactie op droogte. Ook het percentage inactiviteit (zomerrust, diapauze; zie verder) bij regenwormen stijgt bij toenemende onbeschikbaarheid van water (waterpotentieel van de bodem van -20 tot 30 kPa).

Van nature beschikken regenwormen over enkele strategieën om ongunstige periodes te overbruggen, zoals droogte, hitte en koude (Edwards en Bohlen, 1996).

Cocons bijvoorbeeld kunnen beter tegen uitdroging en extreme temperaturen dan wormen. De cocons komen vervolgens uit wanneer de leefomstandigheden gunstiger worden. Epigeïsche soorten produceren relatief veel en snel cocons, en aangezien ze zelf sterk achteruitgaan bij droge en warme omstandigheden omdat ze weinig uitwegen hebben in de strooisellaag aan het oppervlak, mogen hun cocons als een geëigende overlevingsstrategie worden beschouwd.

Wormen zelf kunnen naar diepere bodemlagen migreren waar de vocht- en temperatuuromstandigheden gunstiger zijn voor overleving. De typische pendelaar in onze streken, *Lumbricus terrestris*, is hier een goed voorbeeld van. Hij kan zich makkelijk op de geschikte diepte gaan ophouden in zijn min of meer permanente verticale gangenstelsels.

Regenwormen die normaal relatief oppervlakkig leven (epigeïsche en endogeïsche soorten) trekken zich dieper in de bodem terug en worden inactief gedurende de ongunstige periode. In onze gematigde streken doen regenwormen dit gebruikelijk tijdens droogteperiodes, meer

dan dat ze dit doen tijdens natte of koude periodes, waar ze klaarblijkelijk beter mee om kunnen.

Wormen in zuidelijker regionen ondergaan jaarlijks een ‘voorgeprogrammeerde’ inactieve zomerrust of *diapauze*, onafhankelijk van de effectieve omstandigheden. De anekische *Aporrectodea longa*, die ook bij ons voorkomt, maakt van deze strategie gebruik. Soms kunnen ze al vanaf mei tot in september/oktober inactief zijn.

Bij de start van de inactieve periode stoppen regenwormen met eten, ze maken hun darmstelsel leeg, en maken vervolgens een omhulsel van slijm. Vaak verliezen ze ook hun seksuele kenmerken. Ze rollen zich in de slijmprop op in een balletje in een soort van slaapholte in de bodem, waarbij ze zichzelf min of meer in een knoop leggen, met de beide uiteinden goed weg gestoken in de bal. Zo reduceren ze vochtverlies tot een minimum.



Figuur 5. (links): Sommige regenwormsoorten, in het bijzonder strooiselbewoners, overleven ongunstige omstandigheden zoals droogte als cocon. (rechts): Een regenworm die vochtverlies tijdens droogte wil beperken, gaat in zomerrust. Het metabolisme gaat omlaag en de worm rolt zich op in een kluwen om de oppervlakte-volumeverhouding zo klein mogelijk te maken.

Samengevat: aan het oppervlak levende strooiselbewoners hebben het snelste last van droogte en warmte. Ze sterven dan ook vaak bij deze ongunstige omstandigheden. Hun populaties overleven als resistente cocons en ze groeien snel terug aan als de omstandigheden verbeteren. Bodemwoelers lossen het probleem op door in ‘zomerslaapmodus’ te gaan: ze rollen zich op in een beschermende slijmprop en zetten alle lichaamsfuncties op een laag pitje. Pendelaars tenslotte nestelen zich in hun permanente gangenstelsels op een diepte met geschikte temperatuur en vochtigheid om de ongunstige periodes ‘uit te zweten’.

In Mediterrane gebieden met gebruikelijke zomerdroogtes, zorgen extra lange zomerdroogtes vaak voor een forse terugval van regenwormaantallen en -activiteiten. Soortgelijke effecten mogen we ook in onze contreien verwachten bij een wijzigend klimaat.

Als de temperatuur gemiddeld hoger wordt, kan dit gunstig uitpakken voor regenwormen, op voorwaarde dat de gemiddelde temperatuurstijging gepaard gaat met een stijgende vochtvoorziening. Hier lijken klimaatmodellen eerder in de richting te wijzen van gelijktijdige warmere én drogere periodes in de zomer. Zonder bijhorende vochtstijging, valt te verwachten



dat regenwormen het moeilijker krijgen in drogere, maar hetere omstandigheden. Ze worden minder talrijk, minder actief en de diversiteit aan soorten neemt af. Vooral epigeïsche soorten, die aan het oppervlak leven, hebben hier het meeste last van. Dit kan grote gevolgen hebben voor de koolstofcyclus. Er kunnen ook interacties optreden met andere milieuv variabelen en verstoringen. Zo worden regenwormen gevoeliger voor de toxiciteit van pesticiden bij hogere temperaturen.

Tijdens periodes van inactiviteit kunnen regenwormen uiteraard hun positieve invloed op de bodem niet uitoefenen. Verder onderzoek moet uitwijzen welke effecten de klimaatverandering, die voor langere droogteperiodes afgewisseld met intense neerslag kan zorgen, heeft op het functioneren van regenwormen.

Er is empirisch bewijs dat landbouwpraktijken die de bodembiodiversiteit stimuleren, zoals een grotere gewasdiversiteit, minder grondbewerking en voortdurende bodembedekking, de effecten van klimaatverandering op regenwormgemeenschappen kunnen helpen verzachten (Singh *et al.* 2019, zie ook hieronder Handvaten voor regenwormbeheer op het veebedrijf). Beheerpraktijken die de residu-inbreng in de bodem vergroten, kunnen de dichtheid van regenwormen vergroten, onafhankelijk van de grondbewerking, en de kwaliteit van de residu-invoer kan ook een drijvende factor zijn voor regenwormgemeenschappen. Het verbeteren van de plantendiversiteit, de productiviteit en de kwaliteit van het strooisel (bijvoorbeeld een hoog N-gehalte) zou de schadelijke effecten van de klimaatverandering, bijvoorbeeld door droogte, kunnen verzachten (Mariotte *et al.* 2016). Een goed doordacht regenwormbeheer wordt dus nog belangrijker bij wijzigende klimaatomstandigheden.

## HANDVATEN VOOR REGENWORMBEHEER OP HET VEEBEDRIJF

---

Gemiddeld telt een vierkante meter landbouwbodem - afhankelijk van het bodemtype, landgebruik en bodembeheer – tussen de 75 en de 200 regenwormen, samen goed voor 5 à 200 gram worm (of tussen 50 en 2 000 kg per hectare) (Edwards en Bohlen, 1996; Edwards, 2004). Grasland telt gemiddeld 300 wormen per m<sup>2</sup>. Dit zijn er 3 miljoen per hectare, of 12 in een graskluit van 20 x 20 x 20 cm<sup>3</sup>.

Een hogere pH, een hoger leem- en kleigehalte, een hoger koolstofgehalte, en een hoger vochtgehalte zijn alle gunstig voor regenwormen.

De biomassa van regenwormen is gewoonlijk groter in permanente weiden en tijdelijk gras(klaver) dan in jaarlijks bewerkt land (Tabel 2). Bovendien zijn de populaties van regenwormen meestal groter in no-tillage systemen en andere systemen met verminderde bodembewerking dan in bodems met conventionele grondbewerking.

De lagere biomassa in intensief bewerkte gronden is deels te wijten aan het feit dat bodembewerking niet alleen regenwormen verwondt, maar ze ook blootstelt aan een verhoogd risico op predatie. Herhaalde grondbewerking gevolgd door ploegen vermindert regenwormpopulaties met 74%. Gewoonlijk heeft ondiepe bodembewerking minder impact op regenwormpopulaties dan diepe bodembewerking. Dit verschil is vooral uitgesproken bij droog weer. Grondbewerking verandert de bodemstructuur en vernietigt de beschermende vegetatiebedekking, waardoor de vochtcondities veranderen en de temperatuurschommelingen toenemen. Door de afbraaksnelheid te verhogen, vermindert de

jaarlijkse grondbewerking ook de hoeveelheid organische stof in de bodem, die de voedselbron van de regenworm is.

Tabel 2. Effecten van beheermaatregelen op de verschillende categorieën van regenwormen (aangepast naar van Eekeren *et al.*, 2014)

	Epigeïsche wormen strooiselbewoners	Anekische wormen pendelaars	Endogeïsche wormen bodemwoelers
<b>pH</b>			
Verhogen/bekalken	+	+	+
Verlagen/verzurende (kunst)meststoffen*	-	-	-
<b>Bemesting</b>			
Drijfmest	-/0	0/+	+
Stalmest	++	++	+
<b>Bodembewerking</b>			
Drijfmest - zodesnijder	-	0	0
Frezen	-	0/-	0/-
Ploegen	-	--	0
NKG/directzaai	++	++	+
<b>Teelt</b>			
Akker	--	-	+
Tijdelijk grasland	+	+	+
Permanent grasland	++	++	+
Grasklaver			
<b>Beweiding</b>			
Compactie door betreding/vertrapping	-	0	-
Mestflatten	++	++	+

\*Niet toegelaten in biologische landbouw

## CONCLUSIES

---

Regenwormen worden beschouwd als ecosysteemingenieurs (Jones *et al.* 1994; Cuddington *et al.*, 2007) die een cruciale rol spelen in tal van ecosysteemdiensten zoals de afbraak van organisch materiaal, het circuleren van nutriënten, het bergen van overtollig water en het tegengaan van erosie (Lavelle *et al.*, 1997; Lavelle *et al.*, 2006; Jouquet *et al.*, 2006; Valckx *et al.*, 2009; Valckx, 2011; Bardgett en van der Putten, 2014; Le Bayon *et al.*, 2017)

Doordat hun ondergrondse activiteiten zo'n ingrijpende invloed hebben op de organisatie en de processen van het bodemecosysteem, dragen regenwormen in grote mate bij aan de bodemvruchtbaarheid, een luchtige bodemstructuur, een goede waterhuishouding en uiteindelijk de gewasopbrengst in landbouwbodems (Edwards en Bohlen, 1996; Edwards, 2004; Shipitalo en Le Bayon, 2004; Blouin *et al.*, 2013; van Groenigen *et al.*, 2014; Bertrand *et al.*, 2015).

Recent onderzoek toont aan dat regenwormen binnen bepaalde grenzen de effecten van klimaatverandering op het functioneren van landbouwbodems kunnen temperen (Bender *et al.*, 2016; Siebert *et al.*, 2019). Ook op dit vlak komen deze ondergrondse topsporters ons te hulp om de bodem te herstellen (Jouquet *et al.*, 2014).

Anderzijds zijn regenwormen op hun beurt niet ongevoelig voor klimaatverandering en ondervinden ze feedback van het ganse bodemecosysteem (Mariotte *et al.*, 2014). Klimaatfactoren zoals temperatuur, neerslag, bodemvochtigheid, en extreme gebeurtenissen zoals droogte en overstroming hebben een effect op de samenstelling en het functioneren van het bodemleven, waaronder regenwormen (Hiltpold *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2020). Aangezien regenwormen ecosysteemingenieurs zijn met een buitenproportionele impact op het functioneren van het bodemecosysteem, zullen de effecten van klimaatverandering op regenwormen zich versterkt doorzetten op het leveren van bodemecosysteemdiensten in het algemeen.

Met de opkomst van minder intensieve productiesystemen, zoals conserveringslandbouw en biologische landbouw, zouden regenwormen terug een grotere regulerende rol kunnen spelen in het efficiënt en duurzaam functioneren van landbouwbodems.

## LITERATUURLIJST

---

Bardgett, R. D., van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515: 505-511.

Bender, F. S., Wagg, C., van der Heijden, M.G.A. (2016). An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology and Evolution* 2017, 31: 440-452.

Bertrand, M., Barot, S., Blouin, E., Whalen, J., de Oliveira, T., Roger-Estrade, J. (2015). Earthworm services for cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35: 553-567.

Bouché, M.B. (1972) *Lombriciens de France. Écologie et systématique*, Institut national de la recherche scientifique. 671 pp.

- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G, Brussard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J. E., Cluzeau, D., Brun, J.-J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64: 161-182.
- Bottinelli, N., Hedde, M., Jouquet, P., Capowicz, Y. (2020). An explicit definition of earthworm ecological categories – Marcel Bouché’s triangle revisited. *Geoderma*, Volume 372.
- Brown, G.G., Edwards, C.A. & Brussaard, L. (2004). How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms. In: *Earthworm ecology* (ed. C.A. Edwards), pp. 13-49. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Cuddington, K., Byers, J., Wilson, W., Hastings, A. (2007). *Ecosystem Engineers, Plants to Protists*. 1st Ed. Academic Press, London. 432 pp.
- Edwards, C. A., Bohlen, P. J. (1996). *The Biology and Ecology of Earthworms*. 3rd ed. Chapman and Hall, London. 426 pp.
- Edwards, C.A. (2004). *Earthworm Ecology*, 2nd ed. CRC Press LLC, St. Lucie Press, Boca Raton. 456 pp.
- Hiltbold, I., Johnson, S. N., Le Bayon, R.-C., Nielsen, U. N. (2017). Climate change in the underworld: impacts for soil-dwelling invertebrates. In: Johnson, S. N., Jones, T. H. (Eds). *Global Climate Change and Terrestrial Invertebrates*. Wiley-Blackwell. pp. 201-228.
- Jones, C. G., Lawton J.H., Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69: 373-386.
- Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., Lepage, M. (2006). Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 32: 153-164.
- Jouquet, P., Blanchart, E., Capowicz, Y. (2014). Utilization of earthworms and termites for the restoration of ecosystem functioning. *Applied Soil Ecology*, 73: 34-40.
- Kretzschmar, A. (1982). The burrow system of earthworms in grassland – seasonal variations of field observations. *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol*, 19: 579-591.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O. W., Dhillion, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33: 159-193.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42: S3-S15.
- Le Bayon, R. C., Bullinger-Weber, G., Schomburg, A. C., Turberg, P., Schlaepfer, R., & Guenat, C. (2017). Earthworms as ecosystem engineers: A review. In: *Earthworms: Types, Roles and Research* (pp. 129-178). New York: NOVA Science Publishers.
- Lee, K.E. (1985). *Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use*. 411 pp.
- Mariotte, P., Le Bayon, R.-C., Eisenhauer, N., Guenat, C., Buttler, A. (2016). Subordinate plant species moderate drought effects on earthworm communities in grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 96: 119-127.
- Ruiz, S., Or, D., Schymanski, S. (2015). Soil penetration by earthworms and plant roots - Mechanical energetics of bioturbation of compacted soils. *PLOS ONE* 10(6): e0128914.
- Scheu, S. (2003). Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia* 47, 846–856.
- Shipitalo, M., Le Bayon, R.-C. (2004). Quantifying the effects of earthworms on soil aggregation and porosity. In: *Earthworm Ecology* (ed C.A. Edward), pp. 183-200. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Siebert, J., Eisenhauer, N., Poll, C., Marhan, S., Bonkowski, M., Hines, J., Koller, R., Ruess, L., Thakur, M. (2019). Earthworms modulate the effects of climate warming on the taxon richness of soil meso- and macrofauna in an agricultural system. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 278: 72-80.
- Singh, J., Schädler, M., Demetrio, W., Brown, G. G., Eisenhauer, N. (2019). Climate change effects on earthworms - a review. *Soil Organisms*, 91(3), 113–137.
- Vanderersch, M., Valckx, J. (2012). *Bodemorganismen@work. Over het leven in landbouwbodems*. Brochure in kader van het Interreg IV-project ‘BodemBreed’. Leuven. 24 pp.
- Valckx, J., Govers, G., Hermy, M., Muys, B. (2009). *Dieper graven naar het belang van regenwormen in duurzaam akkerbeheer - een toolkit voor ecologische erosiecontrole*. Departement Aard- en omgevingswetenschappen, KULeuven, 34 pp.

Valckx, J. (2011). Ecosystem engineering by earthworms in temperate agroecosystems on loamy soils. PhD dissertation. KULeuven. 147 pp.

van Eekeren, N., Bokhorst, J., Deru, J., de Wit, J. (2014). Regenwormen op het melkveebedrijf. Handreiking voor herkennen, benutten en managen. Louis Bolk Instituut, 40 pp.

van Groenigen, J. W., Lubbers, I. M., Vos, H. M. J., Brown, G. G., De Deyn, G. B., van Groenigen, K. J. (2014). Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Scientific Reports* 4, 6365: 1-7.

Zaller, J. G., Wechselberger, K. F., Gorfer, M., Hann, P., Frank, T., Wanek, W., Drapela, T. (2013). Subsurface earthworm casts can be important soil microsites specifically influencing the growth of grassland plants. *Biology and Fertility of Soils*, 49: 1097-1107.