



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Waarderen van biochar's bodemecosysteemdiensten

Amelien Allard

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting technologie in business

PROMOTOR :

Prof. dr. Robert MALINA

BEGELEIDER :

Mevrouw Madina BEKCHANOVA



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be

Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2022
2023



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master handelsingenieur

Masterthesis

Waarderen van biochar's bodemecosysteemdiensten

Amelien Allard

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master handelsingenieur, afstudeerrichting technologie in business

PROMOTOR :

Prof. dr. Robert MALINA

BEGELEIDER :

Mevrouw Madina BEKCHANOVA

1. Voorwoord

In mijn eerste masterjaar selecteerde ik het onderwerp van deze thesis, namelijk "Kosten-batenanalyse van bodemecosysteemdiensten geleverd door biochar" voor mijn masteropleiding 'Handelsingenieur' met als afstudeerrichting 'Technology in Business'. Ik koos dit onderwerp voor mijn masterproef, omdat biochar als concept al enkele keren ter sprake was gekomen doorheen mijn opleiding en ik wilde hier graag meer over te weten komen. De naam van de thesis is later veranderd naar "Waarderen van biochar's bodemecosysteemdiensten" in samenspraak met mijn begeleider en promotor. De nieuwe naam reflecteert accurater wat er precies in deze thesis wordt uitgevoerd.

Ik wil graag mijn begeleider Madina Bekchanova bedanken, omdat ze mij keer op keer constructieve feedback gaf, mijn vragen uitgebreid en snel beantwoordde en ideeën en suggesties voorstelde wanneer ik door de bomen het bos niet meer zag. Zonder haar hulp had ik deze masterproef niet kunnen voltooien. Ook wil ik mijn promotor Prof. Dr. Robert Malina bedanken voor het aanreiken van dit onderwerp en om te helpen waar nodig, zoals door het leveren van opbouwende tussentijdse feedback.

Ten slotte zou ik nog graag mijn familieleden en vrienden willen bedanken voor de steun tijdens het hele proces vanaf het kiezen van mijn onderwerp tot het afronden van mijn masterproef.

Amelien Allard

Oud-Turnhout, 31 mei 2023

2. Samenvatting

De globale klimaatverandering vormt een probleem dat hoofdzakelijk wordt veroorzaakt en verergert door menselijke activiteiten. Eén van de negatieve consequenties die volgt uit de klimaatverandering is de verminderde vruchtbaarheid van de bodem. Deze verminderde bodemkwaliteit leidt tot drie negatieve gevolgen die binnen dit onderzoek verder worden onderzocht. Ten eerste wordt de voedselvoorziening in gevaar gebracht en zullen dus minder gewassen kunnen groeien. Ten tweede wordt de koolstofcyclus verstoord, aangezien een bodem met verminderde vruchtbaarheid minder koolstofemissies kan opslaan. Hierdoor zal er dus meer vervuiling zijn. Ten derde kan te veel stikstof vloeien naar waterbronnen diep in de grond, wat voor waterverontreiniging zorgt (Aczel, 2019; Dhanwantri, Sharma, Mehta, & Prakash, 2014; Europese Commissie, 2021; Mehmood et al., 2020).

Biochar is een koolstofrijke vaste stof die met behulp van een pyrolyse ontwikkeld kan worden uit verschillende soorten dierlijk en plantaardig afval. Biochar is een bodemverbeteraar die vergeleken met traditionele meststoffen milieuvriendelijker zou moeten zijn. Biochar zou volgens de literatuur moeten helpen bij het bestrijden van de eerder genoemde problemen door te zorgen voor meer koolstofvastlegging, minder stikstofuitspoeling en meer gewasopbrengsten. Binnen dit onderzoek wordt gekeken naar de monetaire waarde van die drie effecten van biochar bij zandbodems (Bekchanova et al., 2021; Hossain et al., 2020; Liu et al., 2018).

In het totaal worden binnen dit onderzoek zes cases onderzocht, drie laboratoriumexperimenten en drie veldexperimenten. In verband met het effect van biochar op koolstofvastlegging wordt één veldexperiment (case 1) en één laboratoriumexperiment (case 2) besproken. Hetzelfde gebeurt voor biochar's effect op stikstofuitspoeling (cases 3 en 4) en op gewasopbrengsten (cases 5 en 6). De monetaire waarden voor de zes cases worden berekend aan de hand van de schadekostmethode (voor cases 1 tot en met 4) en de marktprijsmethode (voor cases 5 en 6).

Er kan wel gezegd worden dat dit onderzoek een belangrijke bijdrage levert aan het onderzoek over biochar, aangezien vorige onderzoeken enkel bestudeerden wat de impact was van biochar op koolstofvastlegging, stikstofuitspoeling en gewasopbrengsten. Dit onderzoek koppelt monetaire waarden aan die impact van biochar. Hieronder zijn de monetaire waarden te zien per hectare in 2023, net als de hoeveelheden biochar.

Case 1 komt uit China. Het voordeel van biochar stijgt hierbij van € 246,15 bij 15 ton biochar naar € 518,86 bij 45 ton biochar. Case 2 komt ook uit China. Het voordeel van 15 ton biochar bedraagt € 14,37 vergeleken met de controle. Het voordeel van 15 ton biochar gecombineerd met stikstof bedraagt € 23,55 vergeleken met de stikstof behandeling.

Case 3 komt uit de Verenigde Staten van Amerika. Het voordeel van biochar vergeleken met de controle varieert van – € 115,82 bij 40 ton biochar van amandelschillen tot € 14,92 bij 40 ton biochar van zachte houtsoorten. Het voordeel van biochar gecombineerd met compost vergeleken met de compost behandeling bedraagt € 51,34 bij 20 ton biochar van amandelschillen en € 86,99 bij 20 ton biochar van zachte houtsoorten. Case 4 komt uit Denemarken. Het voordeel van 5,85 ton biochar stijgt van – € 9,62 bij biochar geproduceerd via een trage pyrolyse aan 525 graden Celsius tot € 3,21 bij biochar geproduceerd via een snelle pyrolyse aan 525 graden Celsius.

Case 5 komt uit Ghana. Het voordeel van 10 ton biochar bij maïs varieert van € 7,93 tot € 565,44. Het voordeel van 10 ton biochar bij okra varieert van – € 2.437,48 tot € 1.863,95. Het voordeel van 10 ton biochar bij cassave varieert van – € 1,49 tot € 7,19. Deze bedragen zijn afhankelijk van de gekozen controle en eventuele combinaties van biochar met compost en/of NPK meststoffen. Case 6 komt uit Pakistan. Het voordeel van 3,9 ton biochar varieert van € 1.191,68 tot € 2.420,22. Het voordeel van 7,8 ton biochar varieert van € 1.597,10 tot € 3.366,20. Deze bedragen zijn afhankelijk van de grondstof waarvan biochar gemaakt is. Ook variëren de bedragen tussen niet-geïnoculeerd graan en geïnoculeerd graan. Inoculeren wil hierbij zeggen dat bacteriën worden toegevoegd aan de zaden voordat de zaden worden geplant.

De cases tonen aan dat biochar een impact heeft op koolstofvastlegging, stikstofuitspoeling en gewasopbrengsten en bevestigen hierbij de effecten die in de literatuur werden gevonden. Wel wordt duidelijk dat verschillende factoren de impact van biochar kan beïnvloeden. Verder onderzoek zou meer cases kunnen bestuderen om de resultaten daarvan te vergelijken met de resultaten van dit onderzoek. Ook kan verder onderzoek kijken naar de verschillende factoren die de resultaten beïnvloeden.

3. Inhoudsopgave

1.	Voorwoord	1
2.	Samenvatting	2
3.	Inhoudsopgave	4
4.	Tabellenlijst	6
5.	Figurenlijst	7
6.	Probleemstelling	8
7.	Literatuurstudie	10
7.1.	Selectie	10
7.2.	Koolstofcyclus	11
7.3.	Stikstofcyclus	13
7.4.	Biochar	15
8.	Methode	17
8.1.	Waarderingsmethoden	17
8.1.1.	Marktprijsmethode	17
8.1.2.	Schadekostmethode	17
8.1.3.	Reductiekostmethode	17
8.2.	Beschrijving van de cases	18
8.2.1.	Koolstofvastlegging	18
8.2.1.1.	Case 1: Veldexperiment (China)	18
8.2.1.2.	Case 2: Laboratoriumexperiment (China)	18
8.2.2.	Stikstofuitspoeling	19
8.2.2.1.	Case 3: Veldexperiment (VSA)	19
8.2.2.2.	Case 4: Laboratoriumexperiment (Denemarken)	19
8.2.3.	Gewasopbrengsten	20
8.2.3.1.	Case 5: Veldexperiment (Ghana)	20
8.2.3.2.	Case 6: Laboratoriumexperiment (Pakistan)	20
8.3.	Assumpties	22
9.	Resultaten	24
9.1.	Koolstofvastlegging	24

3. Inhoudsopgave

9.1.1.	Case 1: Veldexperiment (China)	24
9.1.2.	Case 2: Laboratoriumexperiment (China).....	28
9.2.	Stikstofuitspoeling	31
9.2.1.	Case 3: Veldexperiment (VSA).....	31
9.2.2.	Case 4: Laboratoriumexperiment (Denemarken).....	35
9.3.	Gewasopbrengsten	38
9.3.1.	Case 5: Veldexperiment (Ghana)	38
9.3.2.	Case 6: Laboratoriumexperiment (Pakistan)	43
9.4.	Overzicht van cases 1 tot en met 6	47
10.	Discussie.....	50
10.1.	Beperkingen van dit onderzoek en aanbevelingen voor verder onderzoek	50
10.2.	Vergelijking met de literatuur.....	51
11.	Conclusie	52
12.	Bibliografie	54

4. Tabellenlijst

Tabel 1: Eigenschappen van bodem en biochar per case	21
Tabel 2: Assumpties binnen dit onderzoek.....	23
Tabel 3: Assumpties per case	23
Tabel 4: CO2-emissies in 2015 en 2016	24
Tabel 5: CO2-emissies (in kg/ha) in 2015.....	28
Tabel 6: Stikstofuitspoeling (in kg/ha) in 2018 en 2019	31
Tabel 7: Stikstofuitspoeling (in kg/ha) in 2012.....	35
Tabel 8: Gewasopbrengsten (in kg/ha) in 2016 en 2017.....	38
Tabel 9: Gewasopbrengsten (in kg/ha) in 2020	43
Tabel 10: Verschillen in kosten van CO2-emissies tussen biochar behandelingen en controles vergeleken met de kosten van biochar (cases 1 en 2) (in euro per hectare) in 2023	47
Tabel 11: Verschillen in kosten van stikstofuitspoeling tussen biochar behandelingen en controles vergeleken met de kosten van biochar (cases 3 en 4) (in euro per hectare) in 2023	48
Tabel 12: Verschillen in gewasopbrengsten tussen biochar behandelingen en controles vergeleken met de kosten van biochar (cases 5 en 6) (in euro per hectare) in 2023.....	49

5. Figurenlijst

Figuur 1: Kosten van CO2-emissies (in euro per hectare) in 2015, 2016 en 2023	26
Figuur 2: Verschil in kosten van CO2-emissies (in euro per hectare) in 2015, 2016 en 2023	26
Figuur 3: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2015, 2016 en 2023	27
Figuur 4: Kosten van CO2-emissies (in euro per hectare) in 2015 en 2023	29
Figuur 5: Verschil in kosten van CO2-emissies (in euro per hectare) in 2015 en 2023	30
Figuur 6: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2015 en 2023	30
Figuur 7: Kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023	33
Figuur 8: Verschil in kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023 ..	33
Figuur 9: Kosten van AS biochar (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023	33
Figuur 10: Kosten van SW biochar (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023	34
Figuur 11: Kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2012 en 2023	36
Figuur 12: Verschil in kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2012 en 2023	37
Figuur 13: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2012 en 2023	37
Figuur 14: Gewasopbrengsten van maïs (in euro per hectare) in 2016 en 2023	39
Figuur 15: Gewasopbrengsten van okra (in euro per hectare) in 2016 en 2023	40
Figuur 16: Gewasopbrengsten van cassave (in euro per hectare) in 2016 en 2023	40
Figuur 17: Verschil in gewasopbrengsten van maïs (in euro per hectare) in 2016 en 2023	41
Figuur 18: Verschil in gewasopbrengsten van okra (in euro per hectare) in 2016 en 2023	41
Figuur 19: Verschil in gewasopbrengsten van cassave (in euro per hectare) in 2016 en 2023	42
Figuur 20: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2016 en 2023	42
Figuur 21: Graanopbrengsten (niet inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023	44
Figuur 22: Graanopbrengsten (inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023	45
Figuur 23: Verschil in graanopbrengsten (niet inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023 ..	45
Figuur 24: Verschil in graanopbrengsten (inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023	46
Figuur 25: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2020 en 2023	46

6. Probleemstelling

De opwarming van de aarde vormt sinds de negentiende eeuw een globaal probleem, hoofdzakelijk veroorzaakt door menselijke activiteiten. Deze menselijke activiteiten zorgen namelijk voor een grotere uitstoot aan broeikasgassen. Hierdoor worden de nutriëntencycli verstoort, onder andere de stikstofcyclus en de koolstofcyclus. Zo verbranden mensen fossiele brandstoffen voor bijvoorbeeld elektriciteit of transport, waardoor meer koolstof wordt vrijgelaten in de atmosfeer. De koolstofcyclus raakt hierbij verstoort en dit draagt bij tot de opwarming van de aarde. De opwarming van de aarde zorgt voor een verminderde bodemkwaliteit, verlies aan biodiversiteit, verminderde beschikbaarheid van water en meer vervuiling. Deze ondervindingen worden bevestigd door de onderzoeken van Dhanwantri et al. (2014) en Mehmood et al. (2020) (Dhanwantri et al., 2014; Mehmood et al., 2020).

Door de klimaatverandering vermindert dus de vruchtbaarheid van de bodem. Ongeveer zestig tot zeventig procent van de bodems in de Europese Unie is niet gezond, waardoor de Europese Unie jaarlijks naar schatting 1,25 miljard euro aan landbouwproductie verliest. De bodems moeten worden beschermd, hersteld en duurzamer beheerd. De verminderde vruchtbaarheid van de bodems brengt namelijk de voedselvoorziening van de mens in gevaar, doordat bodems nutriënten bieden aan planten en deze planten worden geconsumeerd door mensen en dieren. De gezondheid van de bodem is niet alleen voor de voedselvoorziening van de mens belangrijk, maar ook voor de koolstofcyclus. Gezonde bodems kunnen koolstof uit de atmosfeer namelijk voor een lange tijd opslaan (Europese Commissie, 2021).

Nutriënten bewegen in een cyclus. In de bodem leven micro-organismen die nutriënten halen uit dode planten en dieren om deze aan te bieden aan levende planten wanneer de levende planten nood hebben aan deze nutriënten. Deze kringloop wordt verstoord door de mens, aangezien binnen de landbouw nutriënten uit de bodems worden gehaald voor menselijke consumptie. Dit verlies aan nutriënten in de bodem kan worden gecompenseerd via meststoffen die nieuwe nutriënten aanbieden. Deze meststoffen produceren echter vervuilende broeikasgassen, zoals koolstofdioxide (Dr Elaine's Soil Food Web School, 2019).

Op basis van organisch materiaal kan door middel van pyrolyse biochar worden gecreëerd. Een definitie van biochar is "vast materiaal verkregen uit de thermochemische omzetting van biomassa in een zuurstofarme omgeving". In een zuurstofarme omgeving wordt organisch materiaal dus verwarmd tot een hoge temperatuur. Organisch materiaal kan hierbij bestaan uit bijvoorbeeld dierlijk of plantaardig afval. Pyrolyse levert als resultaat biochar, bio-olie en gassen. Snelle pyrolyse levert voornamelijk bio-olie, terwijl trage pyrolyse voornamelijk biochar van een hoge kwaliteit produceert. Daarom is trage pyrolyse geschikter voor de productie van biochar. Dit wordt bevestigd door Bekchanova et al. (2021) en Tan et al. (2021) (Bekchanova et al., 2021; Tan et al., 2021).

Biochar functioneert als milieuvriendelijke bodemverbeteraar. Met andere woorden, biochar kan aan de bodem worden toegevoegd om het probleem rond de verminderde vruchtbaarheid van de bodem te verhelpen. Een eerste voordeel is dat biochar nutriënten kan bieden aan planten en micro-organismen. Een tweede voordeel is dat biochar deze nutriënten kan opslaan en bewaren. Zo kan biochar stikstofuitspoeling verminderen door stikstof op te slaan wanneer de bodem de maximale opslagcapaciteit van stikstof heeft bereikt. Ook kan biochar koolstof opslaan om de vervuilende

6. Probleemstelling

koolstofuitstoot in de atmosfeer te verminderen. Deze twee voordelen leiden samen tot een derde voordeel, namelijk dat biochar de vruchtbaarheid van de bodem verbetert, waardoor de opbrengst aan gewassen stijgt binnen de landbouw. Deze ondervindingen worden bevestigd door Bekchanova et al. (2021), Hossain et al. (2020) en Liu et al. (2018) (Bekchanova et al., 2021; Hossain et al., 2020; Liu et al., 2018).

Binnen dit onderzoek worden de effecten van biochar op de gewasopbrengsten, stikstofuitspoeling en koolstofvastlegging gewaardeerd. Er zijn al zeer veel studies beschikbaar die deze concepten en de onderlinge relaties bekijken vanuit het wetenschappelijke standpunt, meer specifiek het chemische standpunt. Dit onderzoek is vernieuwend doordat de benoemde concepten en de onderlinge relaties hier bekeken zullen worden vanuit het economische standpunt. Eerder gepubliceerde papers onderzoeken de impact van biochar's ecosystemendiensten, terwijl in dit onderzoek wordt getracht om deze impact uit te drukken in monetaire waarden. Er wordt getracht een monetaire waarde te koppelen aan de effecten van biochar op koolstofvastlegging, stikstofuitspoeling en gewasopbrengsten. Hierbij wordt gekeken naar zandbodems. Zandbodems zijn volgens Bekchanova et al. (2021) namelijk weinig vruchtbaar, waardoor deze bodems grotere voordelen zouden moeten ervaren bij het toevoegen van biochar dan andere, vruchtbaardere bodems (Bekchanova et al., 2021). De volgende drie onderzoeksvragen staan centraal binnen dit onderzoek.

1. Wat is de monetaire waarde van het effect van biochar op koolstofvastlegging bij zandbodems?
2. Wat is de monetaire waarde van het effect van biochar op stikstofuitspoeling bij zandbodems?
3. Wat is de monetaire waarde van het effect van biochar op gewasopbrengsten bij zandbodems?

7. Literatuurstudie

7.1. Selectie

EBSCOhost, Google Scholar en Web of Science zijn de databases die gebruikt werden bij het zoeken naar wetenschappelijke literatuur over biochar en diens invloed op de stikstofcyclus en de koolstofcyclus. De gebruikte zoektermen zijn: soil, nitrogen cycle, nitrogen uptake, nitrogen leaching, fixation, nitrification, denitrification, immobilisation, mineralisation, nitrogen, carbon, carbon cycle, carbon sequestration, nutrient, nutrient cycle, crop yield en biochar. Hierbij werd voor nitrogen en voor carbon zowel de volledige naam (nitrogen en carbon) als de afkortingen gebruikt (N en C). Ook werden combinaties van zoektermen gebruikt. De zoektermen werden vertaald naar het Nederlands, maar dit leverde geen meerwaarde. Daarom werd voor Engelstalige literatuur gekozen. Er werd gezocht naar literatuur gepubliceerd na 2000. De literatuur die gebruikt werd voor de literatuurstudie is gepubliceerd tussen 2010 en 2022.

7.2. Koolstofcyclus

Volgens Mehmood et al. (2020) is koolstof een belangrijk element binnen de natuur dat essentieel is voor het leven op aarde en voor de gezondheid van de bodem. Koolstof bevindt zich in verschillende reservoirs, zoals de atmosfeer, de oceaan, de planten, de bodem en fossiele brandstoffen en beweegt tussen deze opslagplaatsen. Als de koolstofconcentratie op één plaats wordt verstoord, heeft dit automatisch invloed op de koolstofconcentraties van de andere plaatsen. Een hogere koolstofconcentratie binnen de atmosfeer zorgt voor een stijging in de globale temperatuur (Mehmood et al., 2020).

Koolstof beweegt in een natuurlijke cyclus dat de koolstofcyclus wordt genoemd. Koolstof beweegt namelijk van de atmosfeer naar de bodem door middel van fotosynthese. Via de ontbinding en de verbranding van fossiele brandstoffen beweegt de koolstof weer van de bodem naar de atmosfeer. Ook zijn er verschillende microben en chemische reacties in de bodem waarbij de organische koolstof wordt afgebroken. Een deel van de afgebroken koolstof wordt gebruikt door planten en de rest wordt terug vrijgelaten in de atmosfeer (Mehmood et al., 2020).

De laatste jaren is de koolstofconcentratie in de atmosfeer toegenomen als gevolg van ontbossing, industrialisatie, transport en de huidige levensstijl van mensen. Dit resulteerde in een globale klimaatverandering. De voortdurende veranderingen in de temperatuur op aarde zorgde voor een verstoring in de koolstofcyclus (Mehmood et al., 2020).

Dhanwantri et al. (2014) bevestigen dat de koolstofcyclus verwijst naar de beweging van koolstof in zijn verschillende vormen. Ten eerste is er de koolstofuitwisseling tussen de atmosfeer en de vegetatie. Planten absorberen CO₂ uit de atmosfeer tijdens fotosynthese en geven CO₂ weer af aan de atmosfeer tijdens hun ademhaling. Deze uitwisseling vindt ook plaats tussen de oceanen en de atmosfeer, aangezien organismen in oceanen ook fotosynthese gebruiken. Ten tweede is er de verbranding van fossiele brandstoffen. In dit proces gaat koolstof rechtstreeks vanaf het bronpunt naar de atmosfeer. Ten derde is er de verandering in landgebruik en landbedekking. Deze veranderingen zijn, in combinatie met een toenemend energiegebruik voor ontwikkelingsdoeleinden, belangrijke redenen voor de opwarming van de aarde en de klimaatverandering (Dhanwantri et al., 2014).

Mehmood et al. (2020) vertellen dat de koolstofconcentratie in de bodem afneemt naarmate meer organische koolstof wordt vrijgelaten in de atmosfeer. De te grote uitstoot van koolstofdioxide zorgt voor een stijging in de temperatuur op aarde. Deze opwarming van de aarde zorgt opnieuw voor een verhoogde uitstoot aan koolstofdioxide in de atmosfeer en beïnvloedt zo de koolstofcyclus. Er wordt dus een cyclus gevormd waarbij menselijke activiteiten aan de oorsprong liggen. Deze theorie wordt bevestigd door het onderzoek van Elbasiouny et al. (2022) (Elbasiouny et al., 2022; Mehmood et al., 2020).

De opwarming van de aarde en de klimaatverandering kunnen worden tegengegaan door koolstof op te vangen en langdurig te bewaren in koolstofreservoirs, zodat deze niet kan worden uitgestoten in de atmosfeer. Koolstofreservoirs kunnen voorkomen in de natuur of gevormd zijn door mensen. Voorbeelden van dergelijke reservoirs zijn de bodem, houtproducten en de atmosfeer. De vastlegging van koolstof zorgt voor een verminderde uitstoot aan koolstofdioxide, het verhogen van de opbrengst

7. Literatuurstudie

aan biomassa, het verminderen van temperatuurschommelingen en het verbeteren van de kwaliteit van de bodem. Aangezien de bodem een natuurlijke thuis vormt voor planten en levende organismen, is het zeer belangrijk om de bodemkwaliteit te verbeteren. De koolstofvastlegging in de bodem kan worden verbeterd door beter landgebruik. Deze beschrijving van Mehmood et al. (2020) wordt bevestigd door Dhanwantri et al. (2014) (Dhanwantri et al., 2014; Mehmood et al., 2020).

Ook het onderzoek van Elbasiouny et al. (2022) bevestigt de beschrijving van Mehmood et al. (2020) over koolstofvastlegging. Van koolstofvastlegging wordt tevens enkele definities gegeven, zoals "de opslag van koolstof in terrestrische ecosystemen, grotendeels ondergronds in de vorm van carbonaten, op middellange en lange termijn (15 tot 50 jaar)", "het voorzien in langdurige opslag van koolstof in de terrestrische biosfeer, ondergronds of in de oceanen, zodat de opbouw van de CO₂-concentratie (het belangrijkste broeikasgas) in de atmosfeer zal verminderen of vertragen" en "het proces van het overbrengen van koolstofdioxide uit de atmosfeer naar de bodem via gewasresten en andere organische vaste stoffen en in een vorm die niet onmiddellijk wordt uitgestoten" (Elbasiouny et al., 2022).

Koolstofvastlegging kan dus volgens de drie onderzoeken aanzienlijk helpen bij het in stand houden van de natuurlijke koolstofcyclus. Daarom is het belangrijk dat deze praktijk goed geïmplementeerd wordt (Dhanwantri et al., 2014; Elbasiouny et al., 2022; Mehmood et al., 2020).

Powlson et al. (2011) benadrukken echter dat er ook beperkingen zijn met betrekking tot het toepassen van koolstofvastlegging als middel om de klimaatverandering te verhelpen. Ten eerste kan er slechts een beperkte hoeveelheid koolstof worden opgeslagen in de bodem. Ten tweede is het proces omkeerbaar. Indien de technieken van koolstofvastlegging niet blijvend worden toegepast, zal de uitstoot aan koolstofdioxide opnieuw stijgen. Ten derde zijn er nog andere vervuilende broeikasgassen naast koolstofdioxide. Het verminderen van de uitstoot aan koolstofdioxide wil dus niet noodzakelijk zeggen dat de klimaatverandering wordt verholpen, aangezien een hogere uitstoot aan andere broeikasgassen de klimaatverandering weer kan verergeren (Powlson, Whitmore, & Goulding, 2011).

7.3. Stikstofcyclus

Ongeveer 78 procent van de atmosfeer bestaat uit het kleurloze en geurloze element stikstof. Stikstof is dus het meest voorkomende element in de atmosfeer. Stikstof zit in de bodem, in planten, in water en in de lucht. Het element is essentieel voor al het leven op aarde, inclusief de mensheid. Stikstof is namelijk nodig voor onze voedselvoorziening, doordat het element belangrijk is voor plantengroei. Dit bevestigt Aczel (2019). Indien meststoffen met stikstof niet meer toegevoegd zouden worden aan de bodem, zou de mensheid volgens Aczel (2019) een derde van de gewassen verliezen die nodig zijn voor de voedselvoorziening en andere vormen van landbouw (Aczel, 2019).

Verder beschrijft Aczel (2019) hoe te weinig stikstof leidt tot problemen in de plantengroei, wat uiteindelijk leidt tot lage gewasopbrengsten. Te veel stikstof kan daarentegen giftig zijn voor planten en kan zelfs schadelijk zijn voor het milieu in het algemeen. Te veel stikstof kan namelijk water vervuilen en planten, dieren en mensen schaden. Het is dus zeer belangrijk om de juiste balans aan stikstof in de atmosfeer te behouden (Aczel, 2019).

Xiao et al. (2019) vertellen dat stikstof slechts beperkt beschikbaar is binnen de landbouw. Daarom zouden bodems continu aangevuld moeten worden met extra stikstof om de bodemvruchtbaarheid en bijgevolg de gewasopbrengsten te verbeteren. Dit komt overeen met het idee van Aczel (2019) dat te weinig stikstof leidt tot lage gewasopbrengsten en dat er een goede balans moet zijn van stikstof in de natuur (Xiao et al., 2019).

Het overtollige stikstof kan volgens Aczel (2019) wegspoelen naar waterbronnen in een diepere grondlaag en zich ophopen, wat leidt tot eutrofiëring. Eutrofiëring is een proces waarbij te veel stikstof in het water terechtkomt, waardoor het water kan verkleuren, het water verontreinigd kan worden en te veel planten en algen groeien. Deze algen worden in het water afgebroken door microben. Hierdoor wordt de hoeveelheid zuurstof in het water verminderd, wat het moeilijk maakt voor organismen om hier te overleven (Aczel, 2019).

Xiao et al. (2019) bevestigen de hypothese van Aczel (2019) dat stikstofuitspoeling in de bodem kan leiden tot eutrofiëring en grondwaterverontreiniging. Daarnaast vertellen Xiao et al. (2019) dat het vervuilde water kan leiden tot luchtverontreiniging, bijvoorbeeld in de vorm van zure regen. Deze verontreiniging kan de opwarming van de aarde verergeren. Hierdoor is het belangrijk om met milieuvriendelijke strategieën de stikstofuitspoeling en dus de eutrofiëring te verminderen (Xiao et al., 2019).

Eutrofiëring kan volgens Aczel (2019) op meerdere manieren verholpen worden. Ten eerste kan het overtollige stikstof weggeleid worden. Ten tweede kunnen chemicaliën worden gebruikt om de algenbloei te stoppen. Ten derde kunnen meststoffen gebruikt worden die minder stikstof bevatten. Ten vierde kan gebruik worden gemaakt van bioremediatie, waarbij bijvoorbeeld organismen die de overtollige algen opeten in het water worden gedaan. Het kan echter vaak moeilijk zijn om te achterhalen wat de reden is voor het overtollige stikstof (Aczel, 2019).

Aczel (2019) vertelt verder ook dat stikstof beweegt in een cyclus van de atmosfeer naar de aarde, door de bodem en uiteindelijk van de bodem terug naar de atmosfeer. Hierbij beweegt stikstof door de atmosfeer, de bodem, water, planten, dieren en bacteriën. Daarom moet stikstof van vorm

7. Literatuurstudie

veranderen doorheen de cyclus. Deze cyclus wordt de stikstofcyclus genoemd. Het begrijpen van deze cyclus kan helpen bij het telen van gezonde gewassen en het beschermen van het milieu (Aczel, 2019).

Volgens de onderzoeken van Aczel (2019) en van Egamberdieva (2011) bevat de stikstofcyclus vijf stappen: fixatie, mineralisatie, nitrificatie, immobilisatie en denitrificatie. Fixatie, ook wel vervluchtiging genoemd, is de fase waarin stikstof van de atmosfeer beweegt naar de bodem. Tijdens dit proces wordt het gasvormige stikstof door bacteriën omgezet naar een andere vorm die wel opgenomen kan worden door de wortels van planten, waardoor planten kunnen groeien. De bacteriën hechten zich aan de planten en krijgen via fotosynthese energie van de planten. Naast de natuurlijke fixatie, wat het meeste voorkomt, kan stikstof ook worden gefixeerd via het industriële proces dat kunstmest maakt (Aczel, 2019; Egamberdieva Difuza, 2011).

Naast de bacteriën die zich hechten aan de wortels van planten zijn er ook microben die in de bodem leven zonder zich aan planten te hechten. Mineralisatie is de fase waarin deze microben stikstof gaan omzetten van een organische vorm, zoals mest of plantaardig materiaal, naar een anorganische vorm. Bij de nitrificatie fase wordt het resultaat van de mineralisatie fase verder omgezet naar een vorm die door planten opgenomen kan worden. In tegenstelling tot de fixatie fase spelen zowel de mineralisatie fase als de nitrificatie fase zich volledig af binnen de bodem (Aczel, 2019; Egamberdieva Difuza, 2011).

De immobilisatie fase is het omgekeerde van de mineralisatie fase. Bij immobilisatie halen de micro-organismen die in de bodem leven stikstof uit de bodem. Deze stikstof wordt als energiebron gebruikt door de micro-organismen. Immobilisatie en mineralisatie houden samen de hoeveelheid stikstof in de bodem in balans (Aczel, 2019; Egamberdieva Difuza, 2011).

Bij denitrificatie keert de stikstof uit de bodem terug naar de atmosfeer. Hierbij wordt stikstof terug omgezet naar een gasvormige toestand. Na deze fase begint de fixatie fase opnieuw. Deze cyclus blijft zichzelf herhalen (Aczel, 2019; Egamberdieva Difuza, 2011).

De stikstofkringloop is dus cruciaal voor het behoud van productieve en gezonde bodemecosystemen. Het begrijpen van de stikstofcyclus zorgt ervoor dat betere beslissingen genomen kunnen worden over welke gewassen op welke locaties best worden verbouwd om over voldoende voedsel te kunnen beschikken (Aczel, 2019).

7.4. Biochar

International Biochar Initiative (2015) beschrijft biochar als “een vaste stof die wordt verkregen door de thermochemische omzetting van biomassa in een zuurstofarme omgeving”. De meeste onderzoeken gebruiken deze definitie voor biochar. Weber en Quicker (2018) beschrijven biochar op een gelijkaardige manier, maar zij benadrukken dat biochar koolstofrijk is en dat de thermochemische omzetting verwijst naar pyrolyse (International Biochar Initiative, 2015; Weber & Quicker, 2018).

Volgens Clough en Condon (2010) creëert de thermische ontleding of pyrolyse van biomassa niet alleen biochar, maar ook hernieuwbare energie in de vorm van warmte en gassen. De vorming van biochar is gelijkaardig aan de vorming van houtskool, maar in tegenstelling tot houtskool wordt biochar geproduceerd met als doel om het aan te brengen op de bodem (Clough & Condon, 2010).

Weber en Quicker (2018) beschrijven pyrolyse als de thermochemische ontleding van een brandstof bij verhoogde temperaturen en zonder toevoeging van externe zuurstof. De hoeveelheid aan product dat verkregen wordt uit de pyrolyse van biomassa is afhankelijk van de procesomstandigheden, zoals temperatuur en tijd. Het doel van snelle pyrolyse is de productie van vloeibare olie, daarom wordt bij de productie van biochar trage pyrolyse gebruikt (Weber & Quicker, 2018).

Voor trage pyrolyse worden gewoonlijk temperaturen gebruikt rond de 500°C, maar deze kunnen variëren naargelang de gewenste producteigenschappen. Wanneer een zeer hoog koolstofgehalte gewenst is van meer dan 95%, kunnen temperaturen van bijna 1000°C vereist zijn. Deze hoge temperaturen zijn geen probleem wanneer houtachtige grondstoffen worden gebruikt voor het creëren van biochar. Bij niet-houtachtige grondstoffen kunnen de hoge temperaturen wel problemen vormen (Weber & Quicker, 2018).

Volgens het onderzoek van Scott et al. (2014) kan er een onderscheid worden gemaakt tussen biochar op basis van plantaardige grondstoffen en biochar op basis van dierlijke grondstoffen. Plantaardige biochar heeft een hoger koolstofpercentage dan dierlijke biochar. Zo heeft biochar op basis van hout bijvoorbeeld een hoger koolstofpercentage dan biochar op basis van meststoffen van pluimvee of van koeien. Plantaardige biochar heeft echter minder beschikbare voedingsstoffen dan dierlijke grondstoffen. Hierdoor zou dierlijke biochar voor meer gewasopbrengsten zorgen. Zo heeft biochar op basis van gras en bladeren meer beschikbare voedingsstoffen dan biochar op basis van hout, maar minder dan dierlijke biochar. Dit verschil tussen plantaardige biochar en dierlijke biochar wordt bevestigd door het onderzoek van Blanco-Canqui (2021) (Blanco-Canqui, 2021; Scott, Ponsonby, & Atkinson, 2014).

Volgens Clough en Condon (2010) helpt biochar bij de koolstofvastlegging, doordat biochar voedingsstoffen beter vast kan houden dan andere vormen van organisch materiaal. Daarnaast kan biochar de bodemkwaliteit verbeteren en de uitstoot van milieuverontreinigende stoffen verminderen (Clough & Condon, 2010). Dit wordt bevestigd door Weber en Quicker (2018). Weber en Quicker (2018) vertellen verder nog dat biochar een product is dat al duizenden jaren geproduceerd wordt en zeer diverse toepassingen heeft. Naast de eerder vermelde toepassingen kan biochar onder andere gebruikt worden voor de productie van warmte, als bouw materiaal en voor medische doeleinden (Weber & Quicker, 2018).

7. Literatuurstudie

Ook het onderzoek van Jha et al. (2010) bevestigt dat biochar helpt bij een langdurige koolstofvastlegging in de bodem, doordat biochar een lange gemiddelde verblijftijd heeft in de bodem en een lage afbraaksnelheid. Biochar verblijft namelijk gemiddeld meer dan honderd jaar lang in de bodem. Het wordt bevestigd dat biochar zorgt voor een vruchtbaardere bodem en verminderde emissies. Biochar zorgt volgens Jha et al. (2010) voor een hogere waterretentie en een hogere beschikbaarheid aan voedingsstoffen in de bodem. In combinatie met kunstmest kan biochar de gewasopbrengsten zelfs doen stijgen met 45% tot 250% (Jha, Biswas, Lakaria, & Rao, 2010).

Het onderzoek van Arif et al. (2020) bevestigt dat biochar wordt gebruikt voor het behoud van de bodem en het milieu en het bevorderen van de gezondheid hiervan. Eigenschappen van biochar die hierbij helpen, zijn het vermogen om water vast te houden en de bestandheid tegen elke vorm van fysische, chemische en biologische afbraak. Arif et al. (2020) bevestigen dat biochar helpt bij de koolstofvastlegging, wat in dit onderzoek wordt beschreven als het proces waarbij het uitstoten van koolstof in de atmosfeer wordt voorkomen door de koolstof op te vangen en langdurig op te slaan in de bodem. Biochar heeft het vermogen om twintig procent van de totale koolstofbiomassa vast te leggen in de bodem. Daarnaast helpt biochar ook bij de productie van hernieuwbare energie (Arif et al., 2020).

Het onderzoek van Hurtado et al. (2017) bevestigt dat biochar helpt bij de koolstofvastlegging, dat biochar de capaciteit van de bodem om water vast te houden verhoogt en dat biochar de uitspoeling van nutriënten verlaagt (Hurtado et al., 2017). Het onderzoek van Bandara et al. (2017) legt uit dat biochar zorgt voor een betere plantengroei, voornamelijk door het verhogen van de retentie van voedingsstoffen in de bodem (Bandara et al., 2017).

Clough en Condrón (2010) leggen uit dat het toevoegen van biochar aan de bodem helpt bij de koolstofvastlegging binnen de koolstofcyclus, maar dat biochar ook de stikstofcyclus beïnvloedt. Biochar heeft namelijk het vermogen om de snelheden van stikstofcycli in de bodem te manipuleren door de snelheden van de nitrificatie fase te beïnvloeden. Ook zou biochar kunnen helpen bij het vasthouden van stikstof in de bodem en bij de fixatie fase in de stikstofcyclus. Daarnaast zou biochar stikstofuitspoeling kunnen verminderen. Dit wordt bevestigd door het onderzoek van Scott et al. (2014) (Clough & Condrón, 2010; Scott et al., 2014).

Het onderzoek van Blanco-Canqui (2021) bevestigt dat biochar zorgt voor meer koolstofvastlegging, voor minder stikstofuitspoeling en voor meer gewasopbrengsten (Blanco-Canqui, 2021). Dit zijn de drie verbanden met biochar die gewaardeerd worden in dit onderzoek.

8. Methode

Voor het zoeken naar literatuur over waarderingsmethoden of literatuur met de nodige economische cijfers werd eenzelfde methode toegepast als bij het selecteren van literatuur voor de literatuurstudie. Dezelfde zoektermen werden opnieuw gebruikt samen met nieuwe zoektermen, zoals cost, price, market pricing method/approach, damage cost method/approach en abatement cost method/approach. De literatuur is gepubliceerd tussen 2010 en 2023.

8.1. Waarderingsmethoden

Aan de hand van de rapporten van Jónsson en Davíðsdóttir (2016) en Denant-Boemont en Hammiche (2019) worden drie waarderingsmethoden hieronder beschreven.

8.1.1. Marktprijsmethode

De marktprijsmethode is een waarderingsmethode waarbij wordt gebruikgemaakt van marktprijzen om een monetaire waarde toe te kennen aan ecosysteemdiensten. Zo kunnen gewasopbrengsten worden gewaardeerd aan de hand van de verkoopprijzen op de gerelateerde markten. De verkoopprijzen van de gewassen worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden om de baten te verkrijgen. Om de kosten te verkrijgen, wordt de gebruikte hoeveelheid biochar met de eenheidskost van biochar vermenigvuldigd. Indien de baten die biochar oplevert hoger zijn dan de kosten van biochar, heeft biochar een positief effect op gewasopbrengsten (Jónsson & Davíðsdóttir, 2016).

8.1.2. Schadekostmethode

De schadekostmethode is een waarderingsmethode waarbij een monetaire waarde wordt toegekend aan bijvoorbeeld vervuiling door gebruik te maken van de kosten die deze vervuiling veroorzaken. Als de vervuiling zou stijgen, zou de monetaire waarde ook stijgen. Voor de koolstofvastlegging wordt de eenheidskost van CO₂-emissies vermenigvuldigd met de hoeveelheid aan CO₂-emissies. De baat is de vermindering in schadekosten die biochar oplevert. Om de kosten te berekenen, wordt opnieuw de eenheidskost van biochar vermenigvuldigd met de gebruikte hoeveelheid biochar. Indien de kost van biochar lager is dan de baat die biochar oplevert, heeft biochar een positief effect op de koolstofvastlegging. Een analoge werkwijze wordt toegepast bij de stikstofuitspoeling (Denant-Boemont & Hammiche, 2019).

8.1.3. Reductiekostmethode

De reductiekostmethode is een waarderingsmethode die vergelijkbaar is met de schadekostmethode. Deze derde waarderingsmethode wordt ook toegepast bij bijvoorbeeld vervuiling, maar bij deze methode wordt gebruikgemaakt van de kosten om de vervuiling te vermijden in plaats van de kosten van de vervuiling zelf. Als meer maatregelen zouden worden ondernomen om de vervuiling tegen te gaan, dan zou de monetaire waarde stijgen. In dit onderzoek wordt de reductiekostmethode niet toegepast. Zowel voor de koolstofvastlegging als voor de stikstofuitspoeling wordt gekozen voor de schadekostmethode (Denant-Boemont & Hammiche, 2019).

8.2. Beschrijving van de cases

Aangezien er veel studies beschikbaar zijn en het een tijdrovend werk zou zijn om deze allemaal te verwerken, wordt binnen dit onderzoek gebruikgemaakt van specifieke cases. Er worden in totaal zes cases onderzocht. Cases 1 en 2 gaan over het effect van biochar op koolstofvastlegging. Cases 3 en 4 gaan over het effect van biochar op stikstofuitspoeling. Cases 5 en 6 gaan over het effect van biochar op gewasopbrengsten. Hierbij zijn cases 1, 3 en 5 veldexperimenten, terwijl cases 2, 4 en 6 laboratoriumexperimenten zijn.

8.2.1. Koolstofvastlegging

8.2.1.1. Case 1: Veldexperiment (China)

In de eerste case wordt het effect van biochar op koolstofvastlegging gewaardeerd aan de hand van het onderzoek van Yang et al. (2020) waarin een veldexperiment met maïsplanten wordt besproken dat plaatsvond in China in 2015 en 2016. Het experiment werd uitgevoerd in een droog klimaat op een zestig centimeter diepe bodem met zandige leem als bodemtextuur. De bodem bevatte 64 procent zand, 17 procent slib en 19 procent klei. Voor dit onderzoek werd gebruikgemaakt van biochar bestaande uit maïsresidu. De biochar werd geproduceerd aan de hand van een langzame, acht uur durende pyrolyse bij een temperatuur van vierhonderd tot vijfhonderd graden Celsius (Yang et al., 2020).

Aan de bodem werden verschillende hoeveelheden biochar toegevoegd op verschillende plaatsen. Zo kunnen er vier verschillende dosissen biochar onderscheiden worden: 0 ton per hectare, 15 ton per hectare, 30 ton per hectare en 45 ton per hectare. Deze hoeveelheden worden voorgesteld als B0, B15, B30 en B45. De B0 dosis werd toegevoegd ter controle. De B15, B30 en B45 dosissen werden drie keer herhaald. Biochar werd toegevoegd aan de bodem in mei 2015. In 2016 werd biochar niet opnieuw toegevoegd aan de bodem (Yang et al., 2020).

8.2.1.2. Case 2: Laboratoriumexperiment (China)

In de tweede case wordt het effect van biochar op koolstofvastlegging gewaardeerd aan de hand van het onderzoek van Lu en Zhang (2015) waarin een laboratoriumexperiment wordt besproken dat plaatsvond in China. Het experiment werd uitgevoerd op een twintig centimeter diepe bodem met zandige leem als bodemtextuur. De bodem bevatte 55 procent zand, 25 procent slib en 20 procent klei. Voor dit onderzoek werd gebruikgemaakt van biochar bestaande uit maïs. De biochar werd geproduceerd aan de hand van een langzame, dertien uur durende pyrolyse bij een temperatuur van tweehonderd graden Celsius dat doorheen het proces steeg tot vijfhonderd graden Celsius (Lu & Zhang, 2015).

Er werden vier verschillende behandelingen gekozen voor de bodem: geen behandeling ter controle, een behandeling met biochar, een behandeling met anorganische stikstof en een behandeling met zowel biochar als anorganische stikstof. Het experiment duurde dertig dagen, waarbij biochar werd toegevoegd aan vijftien ton per hectare en stikstof aan honderd milligram per kilogram bodem (Lu & Zhang, 2015).

8.2.2. Stikstofuitspoeling

8.2.2.1. Case 3: Veldexperiment (VSA)

In de derde case wordt het effect van biochar op stikstofuitspoeling gewaardeerd aan de hand van het onderzoek van Gao et al. (2022) waarin een veldexperiment met biochar uit de Verenigde Staten van Amerika wordt besproken. Het betreft een experiment dat twee jaar duurde. Hierbij werden tomaten geplant in 2018 en knoflook in 2019. Het experiment werd uitgevoerd op een bodem met een diepte van vijftig centimeter en met zandige leem als bodemtextuur. De bodem bevatte 58 procent zand, 33 procent slib en 9 procent klei. Voor dit onderzoek werd gebruikgemaakt van biochar bestaande uit amandelschillen (voorgesteld als AS) en geproduceerd aan de hand van een pyrolyse bij een temperatuur van 550 graden Celsius. Ook werd gebruikgemaakt van biochar bestaande uit zachte houtsoorten (voorgesteld als SW) en geproduceerd aan de hand van een pyrolyse bij een temperatuur van 540 graden Celsius (Gao et al., 2022).

Binnen dit experiment werden acht behandelingen toegepast. De eerste behandeling is de controle. Hierbij werd geen biochar of compost toegevoegd. Bij de tweede behandeling werd biochar gemaakt van amandelschillen toegevoegd aan 20 ton per hectare. Bij de derde behandeling werd biochar gemaakt van amandelschillen toegevoegd aan 40 ton per hectare. Bij de vierde behandeling werd biochar gemaakt van zachte houtsoorten toegevoegd aan 20 ton per hectare. Bij de vijfde behandeling werd biochar gemaakt van zachte houtsoorten toegevoegd aan 40 ton per hectare. Bij de zesde behandeling werd compost toegevoegd aan 20 ton per hectare. Bij de zevende behandeling werd compost toegevoegd aan 20 ton per hectare en biochar gemaakt van amandelschillen aan 20 ton per hectare. Bij de achtste behandeling werd compost toegevoegd aan 20 ton per hectare en biochar gemaakt van zachte houtsoorten aan 20 ton per hectare (Gao et al., 2022).

8.2.2.2. Case 4: Laboratoriumexperiment (Denemarken)

In de vierde case wordt het effect van biochar op stikstofuitspoeling gewaardeerd aan de hand van het onderzoek van Bruun et al. (2012) waarin een laboratoriumexperiment met biochar wordt besproken. Biochar werd hierbij toegevoegd aan 300 gram bodem, waarna deze mengeling werd verpakt in cilindrische aluminium containers. Het experiment werd uitgevoerd op een vijftientig centimeter diepe bodem met zandige leem als bodemtextuur. De bodem bevatte 49 procent fijn zand, 25 procent grof zand, 14 procent slib en 11 procent klei. Deze zandige leem werd verzameld op een landbouwveld in Denemarken (Bruun et al., 2012).

Binnen dit experiment werden drie verschillende soorten biochar op basis van tarwe gebruikt: biochar gemaakt via trage pyrolyse bij een temperatuur van 525 graden Celsius (weergegeven als SP-525), biochar gemaakt via snelle pyrolyse bij een temperatuur van 525 graden Celsius (weergegeven als FP-525) en biochar gemaakt via snelle pyrolyse bij een temperatuur van 550 graden Celsius (weergegeven als FP-550) (Bruun et al., 2012).

Er werden vier behandelingen toegepast binnen het experiment. De eerste behandeling bestond uit de controle. De tweede behandeling bestond uit 6 gram SP-525 biochar. De derde behandeling

bestond uit 6 gram FP-525 biochar. De vierde behandeling bestond uit 6 gram FP-550 biochar. Bij de vier behandelingen werd telkens nog meststof met stikstof toegevoegd aan 300 kilogram stikstof per hectare en bromide aan 21,4 milligram per container (Bruun et al., 2012).

8.2.3. Gewasopbrengsten

8.2.3.1. Case 5: Veldexperiment (Ghana)

In de vijfde case wordt het effect van biochar op gewasopbrengsten gewaardeerd aan de hand van het onderzoek van Frimpong et al. (2021) waarin een veldexperiment werd uitgevoerd in Ghana tijdens 2016 en 2017. Het experiment vond plaats op een twintig centimeter diepe bodem dat ongeveer zesduizend vierkante meter groot was en dat geclassificeerd werd als zandige leem met 80 procent zand, 12 procent slib en 8 procent klei. Het veld werd opgedeeld in acht delen voor acht behandelingen. Elk deel had een oppervlakte van 19,38 vierkante meter (Frimpong et al., 2021).

Er werden acht behandelingen toegepast, die vier keer werden herhaald: (1) geen behandeling ter controle, (2) een behandeling met biochar, (3) met compost, (4) met biochar en compost, (5) met NPK meststof, (6) met biochar en NPK meststof, (7) met compost en NPK meststof en (8) met biochar, compost en NPK meststof (Frimpong et al., 2021).

Teeltseizoen 1 duurde van eind maart tot juli 2016. In deze periode werd maïs verbouwd. Van september tot begin december 2016 werd okra geteeld. Dit wordt teeltseizoen 2 genoemd. Van begin april tot half december 2017 werd cassave verbouwd. Dit is teeltseizoen 3 (Frimpong et al., 2021).

De gebruikte biochar werd gemaakt van maïs via een twee uur durende pyrolyse bij een temperatuur van ongeveer 450 graden Celsius. Biochar werd telkens aan tien ton per hectare toegevoegd, maar werd enkel toegevoegd in het eerste teeltseizoen en dus niet in teeltseizoen 2 of 3. Compost werd ook aan tien ton per hectare toegevoegd, maar ook niet in teeltseizoen 2 (Frimpong et al., 2021).

De NPK meststof werd in teeltseizoen 1 toegevoegd aan honderd kilogram stikstof (N) per hectare, zestig kilogram fosfor (P) per hectare en zestig kilogram kalium (K) per hectare. Tijdens teeltseizoen 2 werd geen NPK meststof toegevoegd. Tijdens teeltseizoen 3 werd opnieuw NPK meststof toegevoegd, maar deze keer met tachtig kilogram kalium (K) per hectare (Frimpong et al., 2021).

8.2.3.2. Case 6: Laboratoriumexperiment (Pakistan)

In de zesde case wordt het effect van biochar op gewasopbrengsten gewaardeerd aan de hand van het onderzoek van Ahmad et al. (2020) waarin een laboratoriumexperiment werd uitgevoerd in Pakistan. Het experiment vond plaats op een vijftien centimeter diepe bodem met zandige leem als bodemtextuur. Elke pot binnen dit experiment bevatte acht kilogram bodem. De verschillende soorten biochar die werden gebruikt binnen dit onderzoek werden geproduceerd aan de hand van een pyrolyse bij een temperatuur van 450 graden Celsius (Ahmad et al., 2020).

Er werden zeven verschillende behandelingen gehanteerd voor graan waarbij de zaden niet werden geïnoculeerd. Ook werden dezelfde zeven verschillende behandelingen gehanteerd voor graan waarbij de zaden wel werden geïnoculeerd. Inoculeren wil hierbij zeggen dat een bacterie werd toegevoegd aan de zaden voordat de zaden werden geplant in de potten. De eerste behandeling is de controle, waarbij geen biochar werd toegevoegd. Bij de tweede en derde behandeling werd biochar

8. Methode

gemaakt van Egyptische acacia (weergegeven als EA voor Egyptian acacia) toegevoegd aan respectievelijk 3,9 en 7,8 ton per hectare. Bij de vierde en vijfde behandeling werd biochar gemaakt van mest (weergegeven als FM voor farmyard manure) toegevoegd aan respectievelijk 3,9 en 7,8 ton per hectare. Bij de zesde en zevende behandeling werd biochar gemaakt van tarwe (weergegeven als WS voor wheat straw) toegevoegd aan respectievelijk 3,9 en 7,8 ton per hectare (Ahmad et al., 2020).

Binnen het onderzoek werd vermeld dat biochar werd toegevoegd aan 0,1 en 0,2 procent. Als wordt verondersteld dat de bulkdichtheid van de bodem 1.300 kilogram per kubieke meter bedraagt, dan is 0,1 procent gelijk aan 3,9 ton per hectare en dan is 0,2 procent gelijk aan 7,8 ton per hectare (M. Bekchanova, persoonlijke communicatie, 24 april 2023).

Tabel 1 toont een samenvatting van de beschrijvingen van de cases. Zo worden de eigenschappen van de bodem en van de gebruikte biochar voor elke case weergegeven.

Tabel 1: Eigenschappen van bodem en biochar per case

Cases	Eigenschappen						
	Bodem					Biochar	
	Diepte	Textuur	Zand	Slib	Klei	Grondstof	Pyrolyse
1 ^a	60 cm	Zandige leem	64 %	17 %	19 %	Maïsresidu	400-500°C 8u durend
2 ^b	20 cm	Zandige leem	55 %	25 %	20 %	Maïs	200-500°C 13u durend
3 ^c	50 cm	Zandige leem	58 %	33 %	9 %	Amandelschillen Zachte houtsoorten	550°C 540°C
4 ^d	25 cm	Zandige leem	49 % fijn 25 % grof	14 %	11 %	Tarwe	525°C traag 525°C snel 550°C snel
5 ^e	20 cm	Zandige leem	80 %	12 %	8 %	Maïs	450°C 2u durend
6 ^f	15 cm	Zandige leem	Dit wordt niet vermeld in de paper.			Egyptische acacia Mest Tarwe	450°C

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van ^a (Yang et al., 2020), ^b (Lu & Zhang, 2015), ^c (Gao et al., 2022), ^d (Bruun et al., 2012), ^e (Frimpong et al., 2021) en ^f (Ahmad et al., 2020).

8.3. Assumptions

Onderstaande assumpties worden binnen dit onderzoek verondersteld. Deze assumpties worden samengevat in tabel 2. Tabel 3 toont voor elke case welke assumpties van toepassing zijn.

1. De eenheidsprijs van biochar uit het rapport van International Biochar Initiative (2014), namelijk 2,65 dollar per kilogram, is representatief genoeg om voor elke case gebruikt te worden. Volgens European Central Bank (2023) was 1 dollar in het jaar 2013 gemiddeld gelijk aan 0,7530 euro. Daarom wordt binnen dit onderzoek een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram biochar toegepast, want dit is het resultaat van $2,65 \times 0,7530$ (European Central Bank, 2023; International Biochar Initiative, 2014).
2. De schadekosten van CO₂-emissies uit het rapport van Matthey en Büniger (2020), namelijk 195 euro per ton, is representatief genoeg om voor case 1 en case 2 gebruikt te worden. Dit bedrag wordt gedeeld door 1.000 om euro per kilogram te krijgen. Binnen dit onderzoek wordt dus een bedrag van 0,195 euro per kilogram CO₂-emissies toegepast (Matthey & Büniger, 2020).
3. De schadekosten van stikstofuitspoeling uit het rapport van Matthey en Büniger (2020), namelijk 1,90 euro per kilogram, is representatief genoeg om voor case 3 en case 4 gebruikt te worden. Dit bedrag wordt dus toegepast binnen dit onderzoek (Matthey & Büniger, 2020).
4. De prijzen uit de 'Humanitarian Data Exchange' van de 'United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA)' (2022) zijn representatief genoeg om gebruikt te kunnen worden voor case 5 en case 6.
 - 4.1. Binnen case 5 worden de volgende prijzen toegepast: 202 dollar per ton maïs, 88,40 dollar per ton cassave en 685,10 dollar per ton okra. Volgens European Central Bank (2023) was 1 dollar in het jaar 2019 gemiddeld gelijk aan 0,8934 euro. Door de prijzen in dollar per ton te vermenigvuldigen met 0,8934 worden prijzen in euro per ton verkregen. Deze bedragen worden gedeeld door 1.000 om euro per kilogram te verkrijgen. Binnen deze case worden de volgende prijzen toegepast: 0,18047 euro per kilogram maïs, 0,7898 euro per kilogram cassave en 0,61207 euro per kilogram okra (European Central Bank, 2023; OCHA, 2022a).
 - 4.2. Binnen case 6 wordt voor graan een prijs toegepast van 286,30 dollar per ton. Volgens European Central Bank (2023) was 1 dollar in het jaar 2016 gemiddeld gelijk aan 0,9034 euro. Door de prijs in dollar per ton te vermenigvuldigen met 0,9034 wordt de prijs in euro per ton verkregen. Dit bedrag wordt gedeeld door 1.000 om euro per kilogram te verkrijgen. Binnen deze case wordt dus een prijs toegepast van 0,25864 euro per kilogram graan (European Central Bank, 2023; OCHA, 2022b).
5. Aangezien verschillende bronnen uit verschillende jaren worden gebruikt om de economische cijfers te verzamelen voor dit onderzoek, is het belangrijk om een discontovoet te gebruiken waarmee deze cijfers naar hetzelfde jaar omgezet kunnen worden. Er wordt verondersteld dat een discontovoet van tien procent representatief genoeg is, omdat deze volgens het onderzoek van Campos et al. (2015) wordt aangeraden door verschillende banken. Zo kan bijvoorbeeld een bedrag van 2010 omgezet worden naar een bedrag van 2015 door het initiële bedrag te vermenigvuldigen met de term $1,10^{jaren}$ waarbij *jaren* gelijk is aan 2015 – 2010 oftewel 5. Om een bedrag van 2015 om te zetten naar een bedrag van 2010 wordt het initiële bedrag gedeeld door dezelfde term (Campos, Serebrisky, & Suárez-Alemán, 2015).

8. Methode

Tabel 2: Assumpties binnen dit onderzoek

Assumptie	Producten	Kosten/prijzen		Jaartal
		Oorspronkelijk	Omgezet	
1.	Biochar	\$ 2,65 per kg ^a	€ 2 per kg	2013
2.	CO2-emissies	€ 195 per ton ^b	€ 0,195 per kg	2020
3.	Stikstofuitspoeling	€ 1,90 per kg ^b	€ 1,90 per kg	2020
4.	Maïs	\$ 202 per ton ^c	€ 0,18047 per kg	2019
5.	Cassave	\$ 88,40 per ton ^c	€ 0,7898 per kg	2019
6.	Okra	\$ 685,10 per ton ^c	€ 0,61207 per kg	2019
7.	Graan	\$ 286,30 per ton ^d	€ 0,25864 per kg	2016
8.	Discontovoet	10 procent ^e	10 procent	n.v.t.

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van ^a (European Central Bank, 2023; International Biochar Initiative, 2014), ^b (Matthey & Bünge, 2020), ^c (European Central Bank, 2023; OCHA, 2022a), ^d (European Central Bank, 2023; OCHA, 2022b) en ^e (Campos, Serebrisky, & Suárez-Alemán, 2015).

Tabel 3: Assumpties per case

Case	Assumpties							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
1.	X	X						X
2.	X	X						X
3.	X		X					X
4.	X		X					X
5.	X			X	X	X		X
6.	X						X	X

Opmerking: X'en geven aan dat de bijhorende assumptie wordt toegepast bij de bijhorende case.

9. Resultaten

9.1. Koolstofvastlegging

9.1.1. Case 1: Veldexperiment (China)

De resultaten van het onderzoek van Yang et al. (2020) worden getoond in tabel 4. De waargenomen hoeveelheden CO₂-emissies worden uitgedrukt in kilogram per hectare. Daarnaast wordt voor zowel 2015 als 2016 de procentuele afname in CO₂-emissies getoond, wat wil zeggen dat in procenten het verschil tussen de behandelingen met biochar en de controle B0 wordt uitgedrukt. De procentuele afname van 24,66% bij B15 in 2015 wordt dus berekend met de formule:

$$\frac{4038,7 - 5360,9}{5360,9} \times 100$$

De gebruikte hoeveelheden CO₂-emissies bij deze formule zijn 4.038,7 kilogram per hectare bij B15 in 2015 en 5.360,9 kilogram per hectare bij B0 in 2015. De procentuele afname van 24,66% bij B15 in 2015 geeft dus aan dat er 24,66% minder CO₂-emissies aanwezig zijn wanneer 15 ton biochar per hectare wordt toegevoegd aan de bodem dan wanneer 0 ton biochar per hectare wordt toegevoegd aan de bodem.

Tabel 4 toont duidelijk dat de toevoeging van biochar binnen deze case zorgt voor een vermindering aan CO₂-emissies. In 2015 is er nog geen duidelijk verband te zien tussen de dosis biochar en de grootte van de vermindering in CO₂-emissies. In 2016 is er wel een duidelijk verband te zien. Een jaar nadat de biochar werd toegevoegd aan de bodem, is duidelijk te zien dat een hogere dosis biochar zorgt voor een grotere vermindering in CO₂-emissies. Bij 15 ton per hectare is er een onmiddellijke vermindering van circa 25 procent, maar het effect van deze dosis wordt minder na verloop van tijd. Bij 30 ton per hectare en zeker bij 40 ton per hectare is het sterke effect van biochar pas later te zien. Opvallend is de vermindering van circa 41 procent bij 45 ton biochar per hectare in 2016, wat bijna het dubbele is van de circa 22 procent vermindering van CO-emissies bij 45 ton per hectare in 2015.

Tabel 4: CO₂-emissies in 2015 en 2016

Biochar	2015		2016	
B0	5.360,9 kg/ha	n.v.t.	4.924,0 kg/ha	n.v.t.
B15	4.038,7 kg/ha	– 24,66 %	3.975,6 kg/ha	– 19,26 %
B30	4.419,1 kg/ha	– 17,57 %	3.651,1 kg/ha	– 25,85 %
B45	4.174,7 kg/ha	– 22,13 %	2.924,9 kg/ha	– 40,60 %

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van (Yang et al., 2020).

Volgens de assumpties wordt verondersteld dat de schadekosten van CO₂-emissies 0,195 euro per kilogram bedragen. Dit bedrag dateert echter van 2020 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2015 en ook naar 2016. Door 0,195 euro per

9. Resultaten

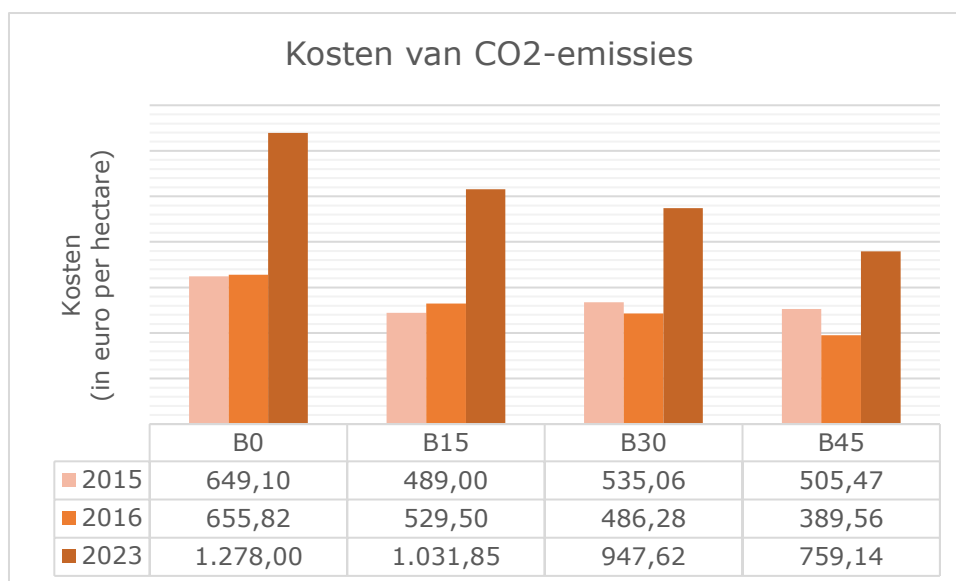
kilogram te delen door respectievelijk $1,10^5$ jaar en $1,10^4$ jaar worden de volgende bedragen verkregen: 0,12108 euro per kilogram voor 2015 en 0,13319 euro per kilogram voor 2016. Deze kosten worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden aan CO₂-emissies uit tabel 4 om de totale kosten aan CO₂-emissies te vinden in euro per hectare voor elke dosis biochar, wat weergegeven wordt in figuur 1. De totale kosten aan CO₂-emissies voor 2016 worden aan de hand van de discontovoet omgezet naar 2023. Zo worden de waarden uit 2016 vermenigvuldigd met $1,10^7$ jaar om de waarden in 2023 te verkrijgen. Ook van deze bewerking worden de resultaten getoond in figuur 1. Deze figuur toont dezelfde trend als tabel 4.

Om een duidelijker overzicht te hebben van het verschil tussen de behandelingen met biochar en de controle worden de totale kosten aan CO₂-emissies bij de controle verminderd met de totale kosten aan CO₂-emissies bij de biochar behandelingen. De resultaten hiervan worden getoond in figuur 2. Figuur 2 toont dus de kostenvoordelen van biochar, waarbij een positief bedrag betekent dat biochar voor een vermindering in de kosten zorgt. Opvallend is dat het voordeel van 518,86 euro per hectare bij B45 in 2023 meer dan het dubbele bedraagt van het voordeel bij B15 in 2023 dat slechts 246,15 euro per hectare bedraagt.

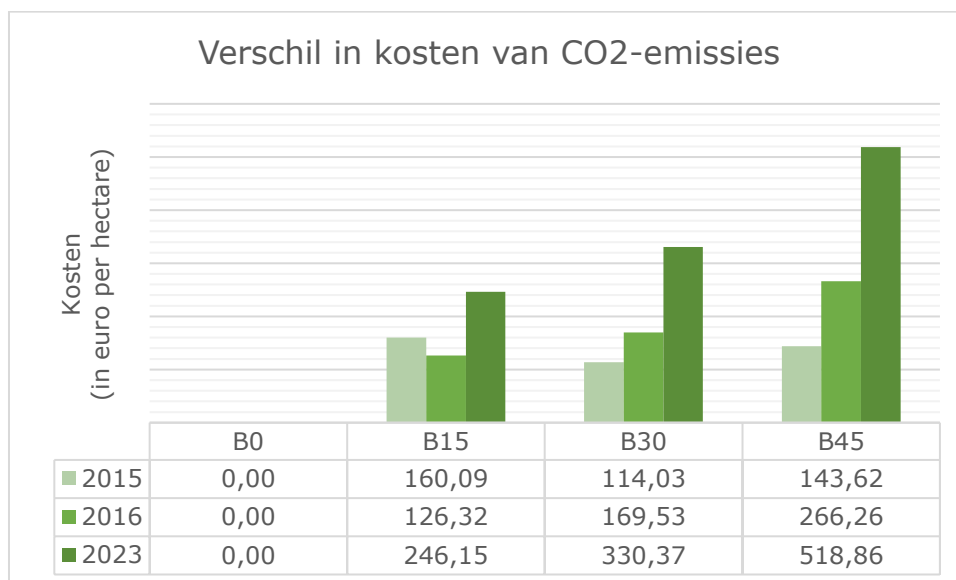
Zoals al vermeld werd bij de assumpties binnen dit onderzoek wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram toegepast. Dit bedrag dateert echter van 2013 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2015 en naar 2016. Door 2 euro per kilogram te vermenigvuldigen met $1,10^2$ jaar voor 2015 en met $1,10^3$ jaar voor 2016 wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2,42 euro per kilogram verkregen voor 2015 en 2,66 euro per kilogram voor 2016. Deze eenheidsprijzen worden vermenigvuldigd met 0 kilogram per hectare voor B0, 15.000 kilogram per hectare voor B15, 30.000 kilogram per hectare voor B30 en 45.000 kilogram per hectare voor B45. Het resultaat hiervan, de totale kosten van biochar in euro per hectare, wordt in figuur 3 getoond. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in 2016 biochar niet opnieuw aan de bodem werd toegevoegd. Biochar werd enkel in 2015 aan de bodem toegevoegd. Opnieuw worden de waarden van 2016 aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023 door de waarden van 2016 te vermenigvuldigen met $1,10^7$ jaar. Van deze bewerking worden de resultaten ook getoond in figuur 3.

Binnen deze case is dus duidelijk te zien dat meer biochar inderdaad zorgt voor een vermindering in CO₂-emissies en de kosten hiervan. Hierbij zorgt meer biochar voor grotere verminderingen en dus voor een grotere voordelen. Deze voordelen zijn echter niet genoeg om de kosten van biochar te compenseren. Zo is de kost van biochar bij B45 in 2023 van 233.436,82 euro per hectare bijna vijf keer groter dan het voordeel van biochar bij B45 in 2023 van 518,86 euro per hectare. Wel is het interessant om de relatie tussen biochar en CO₂-emissies verder te onderzoeken door de grote kostenvoordelen die biochar oplevert.

9. Resultaten

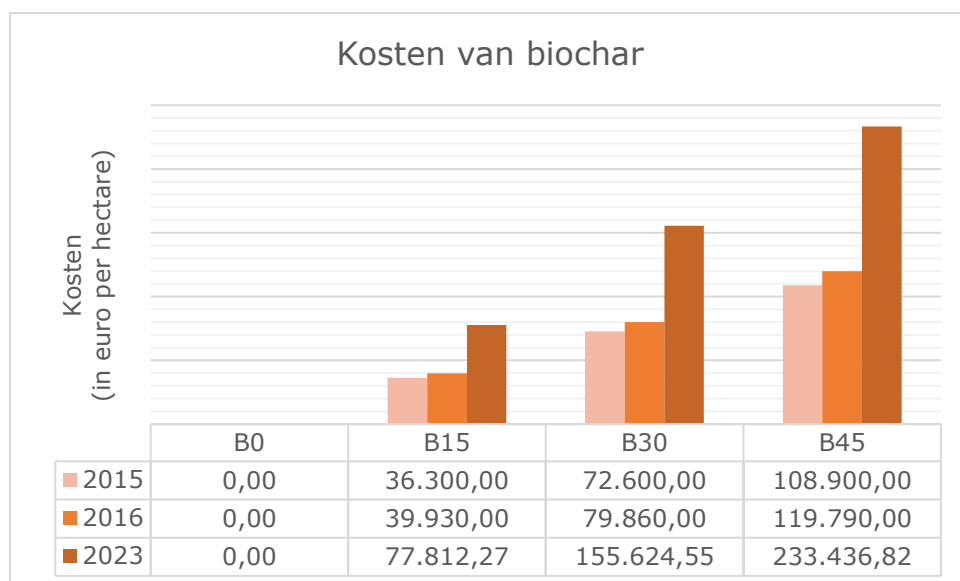


Figuur 1: Kosten van CO2-emissies (in euro per hectare) in 2015, 2016 en 2023



Figuur 2: Verschil in kosten van CO2-emissies (in euro per hectare) in 2015, 2016 en 2023

9. Resultaten



***Figuur 3:** Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2015, 2016 en 2023*

9.1.2. Case 2: Laboratoriumexperiment (China)

De resultaten van het onderzoek van Lu en Zhang (2015) worden getoond in tabel 5. De waargenomen CO₂-emissies in de case worden uitgedrukt in milligram koolstof per kilogram bodem. Deze waarden worden gedeeld door 1.000.000 om de waargenomen CO₂-emissies uitgedrukt in kilogram per kilogram bodem te verkrijgen. Een kilogram bodem is gelijk aan $\frac{1 \text{ kg}}{\text{bulkdichtheid} \times \text{diepte bodem} \times 10.000}$ hectare. De diepte van de bodem is in dit geval twintig centimeter. Er wordt een bulkdichtheid van de bodem verondersteld van 1.300 kilogram per kubieke meter, aangezien de bulkdichtheid van de bodem niet gegeven is in de case. Door de waargenomen CO₂-emissies te delen door het resultaat van $\frac{1 \text{ kg}}{1.300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,20 \text{ m} \times 10.000}$ worden de waargenomen CO₂-emissies in kilogram per hectare verkregen. Deze waarden worden dus in tabel 5 getoond (M. Bekchanova, persoonlijke communicatie, 24 april 2023).

Tabel 5 toont duidelijk dat de toevoeging van biochar voor een sterke vermindering in CO₂-emissies zorgt binnen deze case. Als naar de totale duur van het experiment wordt gekeken, dan zorgt biochar voor een vermindering in CO₂-emissies van 55,38 kilogram per hectare vergeleken met de controle, want dit is het resultaat van 250,12 kilogram per hectare bij de controle verminderd met 194,74 kilogram per hectare bij de biochar behandeling. Wanneer biochar met stikstof vergeleken wordt met de stikstof behandeling, dan is er een vermindering in CO₂-emissies van 90,74 kilogram per hectare bij de totale duur van het experiment, want dat is het resultaat van 340,60 kilogram per hectare bij de stikstof behandeling verminderd met de 249,86 kilogram per hectare bij de behandeling met biochar en stikstof.

Er kan opgemerkt worden dat de meeste CO₂-emissies werden uitgestoten gedurende de eerste periode van het experiment. De CO₂-emissies bij dag 0 tot dag 11 zijn namelijk veel groter dan de CO₂-emissies bij dag 11 tot dag 30.

Tabel 5: CO₂-emissies (in kg/ha) in 2015

Behandelingen	Totale duur	Dag 0 tot dag 11	Dag 11 tot dag 30
Controle	250,12	163,80	86,32
Stikstof	340,60	254,80	87,10
Biochar	194,74	117,00	77,74
Biochar + stikstof	249,86	178,36	71,50

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van (Lu & Zhang, 2015).

Volgens de assumpties wordt verondersteld dat de schadekosten van CO₂-emissies 0,195 euro per kilogram bedragen. Dit bedrag dateert echter van 2020 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2015. Door 0,195 euro per kilogram te delen door $1,10^5$ jaar wordt 0,12108 euro per kilogram verkregen voor 2015. Deze kost wordt dan vermenigvuldigd met de hoeveelheden aan CO₂-emissies uit de 'totale duur' kolom van tabel 5 om de totale kosten aan CO₂-emissies te vinden in euro per hectare voor elke behandeling, wat wordt

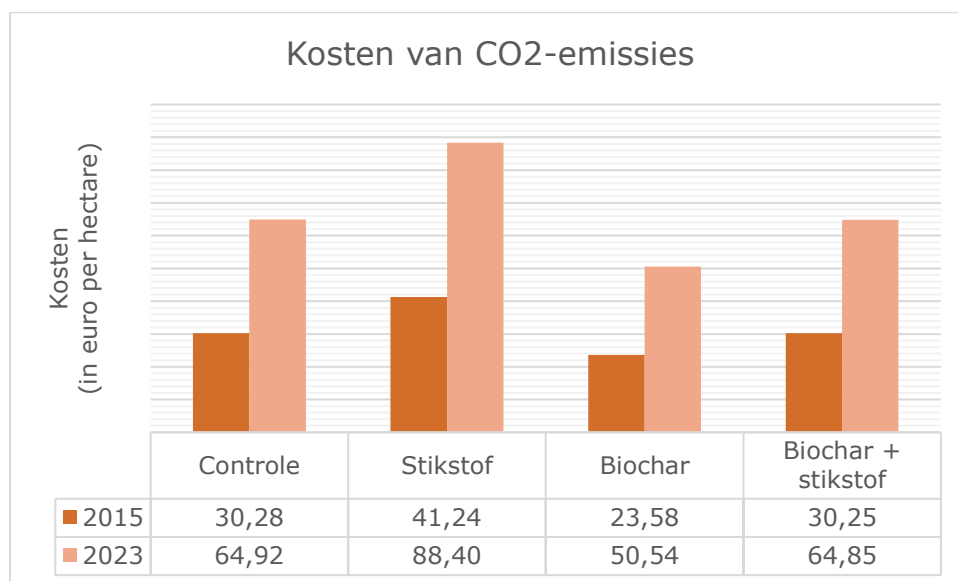
9. Resultaten

weergegeven in figuur 4. De totale kosten aan CO₂-emissies voor 2015 worden aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023. Zo worden de waarden uit 2015 vermenigvuldigd met $1,10^8$ jaar om de waarden in 2023 te verkrijgen. De resultaten hiervan worden ook getoond in figuur 4. Deze figuur toont dezelfde trend als tabel 5.

Om een duidelijker overzicht te hebben van het verschil tussen de behandelingen en de controle worden de totale kosten aan CO₂-emissies bij de controle verminderd met de totale kosten aan CO₂-emissies bij de biochar behandeling. Ook worden de totale kosten aan CO₂-emissies bij de stikstof behandeling verminderd met de totale kosten aan CO₂-emissies bij de behandeling met biochar en stikstof. De resultaten hiervan worden getoond in figuur 5. Figuur 5 toont dus de kostenvoordelen van biochar, waarbij een positief bedrag betekent dat biochar voor een vermindering in de kosten zorgt.

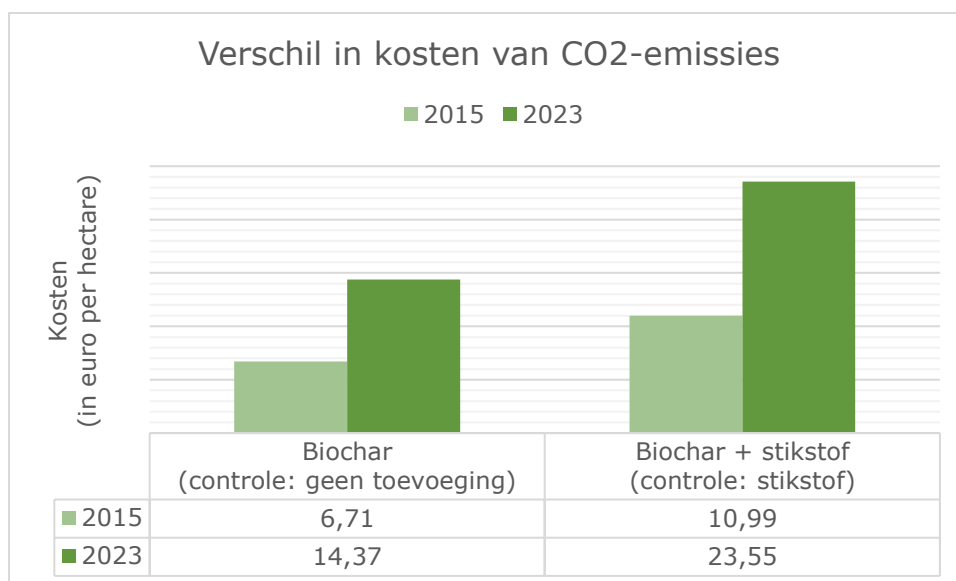
Zoals al vermeld werd bij de assumpties binnen dit onderzoek wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram toegepast. Dit bedrag dateert echter van 2013 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2015. Door 2 euro per kilogram te vermenigvuldigen met $1,10^2$ jaar voor 2015 wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2,42 euro per kilogram verkregen voor 2015. Deze eenheidsprijs wordt vermenigvuldigd met 0 kilogram per hectare voor de controle en de stikstofbehandeling en met 15.000 kilogram per hectare voor de twee behandelingen met biochar. Het resultaat hiervan, de totale kosten van biochar, wordt in figuur 6 getoond. Opnieuw worden de waarden van 2015 aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023 door de waarden van 2015 te vermenigvuldigen met $1,10^7$ jaar. Van deze bewerking worden de resultaten ook getoond in figuur 6.

Deze case toont dat biochar zorgt voor een sterke vermindering in de CO₂-emissies en de kosten hiervan, maar de kosten van biochar zijn groter dan de voordelen van biochar. Zoals al vermeld werd bij case 1 is het echter wel interessant om de relatie tussen biochar en CO₂-emissies verder te onderzoeken, aangezien ook case 2 aantoont dat biochar voor grote kostenvoordelen zorgt.

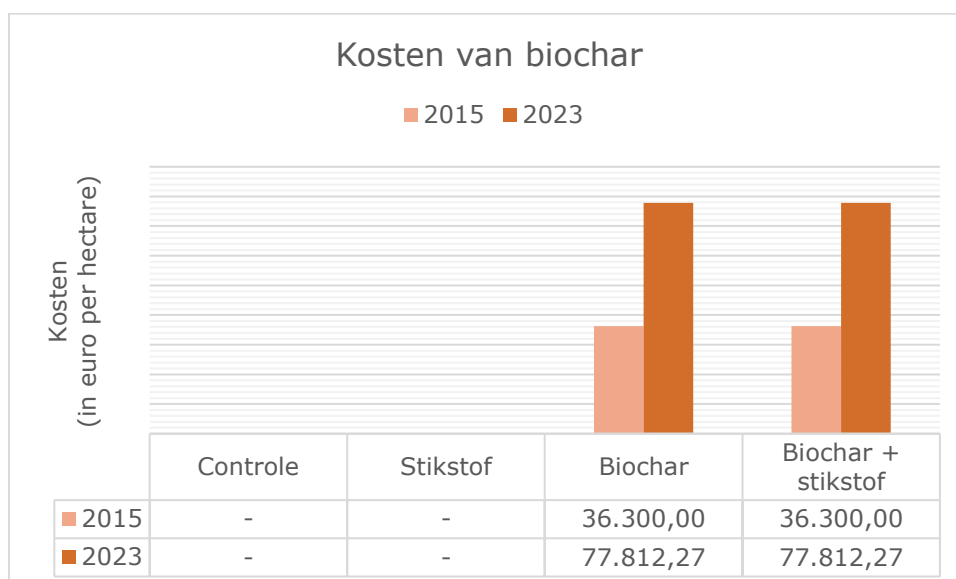


Figuur 4: Kosten van CO₂-emissies (in euro per hectare) in 2015 en 2023

9. Resultaten



Figuur 5: Verschil in kosten van CO₂-emissies (in euro per hectare) in 2015 en 2023



Figuur 6: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2015 en 2023

9.2. Stikstofuitspoeling

9.2.1. Case 3: Veldexperiment (VSA)

De resultaten van het onderzoek van Gao et al. (2022) worden getoond in tabel 6. De waargenomen hoeveelheden stikstofuitspoeling worden uitgedrukt in kilogram per hectare. Tabel 6 toont geen duidelijk verschil aan tussen de behandelingen met biochar en de behandelingen zonder biochar.

In 2018 zorgen alle vier de behandelingen met enkel biochar voor meer stikstofuitspoeling dan de controle. Hierbij zou de controle met 60,50 kilogram per hectare zorgen voor de minste stikstofuitspoeling. Wanneer compost gecombineerd met biochar vergeleken wordt met de behandeling met enkel compost, dan valt op dat biochar van amandelschillen zorgt voor minder stikstofuitspoeling, terwijl biochar van zachte houtsoorten zorgt voor meer stikstofuitspoeling. Hierbij zorgt de behandeling met compost en biochar van amandelschillen voor de minste stikstofuitspoeling met 51,60 kilogram per hectare.

In 2019 zorgen de behandelingen met biochar van amandelschillen vergeleken met de controle voor een stijging in stikstofuitspoeling. Bij de behandelingen met biochar van zachte houtsoorten zorgt enkel veertig ton biochar per hectare voor een daling in stikstofuitspoeling vergeleken met de controle. Deze behandeling heeft dus de minste stikstofuitspoeling met 48,40 kilogram per hectare. Wanneer de combinatie van compost met biochar vergeleken wordt met de behandeling met enkel compost, dan valt op dat beide combinaties voor een daling in stikstofuitspoeling zorgen. Hierbij zorgt de combinatie van compost met biochar van zachte houtsoorten voor de minste stikstofuitspoeling met 54,30 kilogram per hectare.

Tabel 6: Stikstofuitspoeling (in kg/ha) in 2018 en 2019

Behandelingen	2018	2019
Controle	60,50	54,30
AS biochar 20	62,50	68,40
AS biochar 40	69,60	100,10
SW biochar 20	73,60	57,50
SW biochar 40	69,40	48,40
Compost 20	52,40	88,70
Compost 20 + AS 20	51,60	68,40
Compost 20 + SW 20	55,00	54,30

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van (Gao et al., 2022).

Volgens de assumpties wordt verondersteld dat de schadekosten van stikstofuitspoeling 1,90 euro per kilogram bedragen. Dit bedrag dateert echter van 2020 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2018 en ook naar 2019. Door 1,90 euro per

9. Resultaten

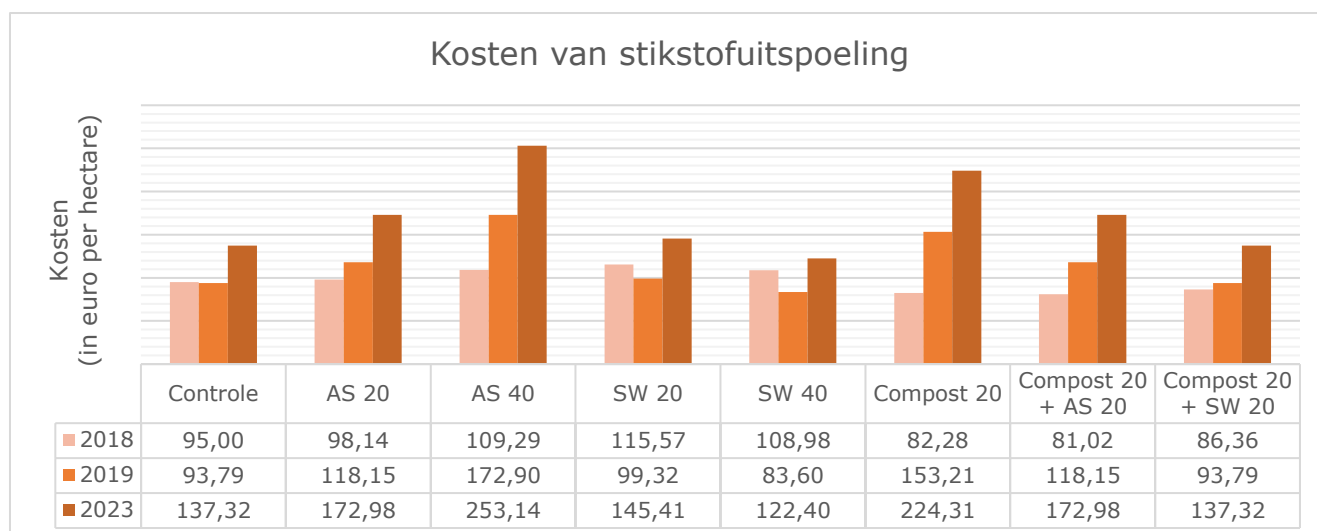
kilogram te delen door respectievelijk $1,10^2$ jaar en $1,10^1$ jaar worden de volgende bedragen verkregen: 1,57 euro per kilogram voor 2018 en 1,73 euro per kilogram voor 2019. Deze kosten worden met de hoeveelheden stikstofuitspoeling uit tabel 6 vermenigvuldigd om de totale kosten aan stikstofuitspoeling in euro per hectare te vinden voor elke behandeling, wat weergegeven wordt in figuur 7. De totale kosten aan stikstofuitspoeling voor 2019 worden aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023. Zo worden de waarden uit 2019 vermenigvuldigd met $1,10^4$ jaar om de waarden in 2023 te verkrijgen. Ook van deze bewerking worden de resultaten getoond in figuur 7. Deze figuur toont dezelfde trend als tabel 6. Er is wel een verschil bij de laatste behandeling, hierbij stijgt de kost van stikstofuitspoeling namelijk van 2018 naar 2019, terwijl de hoeveelheid stikstofuitspoeling daalt voor de combinatie van 20 ton compost per hectare en 20 ton biochar gemaakt van zachte houtsoorten per hectare.

Om een duidelijker overzicht te hebben van het verschil tussen de behandelingen en de controle worden de totale kosten aan stikstofuitspoeling bij de controle verminderd met de totale kosten aan stikstofuitspoeling bij de verschillende biochar behandelingen. Ook worden de totale kosten aan stikstofuitspoeling bij de behandeling met enkel compost verminderd met de totale kosten aan stikstofuitspoeling bij de combinaties van compost en de twee soorten biochar. De resultaten hiervan worden getoond in figuur 8. Figuur 8 toont dus de kostenvoordelen van biochar, waarbij een positief bedrag betekent dat biochar voor een vermindering in de kosten zorgt.

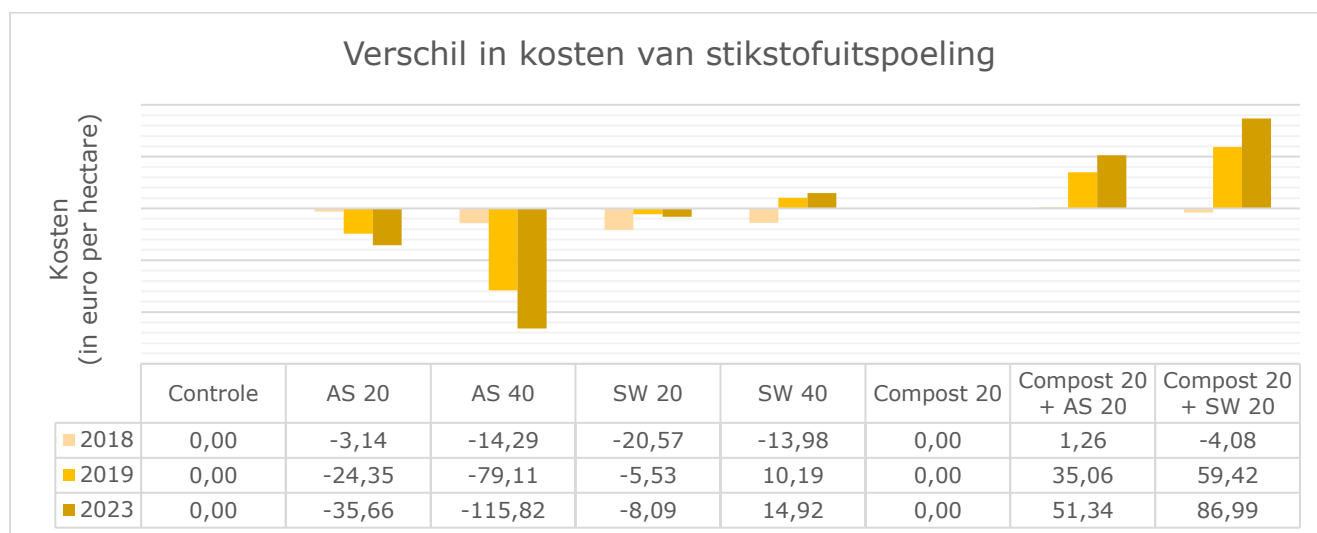
Zoals al vermeld werd bij de assumpties binnen dit onderzoek wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram toegepast. Dit bedrag dateert echter van 2013 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2018 en 2019. Door 2 euro per kilogram te vermenigvuldigen met $1,10^5$ jaar voor 2018 en $1,10^6$ jaar voor 2019 wordt voor biochar een eenheidsprijs van 3,22 euro per kilogram verkregen voor 2018 en 3,54 euro per kilogram voor 2019. Deze eenheidsprijzen worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden gebruikte biochar om de totale kosten aan biochar te verkrijgen in euro per hectare. Deze kosten worden getoond in figuur 9 voor biochar gemaakt van amandelschillen en figuur 10 voor biochar gemaakt van zachte houtsoorten. Opnieuw worden de waarden van 2019 aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023 door de waarden van 2019 te vermenigvuldigen met $1,10^4$ jaar. Van deze bewerking worden de resultaten ook getoond in figuren 9 en 10.

Binnen deze case is er geen duidelijk verband te zien tussen de kosten van stikstofuitspoeling en het gebruik van biochar. Er is dus geen duidelijke vermindering in stikstofuitspoeling bij het gebruik van biochar. Ook zijn er hoge kosten aan biochar. Wel kan opgemerkt worden dat biochar gecombineerd met compost voor een voordeel zorgt ten opzichte van de behandeling met enkel compost.

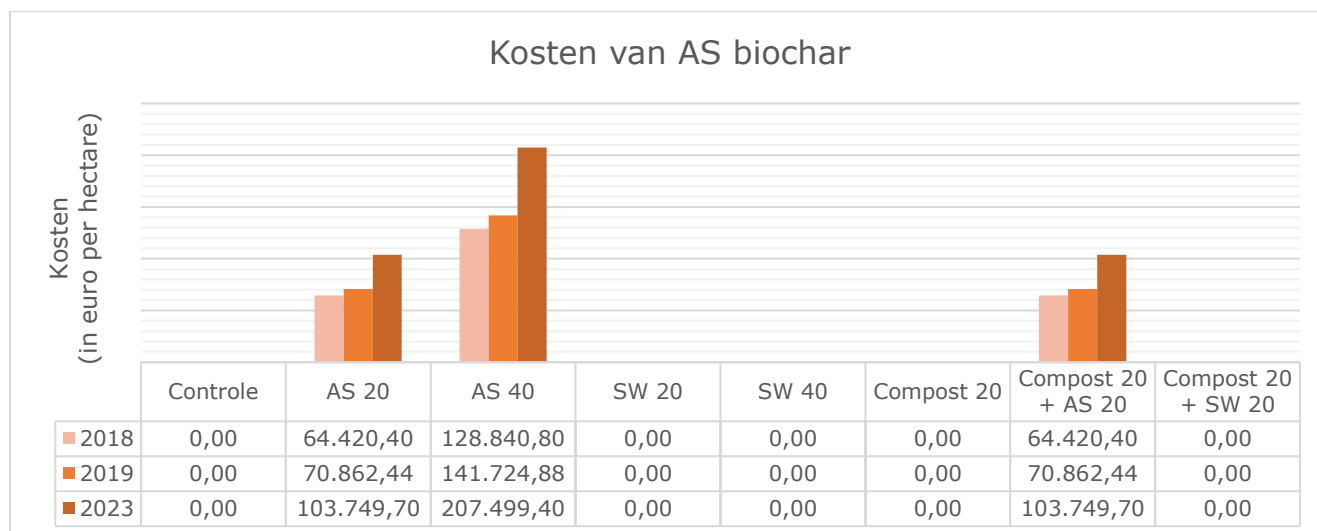
9. Resultaten



Figuur 7: Kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023

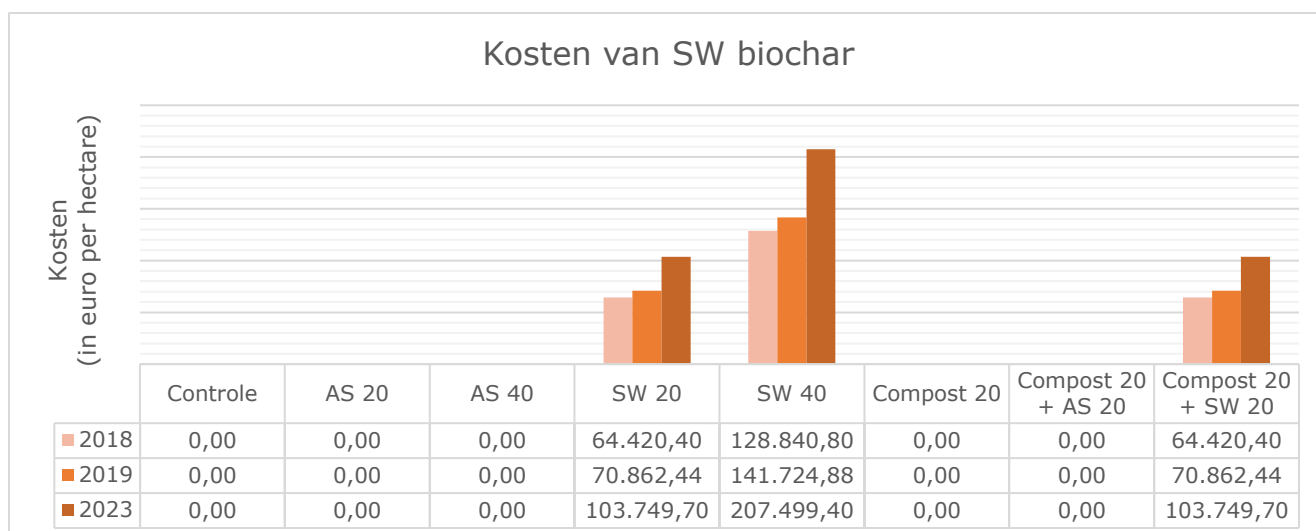


Figuur 8: Verschil in kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023



Figuur 9: Kosten van AS biochar (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023

9. Resultaten



***Figuur 10:** Kosten van SW biochar (in euro per hectare) in 2018, 2019 en 2023*

9.2.2. Case 4: Laboratoriumexperiment (Denemarken)

De resultaten van het onderzoek van Bruun et al. (2012) worden getoond in tabel 7. De waargenomen hoeveelheden stikstofuitspoeling worden uitgedrukt in milligram per driehonderd gram bodem. Deze waarden worden gedeeld door 1.000.000 om de waargenomen stikstofuitspoeling uitgedrukt in kilogram per driehonderd gram bodem te verkrijgen. Deze waarden worden gedeeld door 1.000/300 om de waarden in kilogram per kilogram bodem te verkrijgen. Een kilogram bodem is gelijk aan $\frac{1 \text{ kg}}{\text{bulkdichtheid} \times \text{diepte bodem} \times 10.000}$ hectare. De diepte van de bodem is in dit geval vijftientig centimeter. Er wordt een bulkdichtheid van de bodem verondersteld van 1.300 kilogram per kubieke meter, aangezien de bulkdichtheid van de bodem niet gegeven is in de case. Door de waargenomen hoeveelheden stikstofuitspoeling te delen door het resultaat van $\frac{1 \text{ kg}}{1.300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,25 \text{ m} \times 10.000}$ worden de waargenomen hoeveelheden stikstofuitspoeling in kilogram per hectare verkregen. Deze waarden worden dus in tabel 7 getoond (M. Bekchanova, persoonlijke communicatie, 24 april 2023).

Tabel 7 toont geen duidelijk verschil aan tussen de behandelingen met biochar en de controle. Zo is er een lichte stijging in de hoeveelheid stikstofuitspoeling bij de biochar gemaakt via een trage pyrolyse bij een temperatuur van 525 graden Celsius en bij de biochar gemaakt via een snelle pyrolyse bij een temperatuur van 550 graden Celsius. De behandeling met biochar gemaakt via een snelle pyrolyse bij een temperatuur van 525 graden Celsius zorgt echter voor een kleine vermindering in stikstofuitspoeling tegenover de controle.

Tabel 7: Stikstofuitspoeling (in kg/ha) in 2012

Behandelingen	Stikstofuitspoeling
Controle	31,10
SP-525	34,91
FP-525	29,84
FP-550	32,37

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van (Bruun et al., 2012).

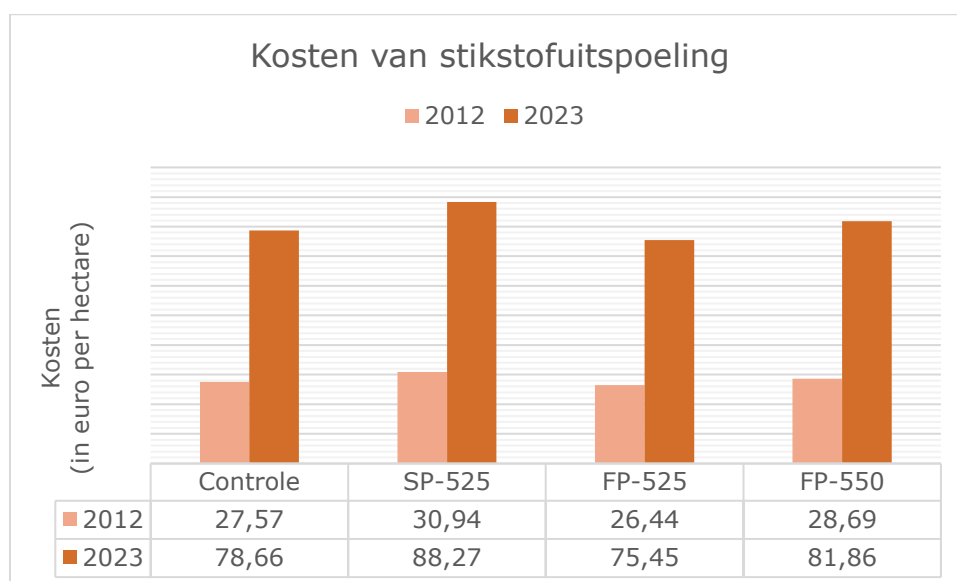
Volgens de assumpties wordt verondersteld dat de schadekosten van stikstofuitspoeling 1,90 euro per kilogram bedragen. Dit bedrag dateert echter van 2020 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2012. Door 1,90 euro per kilogram te delen door $1,10^8$ jaar wordt een bedrag van 0,89 euro per kilogram verkregen voor 2012. Deze kost wordt vermenigvuldigd met de hoeveelheden aan stikstofuitspoeling uit tabel 7 om de totale kosten aan stikstofuitspoeling te vinden in euro per hectare voor elke behandeling, wat weergegeven wordt in figuur 11. De totale kosten aan stikstofuitspoeling voor 2012 worden aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023. Zo worden de waarden uit 2012 vermenigvuldigd met $1,10^{11}$ jaar om de waarden in 2023 te verkrijgen. Ook van deze bewerking worden de resultaten getoond in figuur 11. Deze figuur toont dezelfde trend als tabel 7.

9. Resultaten

Om een duidelijker overzicht te hebben van het verschil tussen de behandelingen met biochar en de controle worden de totale kosten aan stikstofuitspoeling bij de controle verminderd met de totale kosten aan stikstofuitspoeling bij de biochar behandelingen. De resultaten hiervan worden getoond in figuur 12. Figuur 12 toont dus de kostenvoordelen van biochar, waarbij een positief bedrag betekent dat biochar voor een vermindering in de kosten zorgt. Opvallend is dat het voordeel van biochar gemaakt van snelle pyrolyse bij 525 graden Celsius even groot is als het nadeel van biochar gemaakt van snelle pyrolyse bij 550 graden Celsius.

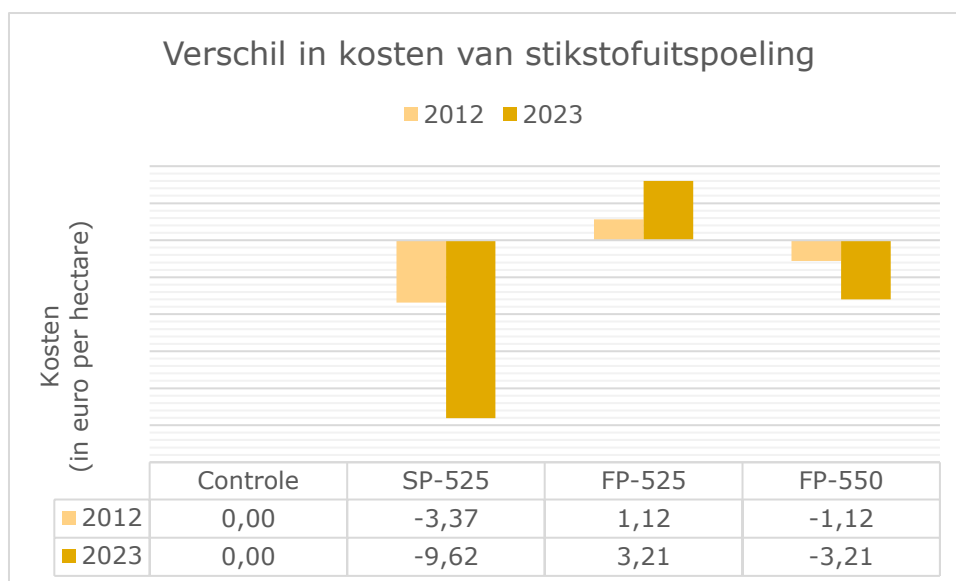
Zoals al vermeld werd bij de assumpties binnen dit onderzoek wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram toegepast. Dit bedrag dateert echter van 2013 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2012. Door 2 euro per kilogram te delen door $1,10^{11}$ jaar wordt voor biochar een eenheidsprijs verkregen van 1,82 euro per kilogram voor 2012. Deze eenheidsprijs wordt vermenigvuldigd met 5.850 kilogram per hectare om de totale kosten van biochar in euro per hectare te krijgen, wat in figuur 13 wordt getoond. De hoeveelheid biochar was uitgedrukt in zes gram per driehonderd gram bodem, maar werd op een analoge manier als de hoeveelheden stikstofuitspoeling omgezet naar het bedrag in kilogram per hectare, wat 5.850 kilogram per hectare is. Opnieuw worden de waarden van 2012 aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023 door de waarden van 2012 te vermenigvuldigen met $1,10^{11}$ jaar. Van deze bewerking worden de resultaten ook getoond in figuur 13.

Hoewel de biochar erg duur is, zorgt biochar geproduceerd via een snelle pyrolyse bij 525 graden Celsius voor een kleine vermindering in stikstofuitspoeling ter waarde van 1,12 euro per hectare in 2012 oftewel 3,21 euro per hectare in 2023. Case 3 en case 4 kunnen niet aantonen dat biochar voor een grote vermindering in stikstofuitspoeling zorgt. Er zijn echter niet genoeg cases onderzocht om het effect volledig uit te sluiten. Het kan interessant zijn om de relatie tussen biochar en stikstofuitspoeling verder te onderzoeken door te kijken welke factoren zorgen voor de lichte variaties.

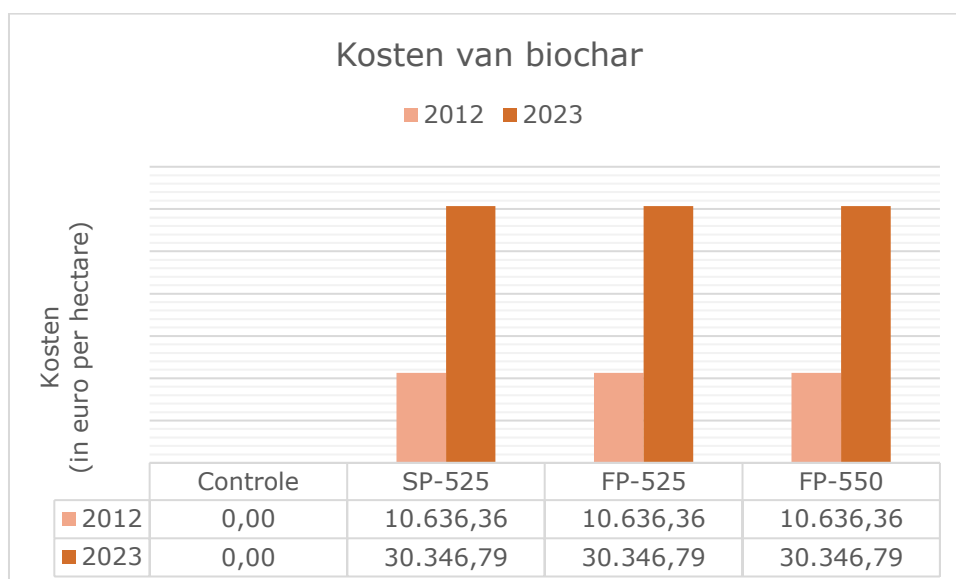


Figuur 11: Kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2012 en 2023

9. Resultaten



Figuur 12: *Vershil in kosten van stikstofuitspoeling (in euro per hectare) in 2012 en 2023*



Figuur 13: *Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2012 en 2023*

9.3. Gewasopbrengsten

9.3.1. Case 5: Veldexperiment (Ghana)

De resultaten van het onderzoek van Frimpong et al. (2021) worden getoond in tabel 8. De waargenomen gewasopbrengsten voor maïs en okra zijn uitgedrukt in ton per hectare. Deze waarden worden vermenigvuldigd met 1.000, opdat deze waarden net als de gewasopbrengsten voor cassave uitgedrukt zouden zijn in kilogram per hectare.

Tabel 8 toont dat de behandeling met enkel biochar bij alle drie de gewassen voor meer gewasopbrengsten zorgt dan de controle. De combinatie van biochar met compost zorgt bij maïs en cassave voor meer gewasopbrengsten dan de behandeling met enkel compost. De combinatie van biochar met NPK zorgt enkel bij maïs voor meer gewasopbrengsten dan de behandeling met enkel NPK. De combinatie van biochar met compost en NPK zorgt bij alle drie de gewassen voor meer gewasopbrengsten dan de combinatie van compost met NPK.

Tabel 8: Gewasopbrengsten (in kg/ha) in 2016 en 2017

Behandelingen	Maïs (2016)	Okra (2016)	Cassave (2017)
Controle	1.620,00	4.990,00	6,91
Biochar	1.650,00	5.560,00	11,85
Compost	2.750,00	11.770,00	13,78
Biochar + compost	2.840,00	9.050,00	18,84
NPK	2.530,00	9.300,00	17,49
Biochar + NPK	3.970,00	8.660,00	16,20
Compost + NPK	3.030,00	10.150,00	17,68
Biochar + compost + NPK	5.170,00	12.230,00	23,90

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van (Frimpong et al., 2021).

Volgens de assumpties wordt verondersteld dat de prijzen van maïs, okra en cassave gelijk zijn aan respectievelijk 0,18047 euro per kilogram, 0,61207 euro per kilogram en 0,7898 euro per kilogram. Deze prijzen dateren van 2019 en dienen daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2016 voor maïs en okra en 2017 voor cassave. Door de benoemde bedragen te delen door $1,10^3$ jaar voor 2016 en door $1,10^2$ jaar voor 2017 worden de volgende bedragen verkregen: 0,14 euro per kilogram maïs in 2016, 0,46 euro per kilogram okra in 2016 en 0,65 euro per kilogram cassave in 2017. Deze prijzen worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden aan gewasopbrengsten uit tabel 8 om de totale gewasopbrengsten te vinden in euro per hectare, wat wordt weergegeven in figuren 14, 15 en 16. De totale gewasopbrengsten worden aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023. Zo worden de waarden uit 2016 met $1,10^7$ jaar

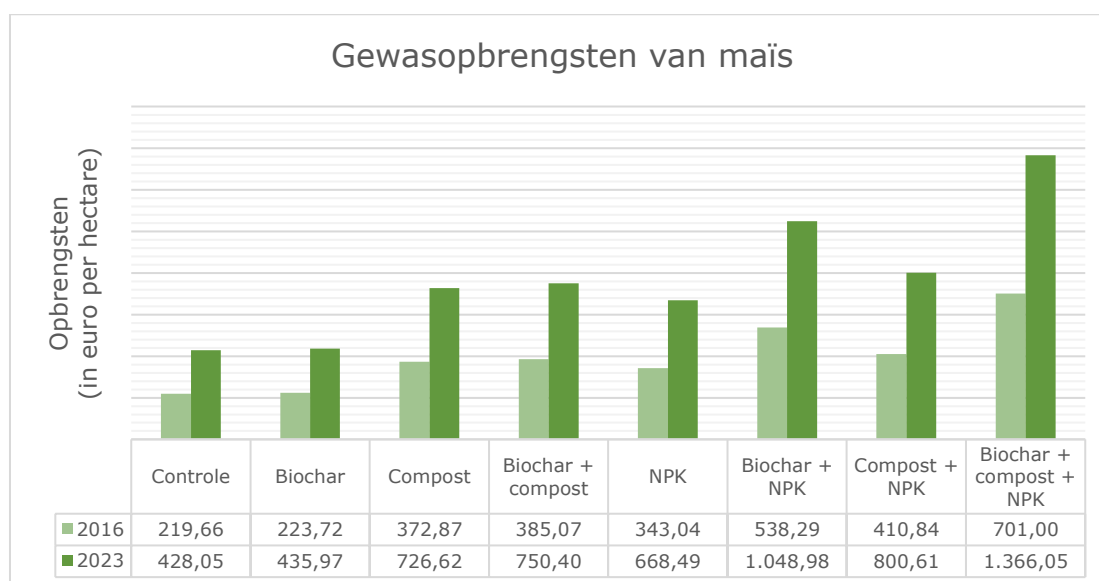
9. Resultaten

vermenigvuldigd en de waarden uit 2017 met $1,10^6$ jaar om de waarden in 2023 te verkrijgen. Ook van deze bewerking worden de resultaten getoond in figuren 14, 15 en 16. Deze figuren tonen dezelfde trend als tabel 8.

Om een duidelijker overzicht te hebben van het verschil tussen de verschillende behandelingen en de controle worden de totale gewasopbrengsten bij de biochar behandelingen verminderd met de totale gewasopbrengsten bij de bijhorende controles. De resultaten hiervan worden getoond in figuren 17, 18 en 19. Deze figuren tonen dus de stijgingen in gewasopbrengsten. Opvallend is dat voor de combinatie biochar met compost en NPK in 2023 de stijging in opbrengsten van okra meer is dan drie keer de stijging in opbrengsten van maïs.

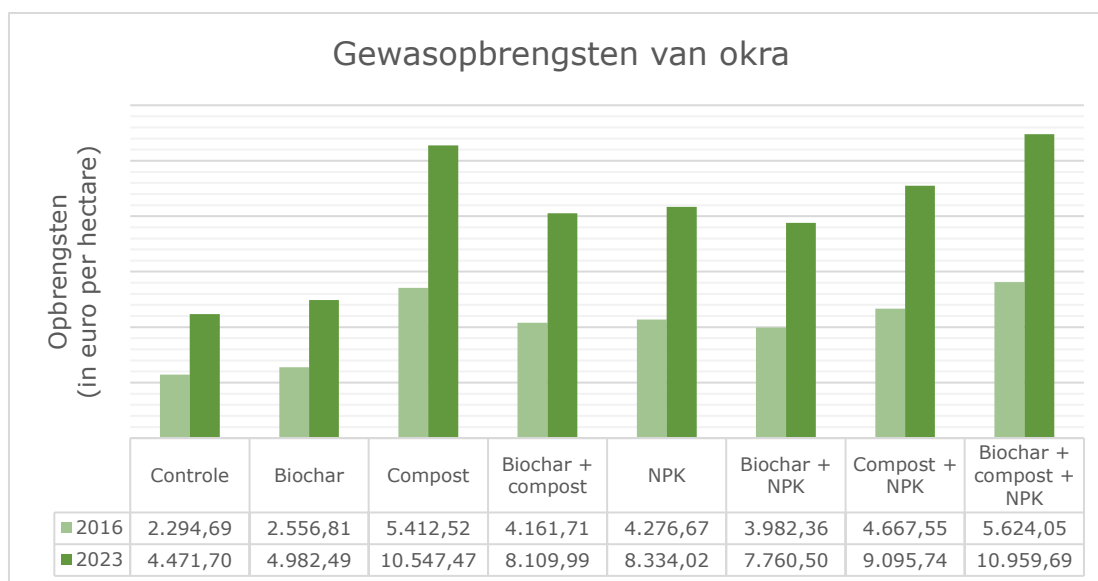
Zoals al vermeld werd bij de assumpties binnen dit onderzoek wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram toegepast. Dit bedrag dateert echter van 2013 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2016 en ook naar 2017. Door 2 euro per kilogram te vermenigvuldigen met $1,10^3$ jaar voor 2016 en met $1,10^4$ jaar voor 2017 wordt voor biochar een eenheidsprijs verkregen van respectievelijk 2,66 euro per kilogram en 2,93 euro per kilogram. Deze eenheidsprijzen worden vermenigvuldigd met de hoeveelheden gebruikte biochar. Het resultaat hiervan, de totale kosten van biochar in euro per hectare, wordt in figuur 20 getoond. Opnieuw worden de waarden van 2017 aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023 door de waarden van 2017 te vermenigvuldigen met respectievelijk $1,10^6$ jaar. Van deze bewerking worden de resultaten ook in figuur 20 getoond.

De kosten aan biochar zijn erg hoog. Er is echter wel te zien dat biochar voor een voordeel zorgt ten opzichte van de controle. Bij okra bedraagt dit voordeel zelfs 510,80 euro per hectare voor okra in 2023. Nog grotere voordelen kunnen teruggevonden worden bij de combinatie van biochar met NPK en compost vergeleken met de combinatie compost en NPK. Opvallend hier zijn de 565,44 euro per hectare voor maïs en de 1.863,95 euro per hectare voor okra. De relatie tussen biochar en gewasopbrengsten is dus zeker interessant om verder te onderzoeken.

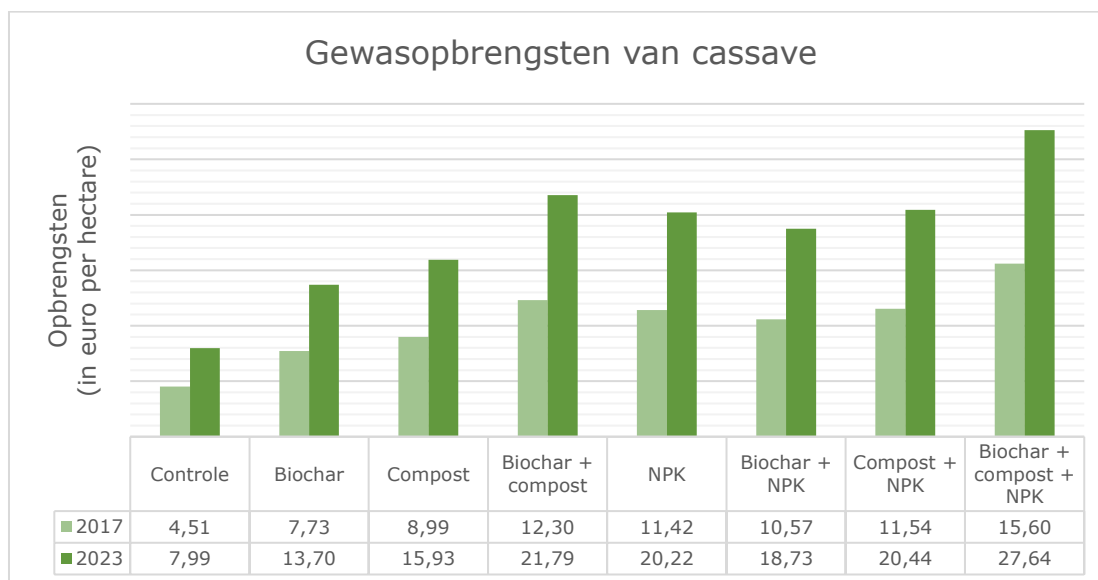


Figuur 14: Gewasopbrengsten van maïs (in euro per hectare) in 2016 en 2023

9. Resultaten

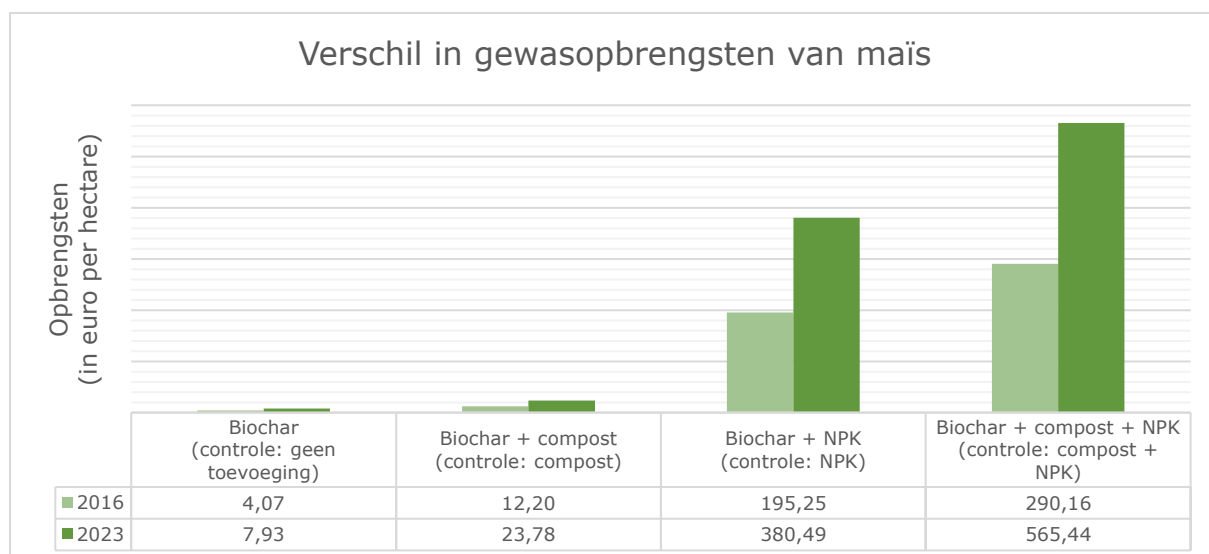


Figuur 15: Gewasopbrengsten van okra (in euro per hectare) in 2016 en 2023

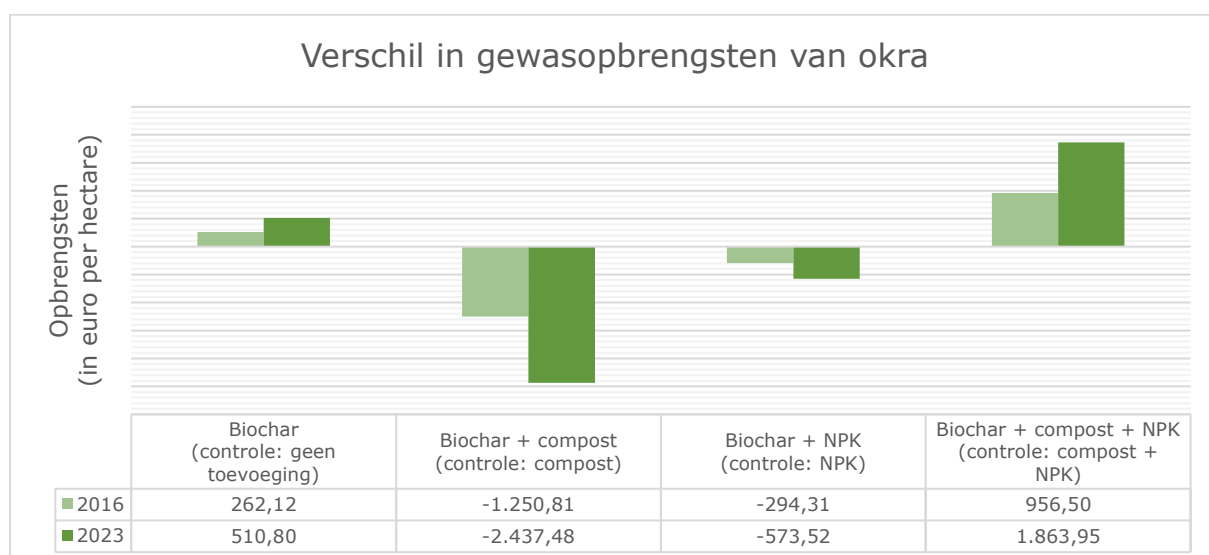


Figuur 16: Gewasopbrengsten van cassave (in euro per hectare) in 2016 en 2023

9. Resultaten

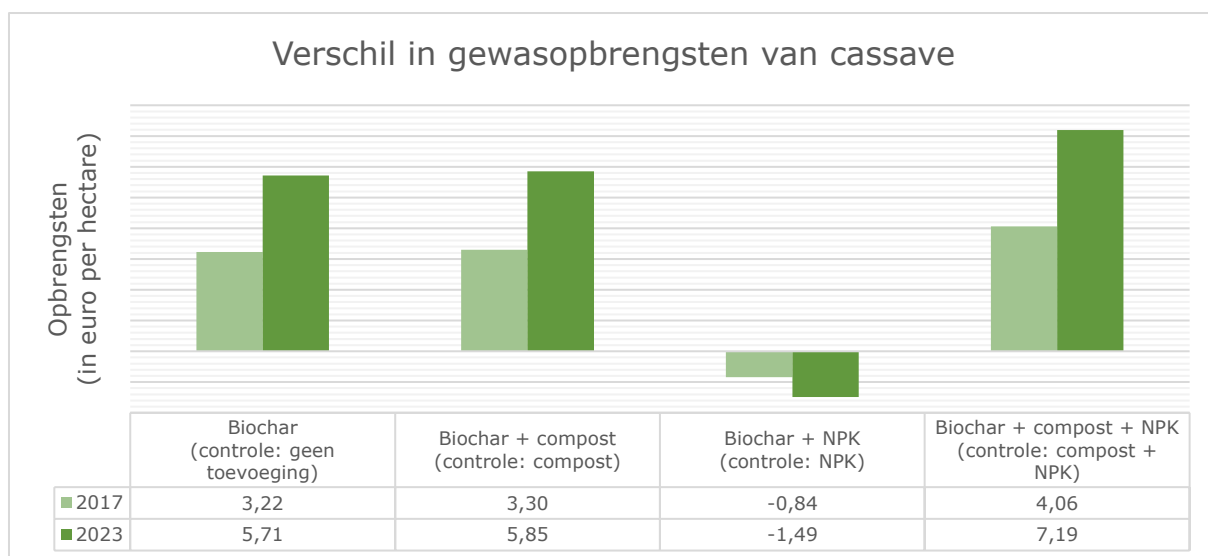


Figuur 17: Verschil in gewasopbrengsten van maïs (in euro per hectare) in 2016 en 2023

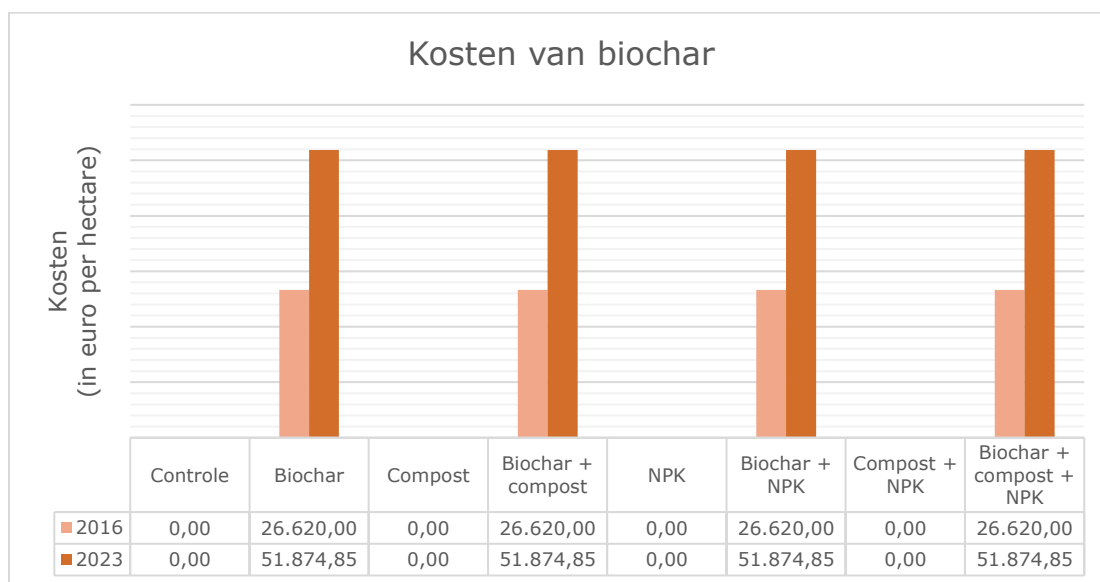


Figuur 18: Verschil in gewasopbrengsten van okra (in euro per hectare) in 2016 en 2023

9. Resultaten



Figuur 19: Verschil in gewasopbrengsten van cassave (in euro per hectare) in 2016 en 2023



Figuur 20: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2016 en 2023

9.3.2. Case 6: Laboratoriumexperiment (Pakistan)

De resultaten van het onderzoek van Ahmad et al. (2020) worden getoond in tabel 9. De waargenomen gewasopbrengsten worden uitgedrukt in gram per pot. Aangezien er acht kilogram bodem in een pot zit, worden de waarden door acht gedeeld om de waarden uitgedrukt in gram per kilogram bodem te verkrijgen. Hierna worden deze bedragen gedeeld door 1.000 om gewasopbrengsten uitgedrukt in kilogram per kilogram bodem te verkrijgen. Een kilogram bodem is gelijk aan $\frac{1 \text{ kg}}{\text{bulkdichtheid} \times \text{diepte bodem} \times 10.000}$ hectare. De diepte van de bodem is in dit geval vijftien centimeter. Er wordt een bulkdichtheid van de bodem verondersteld van 1.300 kilogram per kubieke meter, aangezien de bulkdichtheid van de bodem niet gegeven is in de case. Door de waargenomen gewasopbrengsten te delen door het resultaat van $\frac{1 \text{ kg}}{1.300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,15 \text{ m} \times 10.000}$ worden de waargenomen gewasopbrengsten in kilogram per hectare verkregen. Deze waarden worden dus in tabel 9 getoond (M. Bekchanova, persoonlijke communicatie, 24 april 2023).

Tabel 9 toont dat bij beide soorten graan biochar zorgt voor een stijging de graanopbrengsten. Als gekeken wordt naar de dosis 3,9 ton biochar per hectare, dan valt op dat voor bij soorten graan EA biochar voor de kleinste stijging in graanopbrengsten ten opzichte van de controle zorgt en WS biochar voor de grootste. Bij de dosis 7,8 ton per hectare is eenzelfde trend zichtbaar.

Tabel 9: Gewasopbrengsten (in kg/ha) in 2020

Behandelingen	Graan	
	Niet inoculeren	Inoculeren
Controle (0 ton/ha)	25.179,38	25.910,63
EA biochar (3,9 ton/ha)	27.860,63	28.275,00
EA biochar (7,8 ton/ha)	28.348,13	29.493,75
FM biochar (3,9 ton/ha)	28.275,00	29.664,38
FM biochar (7,8 ton/ha)	29.737,50	30.956,25
WS biochar (3,9 ton/ha)	29.250,00	30.712,50
WS biochar (7,8 ton/ha)	31.443,75	32.589,38

Opmerking: De gegevens zijn afkomstig van (Ahmad et al., 2020).

Volgens de assumpties wordt verondersteld dat de prijs van graan gelijk is aan 0,25864 euro per kilogram. Deze prijs dateert echter van 2016 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2020. Door 0,25864 euro per kilogram te vermenigvuldigen met $1,10^4$ jaar wordt een prijs van 0,38 euro per kilogram graan verkregen voor 2020. Deze prijs wordt vermenigvuldigd met de hoeveelheden aan graanopbrengsten uit tabel 9 om de totale graanopbrengsten te vinden in euro per hectare, wat wordt weergegeven in figuren 21 en 22. De totale graanopbrengsten worden aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023. Zo worden de waarden uit 2020 met $1,10^3$ jaar vermenigvuldigd om de waarden in 2023 te

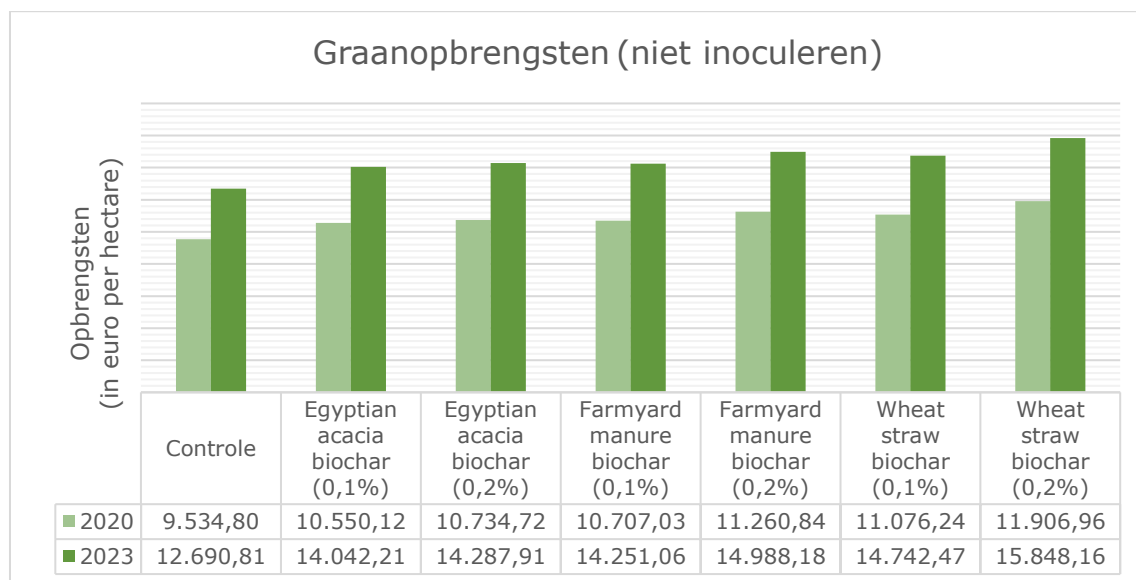
9. Resultaten

verkrijgen. Ook van deze bewerking worden de resultaten getoond in figuren 21 en 22. Deze figuren tonen dezelfde trend als tabel 9.

Om een duidelijker overzicht te hebben van het verschil tussen de verschillende behandelingen en de controle worden de totale graanopbrengsten bij de behandelingen verminderd met de totale graanopbrengsten bij de controle. De resultaten hiervan worden getoond in figuren 23 en 24. Deze figuren tonen dus de stijgingen in graanopbrengsten. Er zijn geen opvallende verschillen tussen de twee soorten graan.

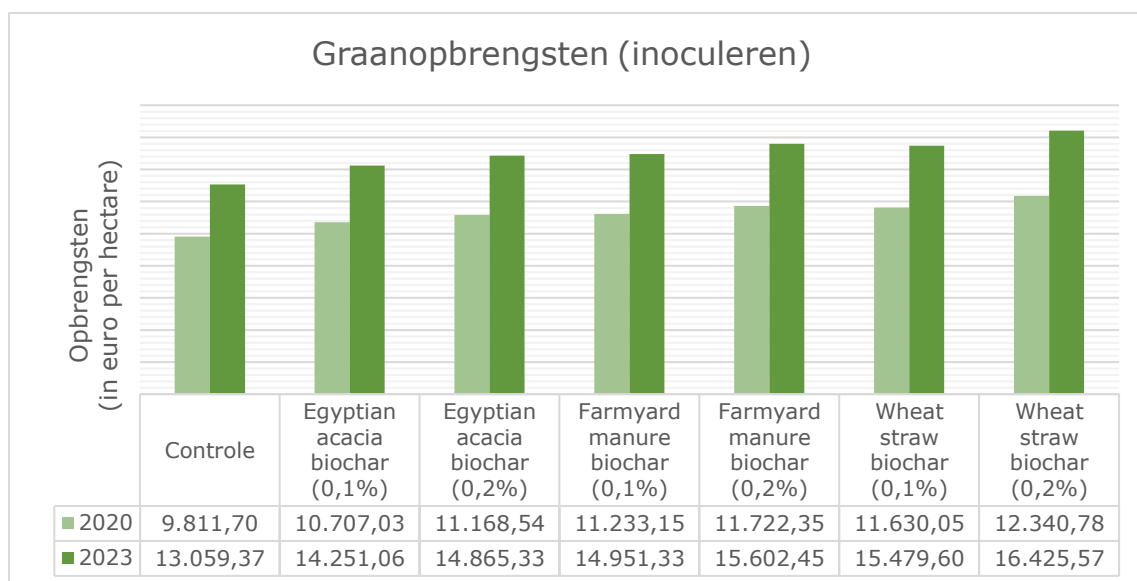
Zoals al vermeld werd bij de assumpties binnen dit onderzoek wordt voor biochar een eenheidsprijs van 2 euro per kilogram toegepast. Dit bedrag dateert echter van 2013 en dient daarom aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet te worden naar 2020. Door 2 euro per kilogram te vermenigvuldigen met $1,10^7$ jaar wordt voor biochar een eenheidsprijs verkregen van 3,90 euro per kilogram voor 2020. Deze eenheidsprijs wordt vermenigvuldigd met de hoeveelheden gebruikte biochar. Het resultaat hiervan, de totale kosten van biochar, wordt getoond in figuur 25. Opnieuw worden de waarden van 2020 aan de hand van de discontovoet van tien procent omgezet naar 2023 door de waarden van 2020 te vermenigvuldigen met $1,10^3$ jaar. Van deze bewerking worden de resultaten ook in figuur 25 getoond.

Ondanks dat de kosten van biochar erg hoog zijn, is binnen deze case duidelijk te zien dat biochar zorgt voor een stijging in de graanopbrengsten. Hierbij zorgt biochar van tarwe voor het grootste voordeel, terwijl biochar van Egyptische acacia voor het kleinste voordeel zorgt. Biochar van mest zit hiertussen. Zoals al vermeld werd bij case 5 is het interessant om de relatie tussen biochar en gewasopbrengsten verder te onderzoeken. Dit wordt bevestigd door case 6.

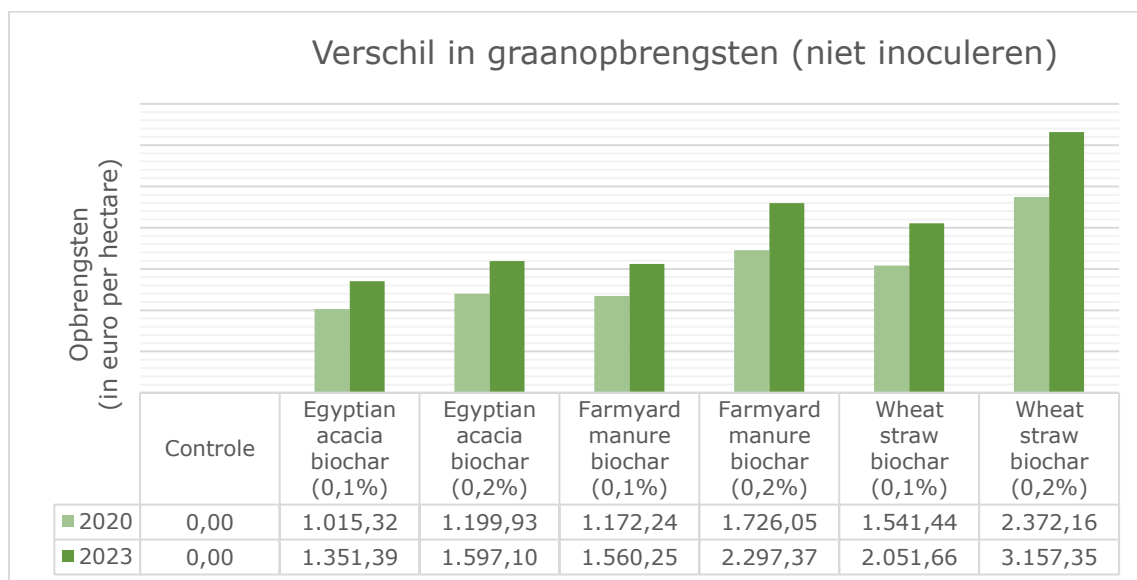


Figuur 21: Graanopbrengsten (niet inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023

9. Resultaten

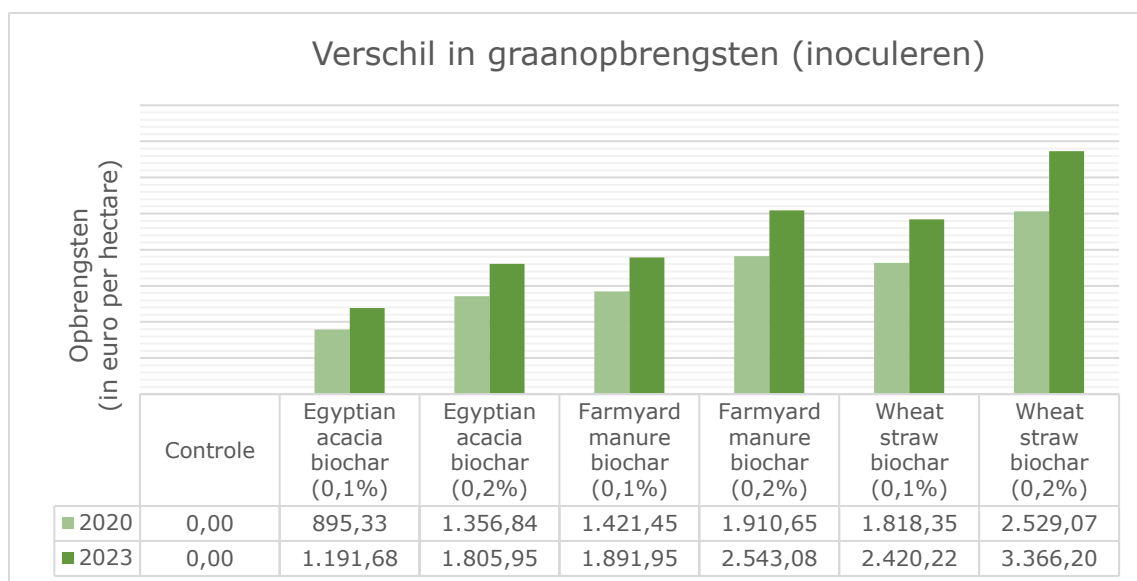


Figuur 22: Graanopbrengsten (inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023

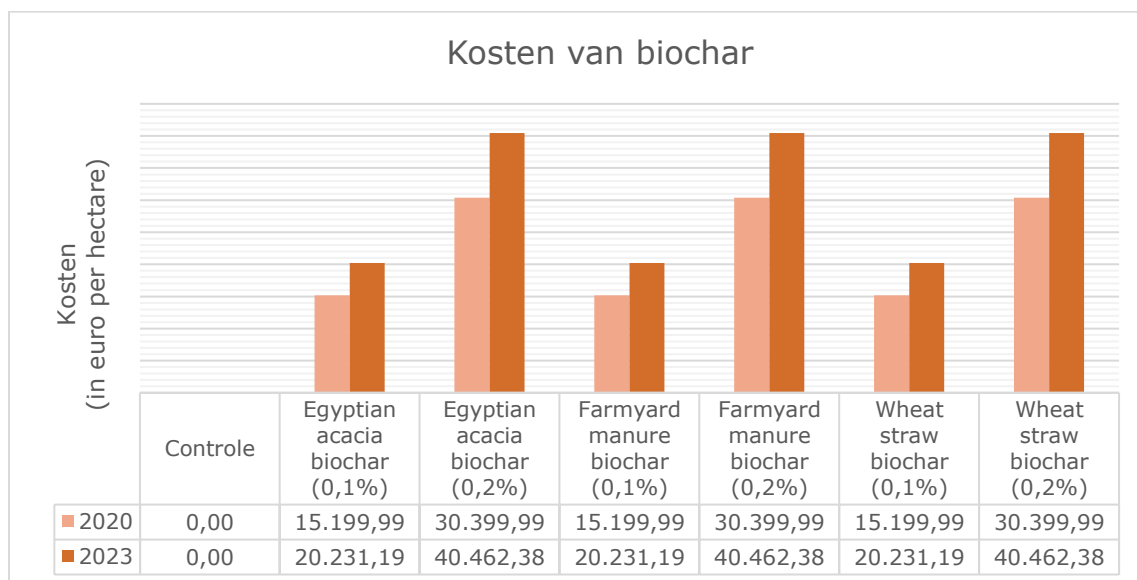


Figuur 23: Vershil in graanopbrengsten (niet inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023

9. Resultaten



Figuur 24: Verschil in graanopbrengsten (inoculeren) (in euro per hectare) in 2020 en 2023



Figuur 25: Kosten van biochar (in euro per hectare) in 2020 en 2023

9.4. Overzicht van cases 1 tot en met 6

Hieronder wordt een overzicht getoond van de resultaten uit de besproken cases. Hierbij worden de verschillen tussen de biochar behandelingen en de controles vergeleken met de kosten van biochar. Tussen haken staat telkens de hoeveelheid gebruikte biochar in ton per hectare uitgedrukt. Kosten zijn roodgekleurd, terwijl voordelen groengekleurd zijn.

Tabel 10: Verschillen in kosten van CO₂-emissies tussen biochar behandelingen en controles vergeleken met de kosten van biochar (cases 1 en 2) (in euro per hectare) in 2023

Verschillen in kosten bij biochar behandelingen	Case 1: Veldexperiment		
	B15 (15 ton/ha)	B30 (30 ton/ha)	B45 (45 ton/ha)
CO ₂ -emissies (controle: geen toevoeging)	246,15	330,37	518,86
Biochar	77.812,27	155.624,55	233.436,82
Verschillen in kosten bij biochar behandelingen	Case 2: Laboratoriumexperiment		
	Biochar (15 ton/ha)	Biochar + stikstof (15 ton/ha)	
CO ₂ -emissies	14,37 (controle: geen toevoeging)	23,55 (controle: stikstof)	
Biochar	77.812,27	77.812,27	

9. Resultaten

Tabel 11: Verschillen in kosten van stikstofuitspoeling tussen biochar behandelingen en controles vergeleken met de kosten van biochar (cases 3 en 4) (in euro per hectare) in 2023

Verschillen in kosten bij biochar behandelingen	Case 3: Veldexperiment			
	AS 20 (20 ton/ha)	AS 40 (40 ton/ha)	SW 20 (20 ton/ha)	SW 40 (40 ton/ha)
Stikstofuitspoeling (controle: geen toevoeging)	35,66	115,82	8,09	14,92
Biochar	103.749,70	207.499,40	103.749,70	207.499,40
Verschillen in kosten bij biochar behandelingen	Compost 20 + AS 20 (20 ton/ha)		Compost 20 + SW 20 (20 ton/ha)	
Stikstofuitspoeling (controle: compost 20)	51,34		86,99	
Biochar	103.749,70		103.749,70	
Verschillen in kosten bij biochar behandelingen	Case 4: Laboratoriumexperiment			
	SP-525 (5,85 ton/ha)	FP-525 (5,85 ton/ha)	FP-550 (5,85 ton/ha)	
Stikstofuitspoeling (controle: geen toevoeging)	9,62	3,21	3,21	
Biochar	30.346,79	30.346,79	30.346,79	

9. Resultaten

Tabel 12: Verschillen in gewasopbrengsten tussen biochar behandelingen en controles vergeleken met de kosten van biochar (cases 5 en 6) (in euro per hectare) in 2023

Verschillen in gewasopbrengsten bij biochar behandelingen	Case 5: Veldexperiment					
	Biochar (10 ton/ha)					
	(controle: geen toevoeging)	+ compost (controle: compost)	+ NPK (controle: NPK)	+ compost + NPK (controle: compost + NPK)		
Maïs	7,93	23,78	380,49	565,44		
Okra	510,80	2.437,48	573,52	1.863,95		
Cassave	5,71	5,85	1,49	7,19		
Biochar	51.874,85	51.874,85	51.874,85	51.874,85		
Verschillen in graanopbrengsten bij biochar behandelingen	Case 6: Laboratoriumexperiment (controle: geen toevoeging)					
	EA		FM		WS	
	(3,9 ton/ha)	(7,8 ton/ha)	(3,9 ton/ha)	(7,8 ton/ha)	(3,9 ton/ha)	(7,8 ton/ha)
Niet inoculeren	1.351,39	1.597,10	1.560,25	2.297,37	2.051,66	3.157,35
Inoculeren	1.191,68	1.805,95	1.891,95	2.543,08	2.420,22	3.366,20
Biochar	20.231,19	40.462,38	20.231,19	40.462,38	20.231,19	40.462,38

10. Discussie

10.1. Beperkingen van dit onderzoek en aanbevelingen voor verder onderzoek

Doordat veel onderzoek wordt gevoerd rond biochar en diens bodemecosysteemdiensten en het een tijdrovend werk zou zijn om al deze onderzoeken te bestuderen, was het nodig om een selectie te maken. Hierbij zijn drie veldexperimenten en drie laboratoriumexperimenten gekozen, afkomstig uit verschillende landen en daterend uit verschillende jaren. Er is dus nog literatuur te vinden met andere cases die de resultaten van dit onderzoek kunnen bevestigen of tegenspreken. Daarom is het belangrijk dat verder onderzoek wordt gedaan waarin meer cases worden vergeleken met elkaar en waarin de resultaten van dit onderzoek geüpdatet kunnen worden met recentere gegevens.

Dat de cases uit verschillende landen en continenten komen, kan een invloed hebben op de resultaten van dit onderzoek. De verschillende locaties kunnen namelijk variëren op vlak van onder andere weersomstandigheden en eenheidsprijzen. In verder onderzoek kunnen andere cases bestudeerd worden uit dezelfde landen als binnen dit onderzoek om de resultaten te vergelijken. Zo kunnen de factoren gevonden worden die voor verschillen binnen landen zorgen. Ook kunnen cases bestudeerd worden uit landen die binnen dit onderzoek niet zijn onderzocht.

Aangezien biochar geproduceerd kan worden op basis van verschillende grondstoffen aan de hand van pyrolyses met verschillende snelheden en temperaturen, kan de prijs hiervan verschillen. Ook de kwaliteit is een factor die een rol kan spelen in de bepaling van de prijs van biochar. Verder onderzoeken kunnen verschillende soorten biochar met elkaar vergelijken op vlak van prijs en effecten op bodemecosysteemdiensten.

De marktprijsmethode die werd gehanteerd bij de cases rond gewasopbrengsten kijkt enkel naar de prijzen waaraan de gewassen verkocht worden op de markt. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de productiekosten van de gewassen of de belastingen. De verkoopprijzen reflecteren niet de geldbedragen die de producenten in handen krijgen. Dit probleem werd gedeeltelijk opgelost door gebruik te maken van producentenprijzen. Dit zijn de prijzen waaraan de gewassen worden gekocht van de boeren die de gewassen telen. Dit lost het probleem niet volledig op, aangezien nog altijd niet gekend is wat de productiekosten zijn of de belastingen die hierop betaald dienen te worden (OCHA, 2022a, 2022b).

De schadekostmethode die werd gehanteerd bij de cases rond koolstofvastlegging en stikstofuitspoeling kijkt naar de kosten van de vervuiling zelf om hier een monetaire waarde aan vast te koppelen. Kosten van vervuiling zijn echter moeilijk te meten, waardoor de werkelijke kosten kunnen variëren ten opzichte van de kosten die binnen dit onderzoek worden gemeten.

Binnen dit onderzoek werd een discontovoet van tien procent verondersteld om de geldbedragen uit verschillende jaren om te zetten naar hetzelfde jaar, opdat deze bedragen met elkaar vergeleken konden worden. Verder onderzoek kan nagaan welk effect verschillende discontovoeten hebben op

de resultaten van dit onderzoek. Ook zou nagegaan kunnen worden hoe accuraat de bedragen zijn nadat ze zijn omgezet met de discontovoeten.

10.2. Vergelijking met de literatuur

Blanco-Canqui (2021) was één van de onderzoeken die in de literatuurstudie werd vermeld. Volgens dit onderzoek zou biochar zorgen voor meer koolstofvastlegging, voor minder stikstofuitspoeling en voor meer gewasopbrengsten (Blanco-Canqui, 2021).

Biochar zorgt bij de eerste twee cases inderdaad voor een daling in CO₂-emissies en bijgevolg voor een stijging in koolstofvastlegging. De effecten die biochar heeft op stikstofuitspoeling en op gewasopbrengsten zijn echter complexer. Er zijn factoren die voor variatie zorgen in deze effecten van biochar. Verder onderzoek kan bestuderen welke factoren dit zijn.

Dit onderzoek toont aan dat het effect van biochar op stikstofuitspoeling beïnvloed wordt door de grondstof, de snelheid van de pyrolyse en de temperatuur bij de pyrolyse van biochar. Ook spelen de andere bodemverbeteraars en rol. Zo dient er gekend te zijn of bijvoorbeeld compost of andere meststoffen aan de bodem zijn toegevoegd en met welke hoeveelheden. Het effect van biochar op gewasopbrengsten wordt beïnvloed door de grondstof van biochar, de combinatie van biochar met andere meststoffen en het soort gewas dat wordt geteeld.

Andere factoren die de effecten beïnvloeden van biochar op koolstofvastlegging, stikstofuitspoeling en gewasopbrengsten zijn de dosis biochar en de periode waarin biochar aan de bodem wordt toegevoegd. Bij case 1 wordt biochar enkel in 2015 aan de bodem toegevoegd en toch zijn er in 2016 verschillen zichtbaar tussen de biochar behandelingen en de controle. Case 1 bevestigt dat het een rol speelt in welke dosis en op welk moment biochar aan de bodem wordt toegevoegd.

11. Conclusie

Eerder gepubliceerde papers bestudeerden de impact van biochar op koolstofvastlegging, stikstofuitspoeling en gewasopbrengsten. Dit onderzoek is vernieuwend doordat monetaire waarden worden gekoppeld aan die impact van biochar. De monetaire waarden worden hieronder vermeld. De monetaire waarden en de hoeveelheden biochar dateren allebei van 2023 en worden uitgedrukt per hectare.

Het effect van biochar op koolstofvastlegging werd in cases 1 en 2 onderzocht door het verschil in CO₂-emissies en de kosten hiervan te bestuderen. Een vermindering in CO₂-emissies wil namelijk zeggen dat er meer koolstofvastlegging is. Case 1 is een veldexperiment uit China. Het voordeel van biochar bedraagt € 246,15 bij 15 ton biochar, € 330,37 bij 30 ton biochar en € 518,86 bij 45 ton biochar. Hier zorgt een hogere dosis biochar duidelijk voor een groter voordeel.

Case 2 is een laboratoriumexperiment uit China. Het voordeel van 15 ton biochar bedraagt € 14,37 vergeleken met de controle en € 23,55 vergeleken met de behandeling met enkel stikstof. Bij deze laatste werd de 15 ton biochar gecombineerd met stikstof.

Het effect van biochar op stikstofuitspoeling werd in cases 3 en 4 onderzocht. Case 3 is een veldexperiment uit de Verenigde Staten van Amerika. Het voordeel van biochar vergeleken met de controle bedraagt – € 35,66 bij 20 ton biochar van amandelschillen, – € 115,82 bij 40 ton biochar van amandelschillen, – € 8,09 bij 20 ton biochar van zachte houtsoorten en € 14,92 bij 40 ton biochar van zachte houtsoorten. Het voordeel van biochar gecombineerd met compost vergeleken met de compost behandeling bedraagt € 51,34 bij 20 ton biochar van amandelschillen en € 86,99 bij 20 ton biochar van zachte houtsoorten.

Case 4 is een laboratoriumexperiment uit Denemarken. Het voordeel van 5,85 ton biochar bedraagt – € 9,62 bij biochar geproduceerd aan de hand van een trage pyrolyse aan 525 graden Celsius, € 3,21 bij biochar geproduceerd aan de hand van een snelle pyrolyse aan 525 graden Celsius en – € 3,21 bij biochar geproduceerd aan de hand van een snelle pyrolyse aan 550 graden Celsius.

Het effect van biochar op gewasopbrengsten werd in cases 5 en 6 onderzocht. Case 5 is een veldexperiment uit Ghana. Het voordeel van 10 ton biochar vergeleken met de controle bedraagt € 7,93 bij maïs, € 510,80 bij okra en € 5,71 bij cassave. Het voordeel van 10 ton biochar gecombineerd met compost vergeleken met de compost behandeling bedraagt € 23,78 bij maïs, – € 2.437,48 bij okra en € 5,85 bij cassave. Het voordeel van 10 ton biochar gecombineerd met NPK meststoffen vergeleken met de NPK meststoffen behandeling bedraagt € 380,49 bij maïs, – € 573,52 bij okra en – € 1,49 bij cassave. Het voordeel van 10 ton biochar gecombineerd met compost en NPK meststoffen vergeleken met de behandeling met enkel compost en NPK meststoffen bedraagt € 565,44 bij maïs, € 1.863,95 bij okra en € 7,19 bij cassave.

Case 6 is een laboratoriumexperiment uit Pakistan. Het voordeel van 3,9 ton biochar van Egyptische acacia bedraagt € 1.351,39 bij niet-geïnoculeerd graan en € 1.191,68 bij geïnoculeerd graan. Het voordeel van 7,8 ton biochar van Egyptische acacia bedraagt € 1.597,10 bij niet-geïnoculeerd graan en € 1.805,95 bij geïnoculeerd graan.

11. Conclusie

Het voordeel van 3,9 ton biochar van mest bedraagt € 1.560,25 bij niet-geïnoculeerd graan en € 1.891,95 bij geïnoculeerd graan. Het voordeel van 7,8 ton biochar van mest bedraagt € 2.297,37 bij niet-geïnoculeerd graan en € 2.543,08 bij geïnoculeerd graan.

Het voordeel van 3,9 ton biochar van tarwe bedraagt € 2.051,66 bij niet-geïnoculeerd graan en € 2.420,22 bij geïnoculeerd graan. Het voordeel van 7,8 ton biochar van tarwe bedraagt € 3.157,35 bij niet-geïnoculeerd graan en € 3.366,20 bij geïnoculeerd graan.

12. Bibliografie

- Aczel, M. R. (2019). What Is the Nitrogen Cycle and Why Is It Key to Life? *Frontiers for Young Minds*, 7. Geraadpleegd van <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2019.00041/pdf>
- Ahmad, M., Wang, X., Hilger, T. H., Luqman, M., Nazli, F., Hussain, A., . . . Mustafa, A. (2020). Evaluating Biochar-Microbe Synergies for Improved Growth, Yield of Maize, and Post-Harvest Soil Characteristics in a Semi-Arid Climate. *Agronomy*, 10(7), 1055. Geraadpleegd van <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/7/1055>
- Arif, M., Jan, T., Riaz, M., Fahad, S., Adnan, M., Amanullah, . . . Rasul, F. (2020). Biochar: a Remedy for Climate Change. *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 151-171. Geraadpleegd van https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49732-3_8
- Bandara, T., Herath, I., Kumarathilaka, P., Seneviratne, M., Seneviratne, G., Rajakaruna, N., . . . Ok, Y. S. (2017). Role of woody biochar and fungal-bacterial co-inoculation on enzyme activity and metal immobilization in serpentine soil. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3), 665-673. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1243-y>
- Bekchanova, M., Campion, L., Bruns, S., Kuppens, T., Jozefczak, M., Cuypers, A., & Malina, R. (2021). Biochar's effect on the ecosystem services provided by sandy-textured and contaminated sandy soils: a systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 10, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1186/s13750-021-00223-1>
- Blanco-Canqui, H. (2021). Does biochar improve all soil ecosystem services? *Global change biology bioenergy*, 13(2), 291-304. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1111/gcbb.12783>
- Bruun, E. W., Petersen, C., Strobel, B. W., & Hauggaard-Nielsen, H. (2012). Nitrogen and Carbon Leaching in Repacked Sandy Soil with Added Fine Particulate Biochar. *Soil Science Society of America Journal*, 76(4), 1142-1148. Geraadpleegd van <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2011.0101>
- Campos, J., Serebrisky, T., & Suárez-Alemán, A. (2015). *Time goes by: recent developments on the theory and practice of the discount rate*. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/Ancor-Suarez-Aleman/publication/286450591_Time_goes_by_recent_developments_on_the_theory_and_practice_of_the_discount_rate/links/566a0b4308ae62b05f0280c0/Time-goes-by-recent-developments-on-the-theory-and-practice-of-the-discount-rate.pdf
- Clough, T. J., & Condrón, L. M. (2010). Biochar and the Nitrogen Cycle: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1218-1223. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0204>
- Denant-Boemont, L., & Hammiche, S. (2019). Economic Measurement of Environmental Costs for Transportation Activity. *Sustainable Transportation and Smart Logistics*, 153-167. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00810-8>
- Dhanwantri, K., Sharma, P., Mehta, S., & Prakash, P. (2014). Carbon Sequestration, Its Methods and Significance. *Environmental Sustainability: Concepts, Principles, Evidences and Innovations*, 151-157. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/Naorem-Singh-2/publication/317184613_Character_association_and_path_analysis_for_yield_and_its_components_in_Indian_mustard_Brassica_junceae_L_Czern_and_Coss/links/592be29daca272

12. Bibliografie

- [95a80c2874/Character-association-and-path-analysis-for-yield-and-its-components-in-Indian-mustard-Brassica-juncea-L-Czern-and-Coss.pdf#page=161](#)
- Dr Elaine's Soil Food Web School. (2019, 15 December). Nutrient Cycling. Geraadpleegd van <https://www.youtube.com/watch?v=NVhY4ssMtbI>
- Egamberdieva Dilfuza. (2011). Role of microorganisms in nitrogen cycling in soils. *Soil Nutrients*. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/224969431_Role_of_Microorganisms_in_Nitrogen_Cycling_in_Soils
- Elbasiouny, H., El-Ramady, H., Elbehiry, F., Rajput, V. D., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2022). Plant Nutrition under Climate Change and Soil Carbon Sequestration. *Sustainability*, 14(2). Geraadpleegd van <https://doi.org/10.3390/su14020914>
- European Central Bank. (2023). US dollar (USD). Geraadpleegd van https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html
- Europese Commissie. (2021). Vragen en antwoorden over de bodemstrategie van de EU. Geraadpleegd van https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/nl/qanda_21_5917
- Frimpong, K. A., Phares, C. A., Boateng, I., Abban-Baidoo, E., & Apuri, L. (2021). One-time application of biochar influenced crop yield across three cropping cycles on tropical sandy loam soil in Ghana. *Heliyon*, 7(2). Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06267>
- Gao, S., Duan, Y., Wang, D., & Turini, T. (2022). No significant influence of biochar and manure application on nitrogen fate and sequestration by tomato and garlic crops: A field experiment in California, USA. *Soil Use and Management*, 38(1), 676-690. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1111/sum.12749>
- Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., . . . Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2(4), 379-420. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-z>
- Hurtado, C., Canameras, N., Domínguez, C., Price, G. W., Comas, J., & Bayona, J. M. (2017). Effect of soil biochar concentration on the mitigation of emerging organic contaminant uptake in lettuce. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 386-393. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.046>
- International Biochar Initiative. (2014). *2013 State of the Biochar Industry*. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/profile/Anoop-Srivastava/post/Do-you-feel-biochars-could-be-a-promising-alternative-to-organic-manures/attachment/59d62c7979197b807798ad42/AS%3A347094322827277%401459765143836/download/State_of_the_Biochar_Industry_2013.pdf
- International Biochar Initiative. (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. Geraadpleegd van https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf
- Jha, P., Biswas, A. K., Lakaria, B. L., & Rao, A. S. (2010). Biochar in agriculture - prospects and related implications. *Current Science*, 99(9), 1218-1225. Geraadpleegd van <https://www.jstor.org/stable/24068517>

12. Bibliografie

- Jónsson, J. Ö. G., & Davíðsdóttir, B. (2016). Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*, 145, 24-38. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>
- Liu, Q., Zhang, Y., Liu, B., Amonette, J. E., Lin, Z., Liu, G., . . . Xie, Z. (2018). How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 426, 211-225. Geraadpleegd van <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-018-3619-4>
- Lu, W., & Zhang, H. (2015). Response of biochar induced carbon mineralization priming effects to additional nitrogen in a sandy loam soil. *Applied Soil Ecology*, 96, 165-171. Geraadpleegd van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092913931530055X>
- Matthey, A., & Bünger, B. (2020). *Methodological Convention 3.1 for the Assessment of Environmental Costs*. Geraadpleegd van <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/methodological-convention-31-for-the-assessment-of>
- Mehmood, I., Bari, A., Irshad, S., Khalid, F., Liaqat, S., Anjum, H., & Fahad, S. (2020). Carbon Cycle in Response to Global Warming. *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 1-15. Geraadpleegd van https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49732-3_1
- OCHA. (2022a). Producer Prices data for Ghana. Geraadpleegd van <https://data.humdata.org/dataset/faostat-prices-for-ghana/resource/0016befd-cdc1-4821-961c-2dd426a6d9da>
- OCHA. (2022b). Producer Prices data for Pakistan. Geraadpleegd van <https://data.humdata.org/dataset/faostat-prices-for-pakistan/resource/b04deaa2-7905-4091-bd7a-c09557bec7e5>
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62, 42-55. Geraadpleegd van https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x?casa_token=Mmuhkd6k_MwAAAAA:iG7i2tSYrkA2Xj96VTmm0U12gERD5O4wI229Lt9Vpn-oXsSkmewQsBWTTMH6fO7KUevl4SMqIBMCuQ
- Scott, H. L., Ponsonby, D., & Atkinson, C. J. (2014). Biochar: an improver of nutrient and soil water availability - what is the evidence? *CAB Reviews*, 9(19), 1-19. Geraadpleegd van <http://gala.gre.ac.uk/id/eprint/12764/>
- Tan, H., Lee, C. T., Ong, P., Wong, K. Y., Bong, C., Li, C., & Gao, Y. (2021). A Review On The Comparison Between Slow Pyrolysis And Fast Pyrolysis On The Quality Of Lignocellulosic And Lignin-Based Biochar. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1051, 1-8. Geraadpleegd van <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1051/1/012075/pdf>
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- Xiao, Z., Rasmann, S., Yue, L., Lian, F., Zou, H., & Wang, Z. (2019). The effect of biochar amendment on N-cycling genes in soils: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 696. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133984>
- Yang, W., Feng, G., Miles, D., Gao, L., Jia, Y., Li, C., & Qu, Z. (2020). Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation

12. Bibliografie

with mulching. *Science of The Total Environment*, 729. Geraadpleegd van <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138752>