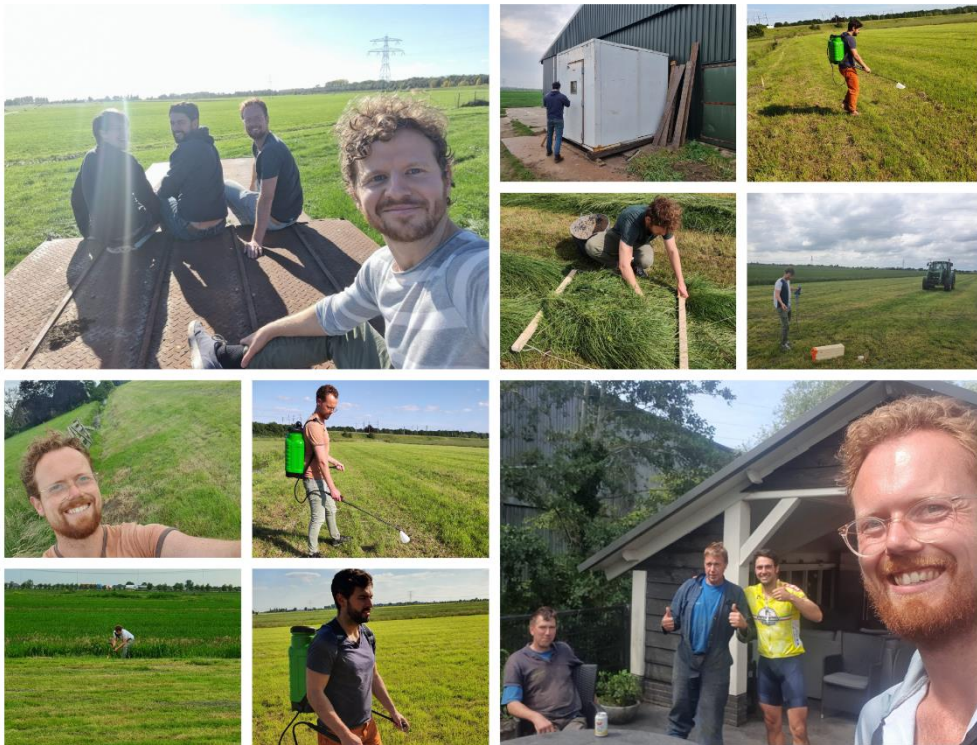




# FLEXILISER

*"Energising the soil, while grounding the energy transition"*



## **Openbaar eindrapport haalbaarheidsstudie Flexiliser**

Auteurs: Michel Michaloliákos, Steven van Dalen en Manuel Sánchez

*Deze haalbaarheidsstudie is uitgevoerd met behulp van een TSE TEI subsidie van het Ministerie van Economische Zaken*

*TESN221020 subsidieverlening 24-12-2021*

## Managementsamenvatting

Deze haalbaarheidsstudie is uitgevoerd met behulp van een TSE TEI subsidie van het Ministerie van Economische Zaken.

De uitkomst van deze haalbaarheidsstudie is positief. Het uitvoeren van de haalbaarheidsstudie heeft ons verder overtuigd dat Flexiliser in staat is om bij te dragen aan duurzamere energie- en voedselproductie. Dit doen wij door het verbeteren van de bodemkwaliteit en tegelijkertijd een bijdrage te leveren aan de energietransitie. Module 1 van Flexiliser – deelnemen aan balansmarkten en waterstof produceren – ondersteunt de energietransitie door meer flexibiliteit te bieden aan het elektriciteitsnet en door input te leveren voor module 2 en 3. Modules 2 en 3 stimuleren de bodem door – gebruikmakend van de output van module 1 – de productie en het toepassen van Flexibooster (een duurzaam geproduceerde meststof verrijkt met een verbinding van mycorrhiza en micronutriënten) op landbouwgronden. Dit resulteert in een lagere uitstoot van CO<sub>2</sub> en stikstof, omdat er minder input van fossiele brandstoffen en kunstmest nodig is en stikstof beter in de bodem wordt vastgehouden.

Ons proces beperkt de uitstoot van broeikasgassen (GHG emissions) voornamelijk op twee manieren: ten eerste door CO<sub>2</sub>-emissies van de productie van waterstof te vermijden, en ten tweede door stikstofemissies in de bodem als gevolg van kunstmestgebruik te vermijden vanwege de verhoogde retentie-efficiëntie die wordt bereikt door Flexibooster. We verminderen 16,58 ton CO<sub>2</sub> per geproduceerde ton H<sub>2</sub> en gemiddeld 1,27 ton CO<sub>2</sub>eq. per hectare veld<sup>4</sup> waar Flexibooster wordt toegepast.

Het uitvoeren van de haalbaarheidsstudie heeft ons echter ook tot de conclusie gebracht dat een commerciële partner nodig is om dit project naar de volgende fase te brengen. Resultaten zijn positief voor de samenleving en wij verwachten een positief verdienmodel, maar voordat een pilot kan worden opgestart, is meer zekerheid benodigd over de chemische processen, die onze Flexiliser-oplossing bevat. Om deze zekerheid te verkrijgen willen wij een *design study* (ontwerpstudie) vooraf laten gaan aan de pilotstudie. De ontwerpstudie zullen wij doen in samenwerking met TNO, HIFA en Adverio Waste Systems, die zich op dit moment al hebben gecommitteerd aan de volgende fase van Flexiliser. Ten slotte zijn wij gestart met een zoektocht naar een commerciële partner, met speciale aandacht voor module 2, om het consortium van partijen te voltooien, dat zal blijven werken aan het Flexiliser-project.

### *Hoe zijn we hier gekomen?*

Het doel van ons product is om flexibiliteit te bieden op verschillende fronten door inputs (en daarmee kosten) en schadelijke outputs (die leiden tot sociale en milieuschade) te verminderen en tegelijkertijd duurzame energie- en voedselproductie te garanderen. Alle technologie bestaat afzonderlijk, maar de combinatie en de synergie zijn tot nu toe nog niet gerealiseerd. Een mogelijke reden is dat de omstandigheden en de verwachtingen over de toekomst – bijvoorbeeld met betrekking tot de volatiliteit en het niveau van de energie- en kunstmestprijzen – zijn veranderd. Uitgaand van voorgaande omstandigheden, was de kans op een positieve business case voor ons product kleiner. Maar door verbeterde marktomstandigheden is een positieve business case nog aannemelijker. De maatschappelijke tendens richting verduurzaming draagt hier natuurlijk ook aan bij.

Om de toegevoegde waarde van Flexiliser te onderbouwen en te beoordelen, is de haalbaarheid van de drie modules van Flexiliser getest. Het doel van deze studie is om met zoveel mogelijk zekerheid, of in ieder geval met voldoende vertrouwen, een antwoord te geven op de haalbaarheid van ons project en deze uitkomst te gebruiken in onze afweging in het voort- of stopzetten van de volgende stap in het project, zijnde de ontwerpfase. Om tot dit resultaat te komen, formuleerden en beantwoordden wij 18 onderzoeksvragen – sommige met deelvragen – in onze haalbaarheidsstudie.

Deze vragen hebben betrekking op de volgende hoofdpunten:

1. Technische beschrijving en haalbaarheid van de processen
2. Marktpotentieel van de afzonderlijke en gecombineerde modules in hun respectieve markten
3. Wettelijke en reglementaire verplichtingen om met de respectieve materialen en op de betrokken markten te werken
4. Schattingen van kosten, inclusief onzekerheden en optimalisatiemogelijkheden
5. Strategische positionering van het project en de producten van de afzonderlijke en gecombineerde modules.

De onderzoeksvragen zijn beantwoord door middel van deskresearch, interviews, eenmalig overleg met aanbieders van relevante apparatuur en/of gerelateerde data, workshops, veldexperimenten en grondmonsteranalyse door Eurofins en integrale risicobeoordeling.

## Inhoudsopgave

Lijst met afkortingen .....	5
1.   Introductie .....	6
1.1. Projectbeschrijving .....	6
1.2. Beschrijving kennisverspreiding en PR .....	7
1.3. Doelstelling van de haalbaarheidsstudie .....	7
1.4. Overzicht van het rapport.....	7
2.   Methodologie.....	8
2.1. Beschrijving van de onderzoeksmethoden .....	9
2.2. Business model program .....	9
2.3. Data-input voor het model .....	10
2.4. Mycorrhiza booster experiment .....	11
3.   Achtergrondinformatie .....	12
3.1. De behoefte aan flexibiliteit op het elektriciteitsnet.....	13
3.2. Tarieven elektriciteitsaansluiting.....	14
3.3. Ammoniak en kunstmestproductie .....	14
3.4. Ammoniak en kunstmestmarkten .....	15
3.5. Wet- en regelgeving ammoniakgebruik.....	16
3.6. Mycorrhiza in de bodem .....	16
4.   Resultaten .....	17
4.1. Technische beschrijving van het proces .....	17
4.2. Wettelijke verplichtingen.....	17
4.3. Opbouw kosten voor de verschillende modules .....	18
4.4. Kosteneffectiviteit voor alternatieven .....	19
4.5. Emissiereductie.....	20
5.   Conclusie van de haalbaarheidsstudie .....	21
Dankwoord.....	21
Referenties.....	22

## Lijst met afkortingen

ABM	Agent-Based Model
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve
AMF	Arbuscular Mycorrhizal Fungi
ASU	Air Separation Unit
ATO	Aansluit- en transportovereenkomst
BIO	Name of the scenario implementing the bio-based options in industry
CAPEX	Capital expense
CLP	Regulation of the classification, labelling and packaging of chemicals
CMC	Component Material Categories
DSO	Distribution System Operator
ECHA	The European Chemicals Agency
EPEX	European Power Exchange: market for short-term power trading
FCR	Frequency Containment Reserve: reserves necessary for constant containment of frequency deviations of nominal value. Secures power balance on the energy grid.
FOB	Free-on-board
GHG	Greenhouse Gas
ha	Hectares
ICE Endex	InterContinental Exchange (commodities marketplace and exchanges)
kVAR	Kilovolt-Ampère (units of reactive power)
kWh	Kilowatt-hours
LTEL	Long-Term Exposure Limits
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserve: 'emergency power'
Non-firm ATO	A non-guaranteed power connection with system operators (netbeheerders)
NPV	Net Present Value
NSU	Nitrogen Separation Unit
OEL	Occupational Exposure Limits
OPEX	Operating Expense
OTC	Over-the-counter: A specific long-term energy market
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PFC	Product Fund Categories
PFD	Process Flow Diagram
PGS	Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (= Publication Guidelines on Harmful Substances)
PV	Photovoltaic
REACH	Regulation of the European Parliament and the European Council concerning the Regulation, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals.
SER	Sociaal Economische Raad (= Council of Social Economics)
SMR	Steam Methane Reforming
STEL	Short-Term Exposure Limits
TSO	Transmission System Operator
WABO	Wet Algemene Bepalingen Omgevingsrecht
ZZS	Zeer zorgelijke stoffen (= very alarming substances)

# 1. Introductie

Wij geloven dat het energiesysteem en het voedselsysteem zich beide in een overgangsfase bevinden en fundamentele veranderingen vereisen voor een duurzame samenleving. Zoals wij het zien, zijn voedsel en energie onlosmakelijk met elkaar verbonden, omdat we energie in de traditionele zin gebruiken om voedsel te produceren, terwijl alle organismen voedsel omzetten in energie om hun dagelijkse lichamelijke processen uit te voeren. Vanuit deze kerngedachte zijn we op zoek gegaan naar een oplossing die het energie- en voedselsysteem verbindt en hun meest urgente uitdagingen oplost: de behoefte aan flexibiliteit en de behoefte aan verminderde inputs en verminderde (schadelijke) outputs. Zowel in ons voedsel- als energiesysteem moeten schadelijke outputs worden verminderd, waaronder de uitstoot van broeikasgassen (GHG). We noemen het hele systeem van onze voorgestelde oplossing "Flexiliser".

Onze oplossing leidt tot één kernproduct met meerdere winstgevende bijproducten. Het kernproduct is Flexibooster, een mengsel van voedingsstoffen voor bodembehandeling dat leidt tot gelijke of betere landbouwopbrengsten met minder bodemdegradatie, minder benodigde meststoffen als inputs, en minder schadelijke outputs. De bijproducten zijn de flexibiliteit van het elektriciteitsnet en waterstof. Als dit wordt veroorzaakt door de marktvraag, kunnen we overwegen om andere bijproducten op basis van verschillende varianten van ammoniak en meststofverbindingen te verkopen.

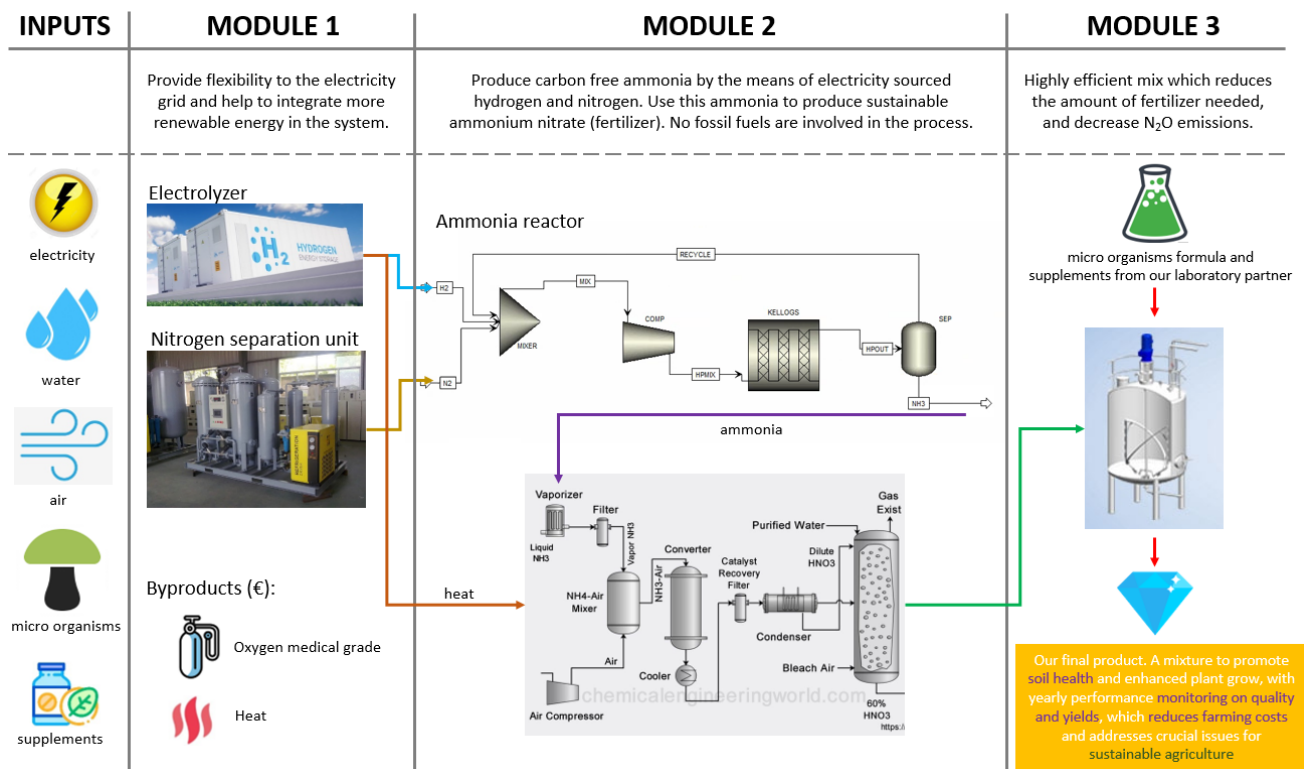
Als team worden we gemotiveerd door het idee dat we deze wereld ten goede kunnen veranderen. Wat we hiervoor nodig hebben is bewust gebruik van de hulpbronnen van deze planeet en een grotere acceptatie van duurzame, circulaire bedrijfsmodellen. Deze haalbaarheidsstudie geeft het vertrouwen dat Flexiliser duurzame en circulaire businessmodellen levert en dat we daarmee een stap kunnen zetten in de richting van het oplossen van de complexe duurzaamheidsuitdagingen van de samenleving.

## 1.1. Projectbeschrijving

Deze haalbaarheidsstudie is uitgevoerd met behulp van een TSE TEI subsidie van het Ministerie van Economische Zaken.

Flexiliser bestaat uit drie modules. De onderstaande figuur visualiseert deze drie modules en hun onderlinge verbondenheid. Zoals hierboven vermeld, is het doel van ons product om flexibiliteit op verschillende fronten te bieden en om inputs (en daarmee kosten) en schadelijke outputs (die leiden tot sociale en milieuschade) te verminderen en tegelijkertijd een duurzame voedselproductie te garanderen. Alle technologie bestaat afzonderlijk, maar de combinatie en het synergetisch effect zijn tot op heden niet gerealiseerd of onderzocht. Een mogelijke reden is dat de omstandigheden en de verwachtingen over de toekomst – bijvoorbeeld met betrekking tot de volatiliteit en het niveau van de energie- en kunstmestprijzen – zijn veranderd. Uitgaand van voorgaande omstandigheden, was de kans op een positieve business case voor ons product kleiner. Maar door verbeterende marktomstandigheden is een positieve business case nog aannemelijker. De maatschappelijke tendens richting verduurzaming draagt hier natuurlijk ook aan bij.

In onderstaande figuur presenteren we de drie verschillende modules waaruit Flexiliser bestaat. Module 1 gaat over het produceren van waterstof via een elektrolyser. Door in- en afschaling af te stemmen op de prijsprykkels op de elektriciteitsbalansmarkten wordt er flexibiliteit geboden aan het elektriciteitsnet. Tegelijkertijd scheiden we stikstof van lucht via een stikstofscheidingsapparaat, *Nitrogen Separation Unit (NSU)*. Zowel waterstof als stikstof dienen als input voor Module 2, waarin eerst ammoniak geproduceerd wordt via de Haber-Bosch-technologie. Vervolgens wordt de warmteafgifte van Module 1 samen met de ammoniak uit Module 2 gecombineerd om chemisch ammoniumnitraat te produceren, zonder dat er fossiele brandstoffen nodig zijn. Dit ammoniumnitraat kan in veel verschillende mestproducten worden gebruikt, maar we besluiten het te gebruiken in Module 3, waarin we in samenwerking met een Mexicaans laboratorium de meststof verrijken met mycorrhiza en andere micro-organismen. Dit leidt tot ons eindproduct Flexibooster, dat we toepassen op de bodem om de gewasopbrengsten te behouden en tegelijkertijd minder kunstmest nodig te hebben.



Figuur 1: Infographic die de stromen van en tussen de drie modules waaruit Flexiliser bestaat weergeeft.

## 1.2. Beschrijving kennisverspreiding en PR

Wij delen de niet-concurrentie gevoelige informatie van deze haalbaarheidsstudie graag met het publiek en doen dat op de volgende wijze:

1. Het finale rapport is gedeeld met partners Adverio en TNO;
2. Het publieke rapport wordt gedeeld met relevante lobbyorganisaties, zoals LTO en VNG;
3. Via de RVO zal het rapport openbaar gemaakt worden;
4. Via de website van Flexiliser – nu in aanbouw, binnen een halfjaar in de lucht – zal het publieke rapport structureel toegankelijk zijn;
5. Het rapport zal gedeeld worden met vakbladen, zoals Energiea.

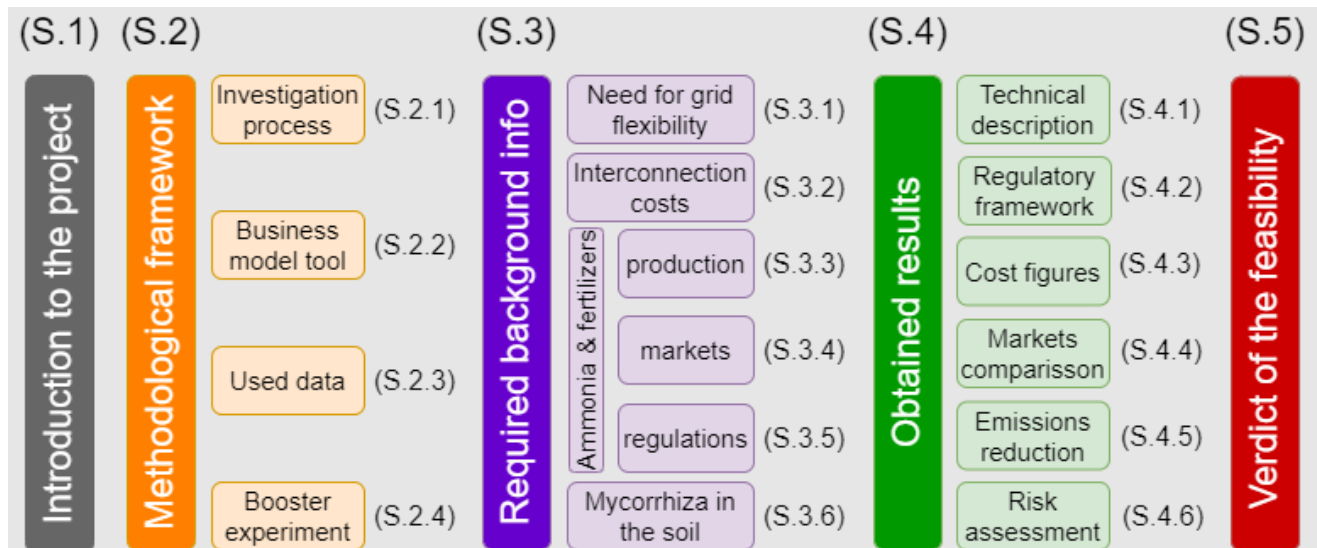
## 1.3. Doelstelling van de haalbaarheidsstudie

Het doel van deze studie is om met zoveel mogelijk zekerheid, of in ieder geval met voldoende vertrouwen, een antwoord te geven op de haalbaarheid van ons project en deze uitkomst te gebruiken in onze afweging in het voort- of stopzetten van de volgende stap in het project, zijnde de ontwerpfase. Om tot dit resultaat te komen, formuleerden en beantwoordden we 18 onderzoeksvragen – sommige met deelvragen – in onze haalbaarheidsstudie.

## 1.4. Overzicht van het rapport

In dit rapport evalueren we de haalbaarheid van Flexiliser zoals hierboven beschreven in paragraaf 1. In deel 2 presenteren we het methodologische kader dat wordt gebruikt voor de studie, die bestaat uit een beschrijving van de onderzoeksmethoden, een beschrijving van het bedrijfsmodel dat wordt gebruikt om de kosteneffectiviteit van de producten te analyseren, de expliciete rapportage van de gegevens en bronnen die in de studie worden gebruikt, en het experimenteer kader dat wordt gebruikt om de effectiviteit van de Flexi-booster in onze partnerboerderij te evalueren. In sectie 3 geven we de achtergrondinformatie die de lezer nodig heeft om de maatschappelijke voordelen die ons projectvoorstel behandelt, te contextualiseren. Dit zijn: de behoefte aan netflexibiliteit; de kosten

van distributie en netaansluiting in Nederland; productie, afzet en regelgevingsinformatie voor ammoniak en meststoffen in Nederland; en de effecten van mycorrhiza in de grond. In hoofdstuk 4 presenteren we de algemene resultaten van het integrale proces. Tot slot sluiten we in paragraaf 5 de haalbaarheidsstudie af met een oordeel over de vraag of het project al dan niet haalbaar is. In figuur 2 visualiseren we het overzicht van de inhoud van het rapport met als doel een kaart te bieden voor de lezers.



Figuur 2: Schematische weergave van de opzet van de haalbaarheidsstudie

## 2. Methodologie

We evalueren de haalbaarheid van dit bedrijfsidee aan de hand van de eerder gepresenteerde onderzoeksvragen. Deze komen overeen met de onderzoeksvragen bij de subsidieaanvraag. De vragen hebben betrekking op elk van de drie modules en gaan in op de volgende vijf punten:

1. Technische beschrijving en haalbaarheid van de processen
2. Marktpotentieel van de afzonderlijke en gecombineerde modules in de betreffende markten
3. Wettelijke en reglementaire verplichtingen om met de genoemde materialen te werken en op de betreffende markten te verhandelen
4. Schattingen van kosten, inclusief onzekerheden en optimalisatiemogelijkheden
5. Strategische positionering van het project en de producten van de afzonderlijke en gecombineerde modules.

Alle informatie die wordt verzameld tijdens het beantwoorden van deze vragen wordt verwerkt in een bedrijfsmodel waarin de netto-contante-waarde van het project wordt gebruikt als indicator om de kosteneffectiviteit te meten. De methoden voor het verzamelen worden beschreven in paragraaf 2.1. Het resulterende bedrijfsmodel vat alle verzamelde informatie samen en wordt gebruikt om de kwantitatieve inhoud te genereren die de antwoorden op de onderzoeksvraag begeleidt. De methoden achter dit proces worden verder beschreven in paragraaf 2.2. De gegevensinvoer voor het model wordt beschreven in paragraaf 2.3.

Parallel aan de theoretische aspecten van deze haalbaarheidsstudie, hebben we een praktisch experiment toegevoegd op het land van onze partnerboer, een van de partners van het project. In het experiment pasten we verschillende hoeveelheden boostermengsel en meststof – in feite een voormonster van Flexibooster – toe op verder vergelijkbare stukken grond. Hoewel het experiment langer doorloopt dan de haalbaarheidsstudie, geven enkele voorlopige resultaten relevante – hoopvolle – informatie voor de effectiviteit en rendabiliteit van module 3, alsook de volgende fase van het project, de ontwerpfase. De methodologie van dit nog lopende experiment wordt verder beschreven in paragraaf 2.4.



Ten slotte zullen we ook een risicobeoordeling opnemen voor alle drie de modules, rekening houdend met geïdentificeerde risico's, de kansen op impact, de ernst van de impact en mitigatieopties.

## 2.1. Beschrijving van de onderzoeksmethoden

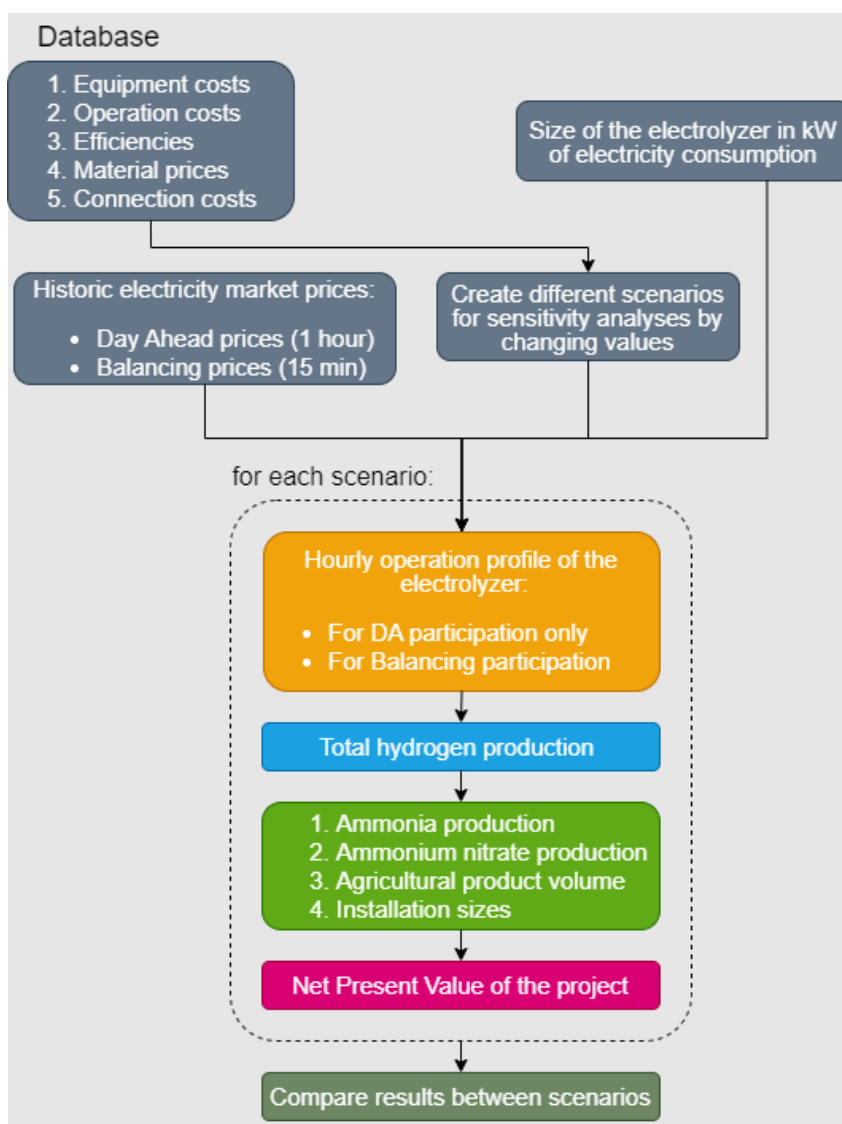
We hebben dit onderzoek uitgevoerd met behulp van de volgende methoden voor gegevensverzameling:

1. Deskresearch. Veel van het deskresearch was gebaseerd op literatuuronderzoek, database-analyse en werkvormen en discussies tussen de studiedeelnemers om een betere kwaliteit van aannames en onderbouwingen te ontwikkelen.
2. Interviews. We hebben interviews gehouden met experts.
3. Eenmalig overleg met aanbieders van relevante apparatuur en/of gerelateerde gegevens.
4. Workshops. We organiseerden workshops met onze partners en medewerkers.
5. Veldexperiment en bodembemonstering door Eurofins. Meer informatie over de opzet van het veldexperiment is te vinden in paragraaf 2.4.
6. Risicobeoordeling in samenwerking met een risicobeoordelingsexpert. Deze risicobeoordeling is gevalideerd door TNO.

## 2.2. Business model program

Om de kosteneffectiviteit van het proces te kwantificeren, hebben we een model ontworpen waarmee we snel parameters kunnen wijzigen en de netto contante waarden van die wijzigingen kunnen berekenen, **waardoor ook** sensitiviteitsanalyses mogelijk zijn. De kern van het model is de per-uur-aanpasbare werking van de elektrolyser, die wordt afgestemd op de elektriciteitsprijzen per uur van de day-aheadmarkt en de balansmarkt. Voor elke mogelijkheid onderzoeken we twee gevallen, 1) wanneer de elektrolyser alleen op basis van de day-aheadmarkt zou werken, en 2) wanneer de elektrolyser deelneemt aan de balansmarkt. Op basis van deze twee cases kwantificeren we hoeveel waterstof er in beide gevallen wordt geproduceerd en wat de elektriciteitskosten zijn, die eraan verbonden zijn. Ook wanneer zonnepanelen in het systeem aanwezig zijn, wordt rekening gehouden met deze elektriciteitsopwekking. We hebben bovendien de mogelijkheid om de elektriciteit die door de panelen in ons systeem wordt opgewekt te gebruiken om waterstof op te wekken, of om het tegen een hoge prijs in de markt te verkopen.

De hoeveelheid geproduceerde waterstof is belangrijk om de ammoniakproductie te bepalen die de productie van ammoniumnitraat bepaalt. Alle bovengenoemde variabelen zijn cruciaal om de benodigde apparatuur te schalen en zo de vereiste investeringskosten te kwantificeren. Met de volumes van producten, de elektriciteitskosten en de omvang van de vereiste investeringen hebben we alles wat we nodig hebben om de netto contante waarde van het project te kwantificeren. Hiervoor hebben we ook verwachte afnemende productiekosten, gewogen gemiddelde kapitaalkosten en de economische levensduur nodig om de investeringen in elke simulatie op jaarbasis te berekenen. Het proces van modellering wordt gevisualiseerd in figuur 3.



Figuur 3: Diagram van het bedrijfsmodel dat gebruikt is om de kosteneffectiviteit van het proces te evalueren.

### 2.3. Data-input voor het model

Voor het doel van het model definiëren we een referentiescenario dat bestaat uit de volgende parameters die voortvloeien uit het gegevensverzamelingsproces van de haalbaarheidsstudie. Het algemene scenario is de installatie van een PEM-elektrolyser van 1 MW om de waterstof te genereren die nodig is voor het proces dat in de vorige sectie is beschreven. In deze opzet opereert de installatie in de balansmarkt en worden alle tussenproducten (waterstof, ammoniak, ammoniumnitraat) ook beschouwd als alternatieve marktkansen. Ook werd de kwantificering van de business case gedaan, zonder rekening te houden met een subsidievorm en zonder rekening te houden met inkomsten uit bilaterale contracten met netbeheerders voor netbalancing. De parameters die voor dit onderzoek worden gebruikt, zijn onderverdeeld in drie groepen en weergegeven in tabel 1: 1) de kosten van de installatie en installaties; 2) de marktwaarde van de grondstoffen; en 3) de interconnectiekosten van het net.

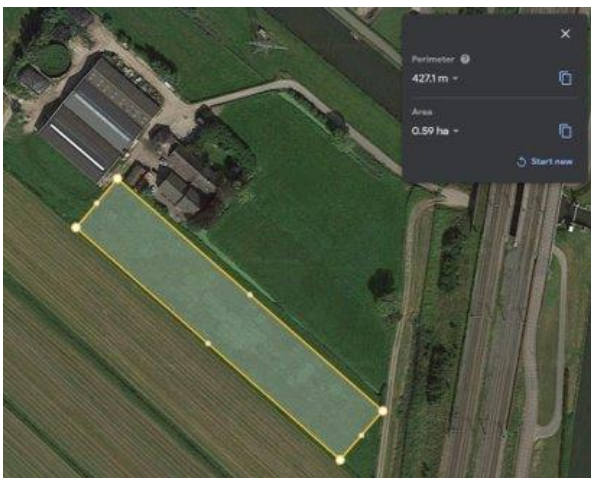
Type	Kostenparameters	Eenheid	Waarde
Kosten plant	Investing zonnepanelen (PV-systeem)	€/kW	500
	Investing elektrolyser	€/kW	1,400
	Investing nitrogen separation unit	€/Nm <sup>3</sup> _N <sub>2</sub> -h	60,000
	Overige kosten module 1	€/kg_H <sub>2</sub>	2

	Investering Kellog reactor en attributen	€/ton_NH3	1,980
	Investering 200 bar compressor	€/ton_NH3	150
	Investering nitric acid reactor en attributen	€/ton_AN	350
	Overige kosten module 2B	€/ton_AN	100
	Investering voor Flexi-booster formule	€/ha	10
	Installatiekosten	€/kW_e	150 <sup>1</sup>
	Administratiekosten	€/y	200,000
	Vaste operatie- en onderhoudskosten	c€/€-y	4
	Gewogen gemiddeld kapitaal	%	6
	Economische duur	y	15
Marktprijzen	Kosten water	€/m3	1.1
	Prijs booster	€/ha	300
	Kosten van overige mestverbindingen	€/ha	100
	Prijs van zuurstof	€/kg_O2	0
	Prijs van waterstof	€/kg_H2	2.5
	Prijs van ammoniak	€/ton_NH3	800
	Prijs van ammoniak nitrate	€/ton_AN	700
	Prijs van ons eindproduct	€/ha	1,000
Aansluitkosten	Aansluitkosten aan elektriciteitsnet (eenmalig)	€/kW_e	56
	Transportkosten (per kWh van elektriciteitsvraag)	€/MWh	9.7
	Vaste aansluitkosten per jaar	€	1,174
	Variabele aansluitkosten per jaar, capaciteitsafhankelijk	€/kW	12.72
	Blindvermogen tarief	€/kVAR	0.0088
	Elektriciteitsbelasting voor onze capaciteit	€/MWh	0.57

Tabel 1: Kostenparameters van het bedrijfsmodel die gebruikt zijn in deze studie.

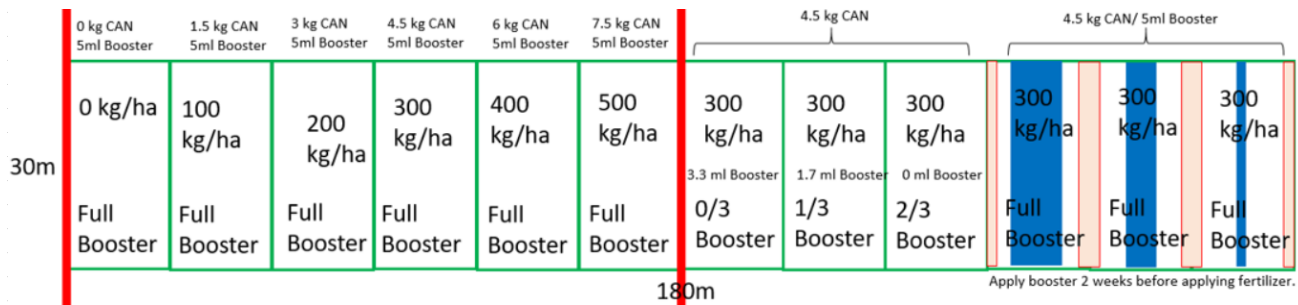
## 2.4. Mycorrhiza booster experiment

Om het potentiële voordeel van de mycorrhiza op Nederlandse bodem te meten zijn we gestart met een veldexperiment op het partnerbedrijf, volgens het reguliere bemestingsschema van hun grond. Dit experiment vindt plaats op een stuk grasland van 180M bij 30M. Zie onderstaande figuur.



Figuur 4. Satellietbeeld van het gebruikte stuk grond tijdens het experiment bij Boerderij C & J A Zagt Maatschap.

Het land is verdeeld in 12 percelen van 15M bij 30M. Om de voordelen van de mycorrhiza booster te meten – in termen van bodemwortelleven en grasopbrengsten – heeft elk perceel een andere mix van mycorrhiza booster en meststof gekregen.



Figuur 5: Overzicht van de verdeling van percelen in het experiment, inclusief de verspreiding van gebruikte inputs.

- Een volledige booster van mycorrhiza is gelijk aan 9 ml per perceel en 1/3 is gelijk aan 3 ml per perceel. Er zijn mestkorrels toegepast op elk perceel van 15M x 30M, **evenredig met 300 kg/ha.**
- Op de eerste zes percelen (links in de figuur) werd een volledige booster toegepast, met verschillende hoeveelheden mestkorrels.
- Op perceel 7, 8 en 9 is geen, 1/3 of 2/3 van de mycorrhizabooster aangebracht en een constante hoeveelheid mestkorrels is aangebracht, **evenredig met 300 kg/ha.**
- Op perceel 10, 11 en 12 hebben we een volledige booster van mycorrhiza (blauwe delen in figuur) en mestkorrels in de verhouding 300 kg/ha (gele delen in figuur), maar beide op verschillende delen van het perceel toegepast. De filosofie hierachter is dat grasland met nutriëntenschaarste voedingsstoffen efficiënter zal verdelen en daarmee betere resultaten oplevert.

Parameters om te controleren zijn:

- 1) Bodemkwaliteitsparameters gemeten middels grondmonsters, uitgevoerd door Eurofins. Voordat de mycorrhiza en de meststof zijn toegebracht, is één grondmonster als nulmeting van het gehele experimentele grasland afgenomen door Eurofins – om de betrouwbaarheid en validiteit van het experiment te waarborgen. Dit bodemmonster is op 14 juni genomen. Nog eens twee bodemmonsters, van de percelen 3 en 7, zijn op 31 oktober genomen om de tussentijdse effecten van de mycorrhiza booster te meten.
- 2) Opbrengsten zijn geoogst op 29 juli en 29 september.

### Hypothese

De resultaten zijn te verwachten een jaar na het toevoegen van de mycorrhizabooster en het afronden van een volledige mestcyclus:

1. Percelen die behandeld zijn met de mycorrhizabooster tonen betere resultaten in termen van opbrengsten en bodemleven dan niet-behandelde percelen.

### 3. Achtergrondinformatie

In de resultatensectie van deze haalbaarheidsstudie formuleren we beknopte antwoorden op de onderzoeksvragen die we hebben geformuleerd om ons te helpen de haalbaarheid van ons project te beoordelen. We erkennen echter dat het voor sommige lezers van dit rapport potentieel noodzakelijk is om ook kennis te maken met achtergrondinformatie over verschillende onderwerpen, om de resultaten volledig te begrijpen. In dit deel wordt daarom deze achtergrondinformatie gegeven met betrekking tot i) module 1, bestaande uit beschrijvingen van de toegenomen behoefte aan netflexibiliteit (3.1) en de stijgende interconnectiekosten (3.2); ii) module 2, bestaande uit actuele beschrijvingen van de productie van meststoffen (3.3), beschrijvingen van de meststoffenmarkt (3.4) en

beschrijvingen van het regelgevingskader (3.5); en ten slotte iii) Module 3, bestaande uit achtergrondinformatie over de aard en werking van mycorrhiza (3.6).

### 3.1. De behoefte aan flexibiliteit op het elektriciteitsnet

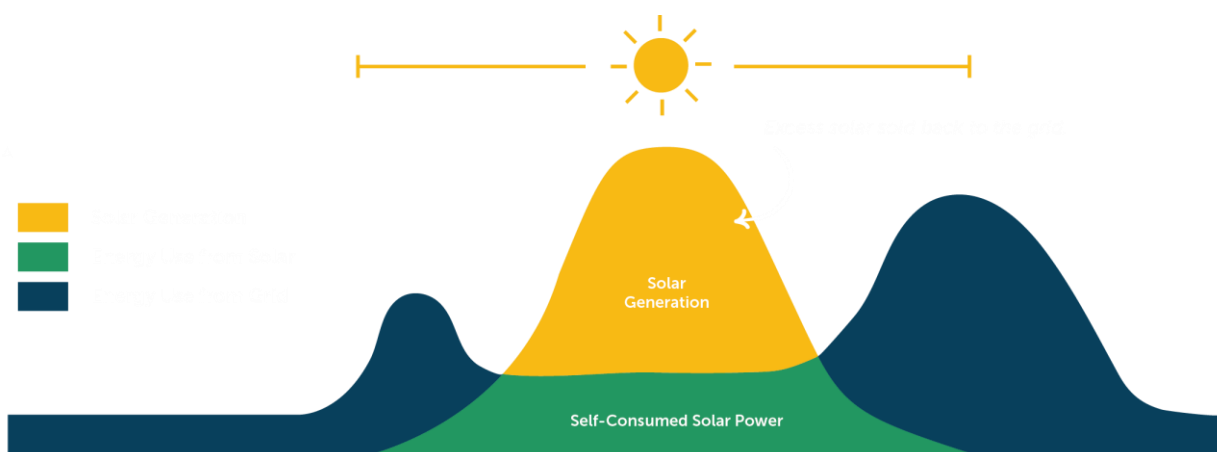
#### Toenemende behoefte aan flexibiliteit

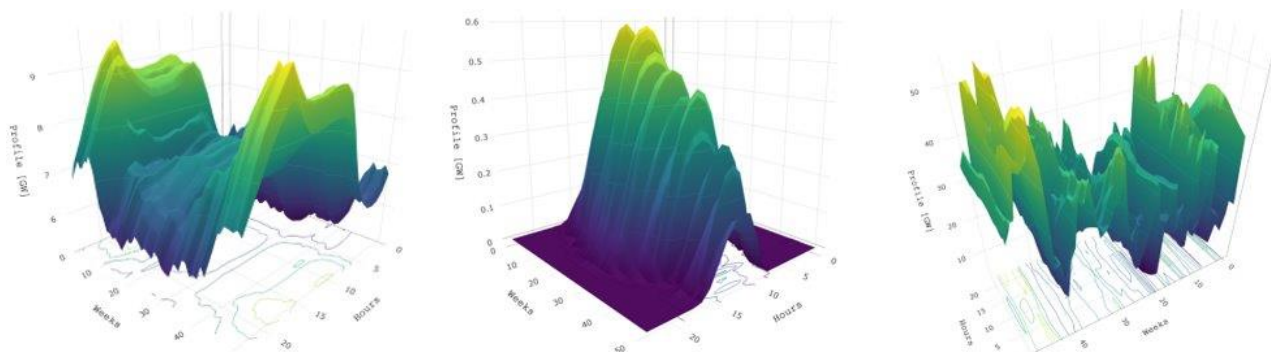
De behoefte aan flexibiliteit van het net zal in de loop van de tijd toenemen als gevolg van de groeiende hernieuwbare productiecapaciteit, de elektrificatie van de energievraag en de mismatch tussen vraag- en aanbodprofielen (zie figuur 3.1.). Deze flexibiliteit kan worden geboden door elektrolyzers die inspelen op prikkels van de netbeheerder, Transmissiesysteembeheerder (TSO) TenneT in Nederland. De mismatch tussen vraag en aanbod vormt een groot risico voor de energietransitie. Nieuwe zonne- en windparken kunnen in grote delen van het land niet op het net worden aangesloten, terwijl meer dan 7000 bedrijven wachten om op het net te worden aangesloten. Zoals blijkt uit de **position paper** van de netbeheerders, zal netversterking de uitdaging slechts gedeeltelijk oplossen. De behoefte aan flexibiliteit wordt nu al geïllustreerd door het bestaan van (on)gebalancerende markten.

#### Wat zijn balansmarkten?

Elk kwartier moeten elektriciteitsproductie en -verbruik in balans zijn op het net. Dat is de verantwoordelijkheid van TenneT. Het kan echter op minuutbasis afwijken als gevolg van een plotseling verlies van wind of een grote fabriek die een storing heeft. Dit zorgt voor onbalans. TenneT probeert dit passief te sturen via prijsprikkels, maar dat is niet altijd voldoende. De resterende onevenwichtigheid wordt weggewerkt met behulp van reservecapaciteit, die TenneT vooraf inkoopt op de balansmarkten. Op deze manier zorgt TenneT ervoor dat zij ten allen tijde over de benodigde middelen beschikt om de systeembalans te behouden. Marktpartijen die reservecapaciteit aanbieden, worden vergoed op basis van prijsvorming in de balansmarkt.

Module 1 biedt Flexiliser – een kleiner bedrijf met een 1 of 2 MW elektrolyser – en in de toekomst als aggregator met een hogere capaciteit, de potentie om deel te nemen aan de day-aheadmarkt, balansmarkt en/of het noodvermogen). Deelname aan de elektriciteitsmarkt komt zowel Flexiliser als de energietransitie ten goede, omdat er meer flexibiliteit wordt geboden aan het net. De onderstaande figuur illustreert het profiel van zowel vraag als aanbod van hernieuwbare energie en verduidelijkt grafisch welke behoefte Flexiliser tracht te vervullen





Figuur 6: Een illustratie van de mismatch tussen vraag en aanbod en het opwekken van hernieuwbare energie. Boven: Visualisering van de dagelijkse mismatch tussen vraag naar elektriciteit en opwekking van zonne-energie. Linksonder: Nederlandse netwerkbelasting per uur per dag van het jaar, bron: redbacktech.com. Centraal-onder: Nederlandse opwekking van zonne-energie per dag van het jaar. Rechtsonder: Nederlandse opwekking van windenergie per dag van het jaar.

### 3.2. Tarieven elektriciteitsaansluiting

Bij het maken van vroege berekeningen, tijdens het aanvraagproces van de subsidie voor de haalbaarheidsstudie, hebben we van verschillende partijen te horen gekregen dat de kosten voor een elektriciteitsaansluiting een 'business killer' zijn. Het aansluiten van een elektrolyser van 1 of 2 MW op het net, mogelijk gedeeltelijk aangedreven door zonne-energie, vereist een nieuwe aansluiting met een hogere capaciteit. De kosten van een aansluiting met een hogere capaciteit zijn aanzienlijk en zullen de komende jaren toenemen.

Momenteel brengt STEDIN kosten in rekening voor vijf verschillende componenten: 1) aansluitkosten, die worden bepaald op basis van de afstand tot het aansluitpunt en de vereiste transmissiecapaciteit; 2) een periodieke aansluitvergoeding die zowel per jaar als per maand in rekening wordt gebracht; 3) een netvergoeding afhankelijk van de grootte van de interconnectie; 4) de variabele transportkosten per eenheid vervoerde energie; en 5) de vermogenscomponent. Voor ons project zijn de aansluitkosten die STEDIN in aanmerking neemt de volgende:

Kostenopbouw	Prijs
<b>Aansluitkosten</b>	56,000 €
<b>Periodieke aansluitvergoeding</b>	730 €/jaar + 37 €/maand
<b>Netvergoeding</b>	12.72 €/kW-jaar
<b>Variabele transportkosten</b>	0.97 c€/kWh
<b>Vermogenscomponent</b>	0.88 c€/kVARh

Tabel 2. Overzicht van de aansluitkosten

Ook is het belangrijk om te vermelden dat deze kostenopbouw momenteel ter discussie staat. Aan de ene kant is het mogelijk dat consumenten worden blootgesteld aan hogere interconnectiekosten naarmate de energietransitie de uitdaging voor DSO's vergroot. Aan de andere kant bestaat de mogelijkheid dat technologieën die congestie in de distributienetwerken kunnen verlichten, worden beloond met lagere (of zelfs negatieve) interconnectiekosten. Daarom zal een grondige blik op de toekomst van de interconnectiekosten belangrijk zijn om de zekerheid van onze gerapporteerde waarnemingen verder te vergroten.

### 3.3. Ammoniak en kunstmestproductie

Synthetische meststoffen zijn essentieel om voldoende voedselproductie te garanderen, maar de wereldwijde productie is tegenwoordig zelden duurzaam. Ammoniak is de belangrijkste bouwsteen van kunstmest. Ammoniakverbindingen worden gebruikt om stikstof aan planten te leveren en gewassen te laten groeien om de versnelde stikstofverwijdering uit de bodem te compenseren. De twee meest voorkomende chemische routes om chemicaliën op de bodem aan te brengen, zijn door ureum- en nitraatderivaten, en beide vereisen dat ammoniak eerst wordt geproduceerd.

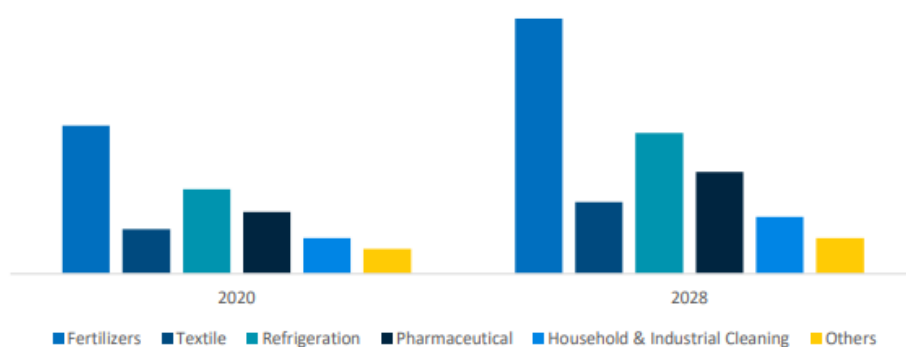
Ammoniak (NH<sub>3</sub>) wordt het vaakst geproduceerd via het Haber-Bosch-proces sinds het voor het eerst werd gepatenteerd aan het begin van de twintigste eeuw. In dit proces reageren waterstof en stikstof bij hoge druk en temperatuur. Het meest emissie-intensieve proces heeft betrekking op de productie van waterstof. Dit wordt geproduceerd uit aardgas (methaan) tijdens het stoommethaan hervorming proces (SMR). Hierbij komt alle resterende koolstof (in CO<sub>2</sub>-vorm) vrij in de atmosfeer (The Royal Society, 2020). Nederlandse producenten hebben ongeveer 1000 m<sup>3</sup> aardgas nodig om 1 ton NH<sub>3</sub> te produceren, wat overeenkomt met 1,95 ton uitgestoten CO<sub>2</sub>.

Het vervangen van fossiele brandstoffen door duurzame alternatieven zou leiden tot een aanzienlijke vermindering van de CO<sub>2</sub>- en stikstofuitstoot. Groene waterstof is een geschikt alternatief. Naar schatting 20% van de energie in de wereld zal in 2050 waterstofenergie zijn en we zien nu al bedrijven naar deze bron verschuiven, bijvoorbeeld CF Industries, Topsoe en ThyssenKrupp (Fortune Business Insights, 2021).

### 3.4. Ammoniak en kunstmestmarkten

De wereldwijde marktomvang van ammoniak bedroeg 67,01 miljard USD in 2020. Na een daling van 16,8% in 2020 vanwege Covid-19, zal de markt naar verwachting groeien van 71,98 miljard USD in 2021 tot 110,93 miljard USD in 2028 bij een CAGR van 6,4% in de periode 2021-2028 (Fortune Business Insights, 2021). Drijvende factoren achter de stijging van de marktwaarde zijn de stijgende kunstmestconsumptie als gevolg van de toegenomen landbouwproductie. Deze vereiste toename van de landbouwproductie wordt op zijn beurt veroorzaakt door bevolkingsgroei en de groei van de gemiddelde voedingsinname per persoon.

Het belangrijkste marktsegment van ammoniak is de landbouw. De meeste ammoniakkopers zijn bedrijven in de landbouw of de chemische industrie. Ongeveer 80% van alle ammoniak wordt geproduceerd voor meststoffen (AMMPOWER, 2022). Landbouwproducenten richten zich vooral op de inkoop van ammoniumfosfaatmeststoffen. Niet-agrarische ammoniakkopers produceren het vaakst caprolactam, acrylonitril of ammoniumnitraat bedoeld voor explosieven van explosieve kwaliteit (Shaddick, 2020). Volgens Fortune Business Insights (2021) zal de ammoniakmarkt in de periode tussen 2020 en 2028 blijven groeien, vooral in het marktsegment van meststoffen.



Figuur 7: Winst van de wereldwijde ammoniakmarkt in USD, per afzetmarkt, bron: Fortune Business Insights, 2020m p.41

De ammoniakprijzen bleven tussen 2017 en 2020 tussen de 200 en 400 USD per ton. Tijdens de Covid-19-pandemie en later vanwege problemen met de toeleveringsketen als gevolg van geopolitieke conflicten, piekte de ammoniakprijs begin 2022 echter rond de 1300 USD per ton (AMMPOWER, 2022). De prijzen stegen wereldwijd als gevolg van de exportbeperkingen voor meststoffen door China om aan de binnenlandse vraag te voldoen. Bovenop deze factoren verslechterde de geopolitieke situatie verder en bereikten de prijzen een recordhoogte (Procurement Resource, n.d.). In het tweede kwartaal van 2022, toen de kunstmestprijzen in Europa gemiddeld 919-988 USD/ton (Baltische ammoniak) en 938-960 USD/ton (ammoniak uit de Zwarte Zee) bedroegen. In Noord-Amerika waren de prijzen hoger: Tampa (Florida) ammoniak was 1000 USD/ton in juni 2022. Dit is een daling van 30% in vergelijking met de 1425 USD/ton in mei 2022. De totale prijzen liggen echter nog steeds 87% hoger dan vorig jaar (Procurement Resource, n.d.). Quinn (2022) bevestigt dit beeld van een langzame daling van de prijzen na een recordhoogte.

### 3.5. Wet- en regelgeving ammoniakgebruik

Chemische producten mogen niet vrij gebruikt, geproduceerd of verkocht worden. Voordat een bedrijf het chemische product mag gebruiken of verkopen, moet het de risico's van het werken met de chemische stof onderzoeken. Voor zogenaamde 'zeer zorgwekkende stoffen' (ZZS), zijn er strikte overheidsregels en -voorschriften om het maatschappelijk en ecologisch welzijn te waarborgen (RIVM, n.d.). Alle geldende wet- en regelgeving zal in de nabije toekomst worden gebundeld in de Omgevingswet en gedelegeerde wetgeving, en totdat de formele invoering van de Omgevingswet plaatsvindt, is de meeste informatie te vinden in de WABO (Wet Algemene Bepalingen Omgevingsrecht). Bedrijven moeten melden of ze ZZS-stoffen uitstoten en kunnen door overheden worden verplicht om hun uitstoot te meten. De Nederlandse overheid hanteert Europese regels met betrekking tot de uitstoot van gevaarlijke stoffen en is verantwoordelijk voor het meten van emissies, het opleggen van wettelijke normen en de beoordeling van bepaalde stoffen. Het Europees Agentschap voor chemische stoffen (ECHA) is verantwoordelijk voor het verzamelen van informatie over chemische stoffen en bepaalt het verbod of de beperking van stoffen door middel van wetgeving. ECHA heeft bijvoorbeeld wetgeving gemaakt over de indeling, etikettering en verpakking van chemische stoffen (CLP) en de handel in en het gebruik van biociden en regelgeving die gericht is op de bescherming van de menselijke gezondheid en het milieu (REACH) (ECHA1, n.d.).

Watervrije ammoniak, een essentiële chemische stof voor de productie van meststoffen, is een gevaarlijke stof die ernstige huidverbrandingen veroorzaakt, oogbeschadiging en verminderde vruchtbaarheid kan veroorzaken, giftig is bij inademing, zeer giftig is voor het waterleven en een ontvlambaar gas is dat kan ontploffen (ECHA2, n.d.). Deze stof valt onder de ECHA-wetgeving (REACH en CLP) en heeft grenswaarden voor beroepsmatige blootstelling (OEL's). In de Europese Unie zijn de LTEL-waarden (Long-Term Exposure Limits) 14,0 mg/m<sup>3</sup> en 20,0 parts per million (ppm). STEL-waarden (Short Term Exposure Limits) zijn 36,0 mg/m<sup>3</sup> en 50,0 ppm (ECHA2, n.d.). LTEL verwijst naar gemiddelde blootstelling gedurende 8 uur en STEL verwijst naar gemiddelde blootstelling gedurende 15 minuten (SER, n.d.; Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, 2006). In andere landen worden verschillende normwaarden gehanteerd (SER, n.d.).

Ammoniak is ook verkrijgbaar als verdunde stof. De kenmerken van de stof verschillen wanneer de verhouding, temperatuur en dichtheid veranderen. Dit resulteert in verschillende regelgeving en verschillende risicobeoordelingen (ECHA3, n.d.).

Via de REACH- en CLP-helpdesks kunnen we alle informatie vinden die we nodig hebben over bepaalde stoffen en in hoeverre de stof gereguleerd is. Een andere leidraad voor ons bij het ingaan van de volgende fase is de Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), waarvan PGS 12 met name gaat over de opslag en het transport van ammoniak.

### 3.6. Mycorrhiza in de bodem

Tachtig procent van de landbouwgrond lijdt aan matige tot ernstige erosie, die grotendeels te wijten is aan intensieve teelt (Pimentel & Burgess, 2013). Arbusculaire mycorrhizaschimmels (AMF) hebben de afgelopen jaren veel aandacht getrokken van wetenschappers en boeren, vanwege de potentie om een vermindering van het gebruik van kunstmest mogelijk te maken zonder verlies van gewasopbrengst (Bender, Wagg & Van der Heijden, 2016; Berruti et al., 2016). Ook kan het de verdediging van planten tegen plagen en ziekteverwekkers verhogen en zo de kosten van pesticiden verlagen. Dit resulteerde in een toenemend aanbod van en vraag naar commerciële mycorrhizaproducten voor landbouwpraktijken (Pickles et al., 2020).

AMF zijn schimmels die een symbiotische, wederzijds voordelige relatie met planten aangaan. 80 tot 95% van de landplanten profiteert van deze symbiose (Down To Earth Fertilizer, 2018). De symbiose is gebaseerd op de uitwisseling van suikers, voedingsstoffen en water. De plant voorziet de schimmel van suikers die worden geproduceerd door fotosynthese. De schimmel voorziet de plant in ruil daarvoor van voedingsstoffen en water dat ze uit de bodem hebben gehaald (Down To Earth Fertilizer, 2018). De symbiotische relatie resulteert dus in 'extraradicale myceliale proliferatie' in de bodem, die het gebied uitbreidt waaruit de plant fosfor (P) en andere voedingsstoffen kan verkrijgen, zoals stikstof (N) (Ames et al., 1983), koper en zink (Liu et al., 2000). Door de opname



van deze voedingsstoffen te verhogen en daarmee de gezondheid van de plant te verhogen, kan AMF zorgen voor betere plantengroei en gewasopbrengsten (Bagyaraj & Ashwin, 2017).

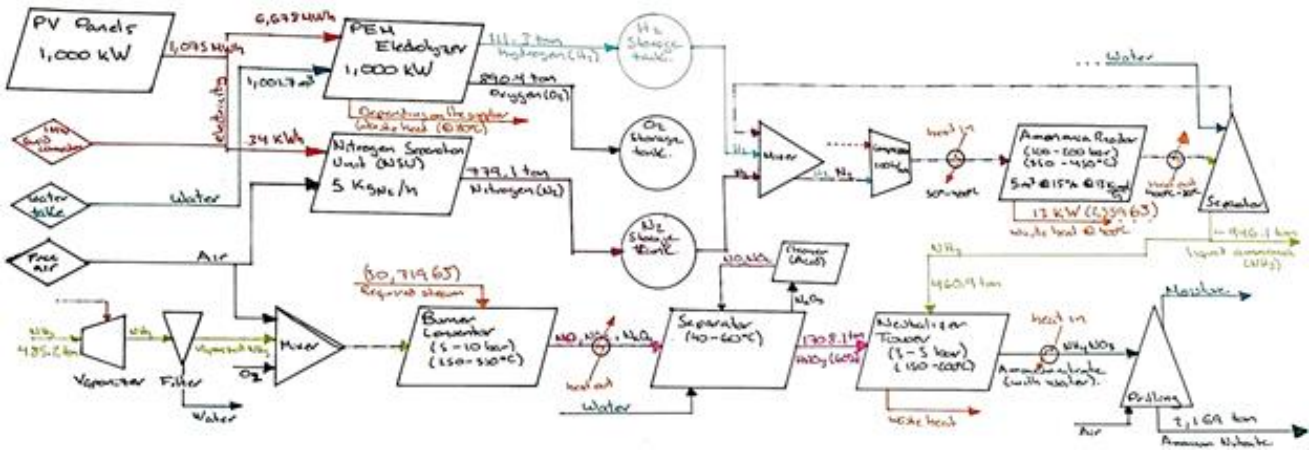
De effecten van mycorrhiza op de bodemgezondheid en de behoefte aan meststoffen worden verder beschreven in de resultatensectie, aangezien deze een belangrijk onderzoeksonderwerp vormen van deze haalbaarheidsstudie.

## 4. Resultaten

### 4.1. Technische beschrijving van het proces

Het *proces flow diagram* is hieronder weergegeven in figuur 17. Ten eerste gebruiken we een mix van elektriciteit uit het netwerk en lokaal opgewekte elektriciteit door fotovoltaïsche panelen om de elektrolyser en NSU van stroom te voorzien. Deze apparatuur genereert de waterstof en stikstof die nodig zijn in het proces. Een hogedrukcompressor wordt gebruikt om de ammoniakreactor over de 100 bar te houden, waar de waterstof en stikstof zullen reageren om ammoniak te produceren. De selectiviteit van de reactie is vrij laag, dus het is noodzakelijk om de niet-gereageerde gassen (die terug naar de reactor worden gerecirculeerd) te scheiden (door af te koelen) van de geproduceerde ammoniak. Dit systeem vereist warmtewisselaars om warmteverspilling te minimaliseren en de procesefficiëntie te verhogen.

Een deel van de verkregen ammoniak wordt verder verwerkt tot salpeterzuur. Dit gebeurt door ammoniak bij hoge temperaturen te mengen met zuurstof, waardoor alle combinaties van stikstofoxiden ontstaan. Deze stikstofoxiden, die zeer goed oplosbaar zijn in water, worden behandeld met water en zwavelzuur, wat zorgt voor een stikstofconversie-efficiëntie naar salpeterzuur van meer dan 99%. De resulterende salpeterzuuroplossing (60%) wordt geneutraliseerd met ammoniak om ammoniumnitraat te produceren. Dit wordt later gedroogd en gepelletiseerd om de uiteindelijke vorm van het product te verkrijgen. Deze processen vereisen ook hulpwarmte, die met warmtewisselaars aan het proces wordt geleverd.



Figuur 8: Processtroom diagram, voortkomend uit werkgroepen met TNO.

### 4.2. Wettelijke verplichtingen

In de resultaten die in het vorige hoofdstuk werden gepresenteerd, werden verschillende wet- en regelgeving geïdentificeerd als relevant en van toepassing op Flexiliser. Kortom, de Omgevingswet is bij de formele vaststelling volgend jaar de belangrijkste wetgeving om aan te voldoen. Tot die tijd is zijn voorganger WABO (Wet Algemene Bepalingen Omgevingsrecht) van toepassing. Voor de chemische productie-installatie hebben we vergunningen nodig op grond van deze wetten. Via de REACH- en CLP-helppdesks kunnen we alle informatie vinden die we nodig hebben over bepaalde stoffen en in hoeverre de stof gereguleerd is. Een andere leidraad voor ons bij het ingaan van de volgende fase is de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS), waarvan PGS 12 met name gaat over de opslag en het transport van ammoniak.

Ten aanzien van module 3 zijn de import- en exportregels van Mexico, de EU en Nederland relevant. We willen onze samenwerking met het Mexicaanse laboratorium voortzetten, omdat we veelbelovende resultaten hebben met betrekking tot de toepassing van de mycorrhiza-booster en we een goede relatie hebben om op voort te bouwen. Met betrekking tot micro-organismen in bemestingsproducten verwijst artikel 4 van EU-verordening 2019/1009 naar de bijlagen I en II voor de eisen waaraan moet worden voldaan voor productfunctiecategorieën (PFC) en bestanddelencategorieën (CMC). Onze booster voldoet aan de eisen van PFC 6(A), een microbiële biostimulant voor planten die streeft naar efficiëntie in het gebruik van voedingsstoffen en kwaliteitskenmerken. Wat de toegestane CMC's betreft, omvat bijlage II mycorrhiza funghi, ons product. Kortom, het boostermengsel dat we willen onderzoeken en toepassen op de bodem, voldoet aan de wettelijke eisen van de EU en daarmee aan de Nederlandse wettelijke eisen.

### 4.3. Opbouw kosten voor de verschillende modules

We richten het resultaat van de algehele haalbaarheid op de kosteneffectiviteit van de productie van ammoniumnitraat. Dit doen we vanwege het verschil in aard tussen de commerciële aanpak tussen de productie van ammoniumnitraat en het eindproduct Flexibooster. Het uiteindelijke landbouwproduct heeft zonder twijfel een enorm economisch potentieel, maar de winstgevendheid ervan is meer afhankelijk van het boosterproduct, de variabiliteit van de materiaalprijzen en de marketingstrategie waarmee we besluiten het product te verkopen en te beprijken. Daarentegen heeft ammoniumnitraat een duidelijke marktniche, er is een marktdeelprijs (die nauw samenhangt met aardgasprijschommelingen) en als we de markt willen betreden, moeten we in die prijsklassen concurrerend kunnen zijn. Daarom wordt de algehele kosten-prestatie haalbaarheid hier gerapporteerd in termen van kosten en inkomsten van de verkoop van ammoniumnitraat.

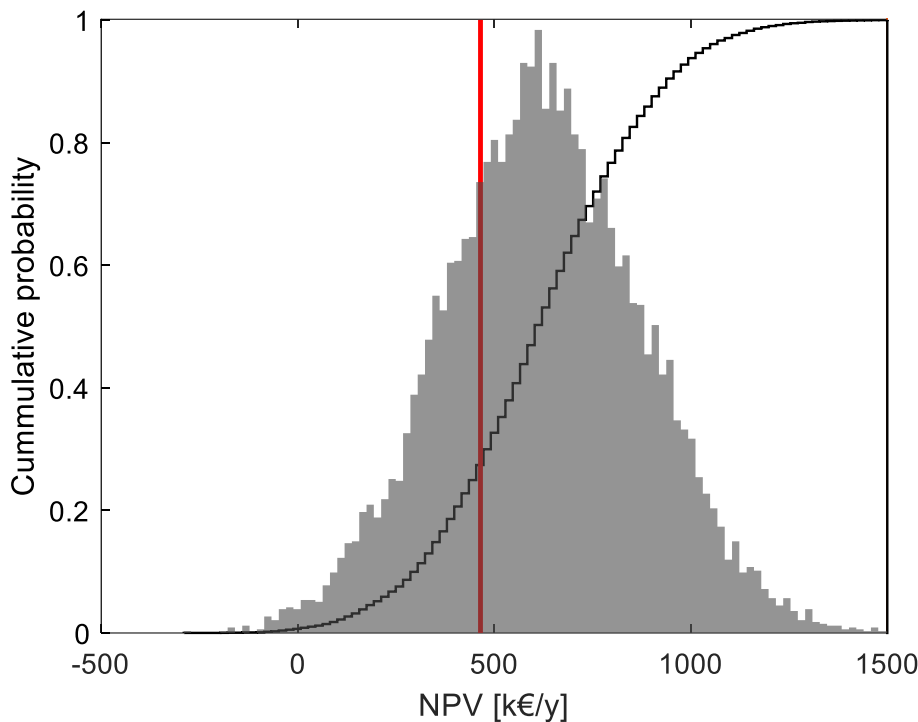
Met de fabrieksinstellingen die in bovenstaande secties worden beschreven, zouden we in staat zijn om 2.226 ton/jaar ammoniumnitraat te produceren, dat wordt verkocht tegen een marktprijs van 700 €/ton (gematigde aanname, vooral in vergelijking met de huidige marktprijzen), zou een omzet van 1.558.200 €/j kunnen opleveren. De totale investering die nodig is om de apparatuur die nodig is in module 1 en 2 aan te schaffen en te installeren, bedraagt 5,35 miljoen euro. De totale operationele kosten (excl. financiering en kapitaalbetalingen) bedragen 600 duizend euro per jaar. Deze cijfers zorgen voor een eenvoudige terugverdientijd van minder dan zes jaar. Zoals vermeld in tabel 3, bedragen de totale geannualiseerde kosten, uitgaande van een disconteringsvoet van 6% en een economische levensduur van 15 jaar, 1.144 duizend euro per jaar, wat de fabriek waardeert met een NCW van 465 duizend euro per jaar. Dit resulteert in een netto kapitaalefficiëntie van meer dan 10%, die in een toekomstige fase wanneer het financiële plan van de fabriek wordt ontworpen, een breed scala aan financieringsalternatieven mogelijk moet maken. Over het algemeen een opmerkelijke kostenefficiëntieprestatie, vooral voor een volledig groen project.

<b>Vereiste investering [k€]</b>	5,347.0
<b>Vaste operationele en onderhoudskosten [k€/j]</b>	419.8
<b>Variabele operationele kosten (exc. elektriciteit) [k€/j]</b>	4.1
<b>Elektrcriteitskosten (incl. transportkosten) [k€/j]</b>	171.7
<b>Totale kosten * [k€/j]</b>	1,144.1

Tabel 3: Opmaak van totale kosten voor de verkoop van ammoniumnitraat. \*Investerings zijn geannualiseerd overeenkomstig met de disconteringsvoet en de levensduren gepresenteerd in sectie 2.

Zoals vermeld in figuur 9, laat de algemene Monte-Carlo-analyse zien dat de referentie-NCW een waarschijnlijkheid van meer dan 70% heeft. Terwijl de voor het project vastgestelde gemiddelde NCW dicht bij de 600 k€/j ligt. Het is

belangrijk om te vermelden dat minder dan 5% van de simulaties een negatieve NPV meldde, en deze vonden alleen plaats onder zeer ongunstige marktomstandigheden voor ammoniumnitraat.

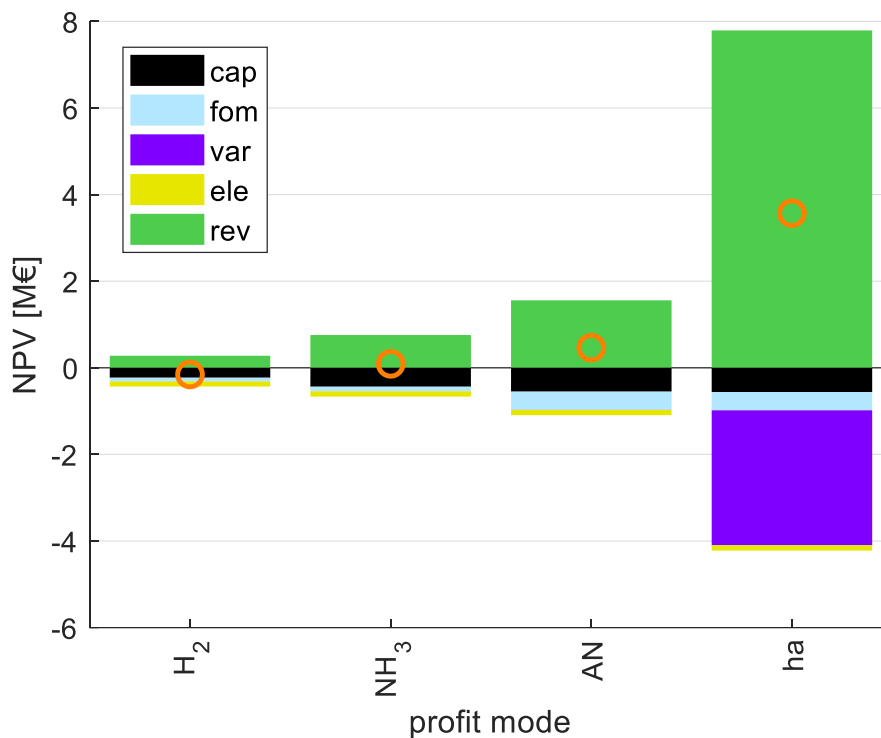


Figuur 9: Stochastische analyse voor onzekerheden bestaande uit 10.000 willekeurige trials met waarden tussen de boven weergegeven limieten.

#### 4.4. Kosteneffectiviteit voor alternatieven

De modulaire opbouw van Flexiliser opent de deur naar de verkoop van verschillende producten. Vandaar dat een van de belangrijkste vragen om te beantwoorden was welk product het meest winstgevend is om te verkopen. Hiervoor hebben we een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd waarin we de installatie hebben ontwikkeld voor zover dat nodig is om 1) waterstof, 2) ammoniak, 3) ammoniumnitraat en 4) Flexibooster, ons beoogde kernproduct, te verkopen. De omvang van elke module komt overeen met de werkelijke omvang van de volledig geïntegreerde (we verkopen bijvoorbeeld de 111,3 ton waterstof geproduceerd door de 1 MW elektrolyser). De marktprijzen die voor deze analyse worden gebruikt zijn: voor waterstof 2,5 €/kg, voor ammoniak 800 €/ton, voor ammoniumnitraat 700 €/ton en voor het landbouwproduct 1.000 €/ha.

De resultaten zijn weergegeven in figuur 19. Hier zien we dat, zoals verwacht, de winstgevendheid van de fabriek toeneemt met een grotere verticale integratie. Dat is een logische conclusie, want we zijn de toegevoegde waarden van de verschillende supply chains aan het cumuleren. We zien ook dat de efficiëntie van het mestgebruik van module 4 de grootste kansen biedt voor het genereren van toegevoegde waarde. We moeten opmerken dat we zeer conservatieve waarden hebben genomen voor alle vier de bedrijfsmodellen en achten het waarschijnlijk dat de bedrijfsmodellen voor waterstof, ammoniak en ammoniumnitraat beter presteren dan hier is berekend (de huidige waterstofprijzen liggen bijvoorbeeld ver boven de 2,5 €/kg).



Figuur 10: Grafiek waarin de uitkomst van het bedrijfsmodel in verschillende markten wordt vergeleken.

#### 4.5. Emissiereductie

Flexiliser vermindert de uitstoot van broeikasgassen voornamelijk op twee manieren: ten eerste door CO<sub>2</sub>-emissies van waterstofproductie in module 1 te vermijden, en ten tweede door stikstofemissies via de bodem door het gebruik van meststoffen te vermijden als gevolg van verhoogde retentie-efficiëntie, bereikt door Flexibooster in modules 2 en 3. We reduceren bijna 10 ton CO<sub>2</sub> per ton geproduceerde H<sub>2</sub>, en gemiddeld 1,27 ton CO<sub>2</sub>eq. per hectare veld<sup>5</sup> waar Flexibooster wordt toegepast. De reductie van CO<sub>2</sub> in het waterstofproductieproces vindt plaats omdat bijna alle scope 1-emissies die voorkomen bij de productie van grijze waterstof afwezig zijn in ons systeem. Verder nemen onze scope 2-emissies geleidelijk af naarmate we de groene elektriciteitsinput voor onze elektrolyser verhogen. De reductie van 1,27 ton CO<sub>2</sub>eq. per hectare veld is een gevolg van het feit dat we de helft van de normale hoeveelheid kunstmest gebruiken, wat leidt tot een reductie van 50%. Van de overige 50% zit minstens 10% meer stikstof in de grond en dus in totaal 55% van de normale 2,3 ton CO<sub>2</sub>eq. per hectare wordt verminderd, wat een reductie van 1,27 ton is per hectare veld waarop we Flexibooster toepassen. De resterende emissiewaarde (met het potentieel voor verdere reductie, vooral omdat het duurzaam geproduceerde meststof is) is 1,03 ton CO<sub>2</sub>eq. per hectare veld.

#### Integrale risico-analyse

Op verzoek van TNO hebben wij een gedegen risicobeoordeling uitgevoerd. Het doel van de risicobeoordeling was om alle risico's en daaruit voortvloeiende effecten voor de haalbaarheid van ons project in kaart te brengen. Dit is de basis waarop TNO en potentiële andere partners kunnen beoordelen of volgende fasen groen licht moeten krijgen. TNO heeft in de volgende fase, de ontwerpfase, groen licht gegeven voor samenwerking op basis van de belofte van het businessmodel en de risicobeoordeling.

We hebben de risicobeoordeling uitgevoerd in samenwerking met een risicobeoordelingsexpert van een toonaangevend ingenieursbureau. De technische risicobeoordeling is samen met onze partners uitgevoerd. Risico's zijn geïdentificeerd voor de drie modules afzonderlijk en voor het project in het algemeen, waarbij gebruik is gemaakt van vijf verschillende categorieën:

1. Technisch; 2. economisch; 3. beleid; 4. financieel; en 5. juridische risico's.

Om dieper inzicht te krijgen in de keten van risico's zijn ook oorzaak en gevolg geanalyseerd, op basis waarvan beheersmaatregelen genomen kunnen worden, voor zover onze invloedssfeer dat toelaat. Mochten factoren buiten onze invloedssfeer veranderen, bijvoorbeeld op het beleidsterrein, dan is het nauwlettend volgen van beleidstrends en verwachtingen het best mogelijke om te doen. De laatste stap van de risicobeoordeling is het kwantificeren van de waarschijnlijkheid en ernst van de gevolgen.

De volgende twee risico's hebben de hoogste scores in onze risicobeoordeling en zijn dus geïdentificeerd als onze grootste risico's:

1. De wettelijke veiligheidseisen voor de installatie van module 1 en 2 zijn hoog, waardoor de kosten aanzienlijk stijgen;
2. Flexiliser is niet in staat om geschikte Haber Bosch-apparatuur aan te schaffen.

Voor beide risico's zijn we van plan om enkele noodzakelijke maatregelen te nemen of hebben we die al genomen. Hierin zijn het starten van de ontwerpfase en het samenwerken met een commerciële partner voor module 2 de belangrijkste stappen.

## 5. Conclusie van de haalbaarheidsstudie

De uitkomst van de haalbaarheidsstudie is positief. Het uitvoeren van de haalbaarheidsstudie heeft bij ons geleid tot een nog sterkere overtuiging dat Flexiliser is wat de energie- en voedselmarkten nodig hebben om het huidige systeem te verduurzamen. Het uitvoeren van de haalbaarheidsstudie heeft ons echter ook doen laten inzien dat we een commerciële partner nodig hebben om dit project naar de volgende fase te brengen. Resultaten zijn positief voor de samenleving en we verwachten een positieve business case, maar voordat we een pilot kunnen starten hebben we meer zekerheid nodig door onderzoek naar de chemische processen die onze Flexiliser-oplossing bevat. Hiervoor werken we aan een ontwerpfase voordat we beginnen met de pilotfase. Dat doen we in samenwerking met TNO die zich op dit moment al heeft gecommitteerd aan de volgende fase van Flexiliser. Ten slotte zijn we momenteel bezig met het opbouwen van een relatie met een commerciële partner om het consortium van partijen te voltooiën dat zal blijven werken aan het Flexiliser-project.

## Dankwoord

De auteurs willen de steun erkennen die niet alleen wordt gegeven door de partners en medewerkers die in het rapport worden genoemd, maar ook door de mensen die ons veel dingen hebben geleerd die nodig zijn om vorm te geven aan zo'n complex en onderling verbonden idee. Deze personen zijn Jan Zagt van Maatschap C & JA Zagt, Arend de Groot van TNO, Gonzalo Méndez van HIFA en Klaas Hofstra van Adverio Waste Systems.

Ook willen we Sverre van der Burg bedanken, die ons enorm heeft geholpen bij het verzamelen van gegevens en het verwerken van informatie die belangrijk was om het idee te ontwikkelen.

Tot slot willen we RVO bedanken die een groot deel van deze haalbaarheidsstudie heeft gefinancierd. We waarderen de belangstelling voor ons voorstel en het vertrouwen in ons om dit project uit te voeren enorm. De enthousiasmeboost na de positieve reactie op onze subsidieaanvraag is je haast niet voor te stellen. Behalve enthousiasme vervulde deze positieve uitslag ons met een groots verantwoordelijkheidsgevoel en plichtsbef. Wij hopen hieraan te hebben voldaan.

## Referenties

- Bowles, T. M., Barrios-Masias, F. H., Carlisle, E. A., Cavagnaro, T. R., & Jackson, L. E. (2016). Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. *Science of the Total Environment*, 566, 1223-1234.
- Cavagnaro, T. R. (2014). Impacts of compost application on the formation and functioning of arbuscular mycorrhizas. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 38-44.
- Cavagnaro, T. R., Bender, S. F., Asghari, H. R., & van der Heijden, M. G. (2015). The role of arbuscular mycorrhizas in reducing soil nutrient loss. *Trends in Plant Science*, 20(5), 283-290.
- De La Peña, E., Echeverría, S. R., Van Der Putten, W. H., Freitas, H., & Moens, M. (2006). Mechanism of control of root-feeding nematodes by mycorrhizal fungi in the dune grass *Ammophila arenaria*. *New Phytologist*, 169(4), 829-840.
- CHA1 (n.d.). Legislation. European Chemicals Agency. Retrieved June 24, 2022, from <https://www.echa.europa.eu/legislation>
- ECHA1 (n.d.). Substance Information. European Chemicals Agency. Retrieved June 24, 2022, from <https://echa.europa.eu/nl/substance-information/-/substanceinfo/100.028.760>
- George, E., Marschner, H., & Jakobsen, I. (1995). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in uptake of phosphorus and nitrogen from soil. *Critical reviews in biotechnology*, 15(3-4), 257-270.
- He, X., Liu, Y., Rehman, A., & Wang, L. (2021). A novel air separation unit with energy storage and generation and its energy efficiency and economy analysis. *Applied Energy*, 281, 115976.
- Kahiluoto, H., Ketoja, E., & Vestberg, M. (2009). Contribution of arbuscular mycorrhiza to soil quality in contrasting cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134(1-2), 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.016>
- Maffei, G., Miozzi, L., Fiorilli, V., Novero, M., Lanfranco, L., & Accotto, G. P. (2014). The arbuscular mycorrhizal symbiosis attenuates symptom severity and reduces virus concentration in tomato infected by Tomato yellow leaf curl Sardinia virus (TYLCSV). *Mycorrhiza*, 24(3), 179-186.
- Mardukhi, B., Rejali, F., Daei, G., Ardakani, M. R., Malakouti, M. J., & Miransari, M. (2015). Mineral uptake of mycorrhizal wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(3), 343-357.
- Miller, R. M., & Jastrow, J. D. (2000). Mycorrhizal fungi influence soil structure. In *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function* (pp. 3-18). Springer, Dordrecht.
- Netbeheer Nederland (2021). Consultatiereactie Netbeheer Nederland op het wetsvoorstel *Energiewet. Position Paper*, 1-68.
- Niessen, E., & Jolink, A. (2014). Absence of a market in the Dutch balancing mechanism: European rules versus specific investments. *European journal of law and economics*, 38(1), 71-90.
- Porras-Soriano, A., Soriano-Martín, M. L., Porras-Piedra, A., & Azcón, R. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi increased growth, nutrient uptake and tolerance to salinity in olive trees under nursery conditions. *Journal of plant physiology*, 166(13), 1350-1359.

RIVM. (n.d.). Wetten en regels. Retrieved June 24, 2022, from <https://www.rivm.nl/risicos-van-stoffen/wetten-en-regels>

Ryan, M. H., & Graham, J. H. (2002). Is there a role for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture?. *Plant and soil*, 244(1), 263-271.

Talaat, N. B., & Shawky, B. T. (2014). Protective effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat (*Triticum aestivum* L.) plants exposed to salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 98, 20-31.

Van der Veen, R. A., & Hakvoort, R. A. (2016). The electricity balancing market: Exploring the design challenge. *Utilities Policy*, 43, 186-194.

Verbruggen, E., Jansa, J., Hammer, E. C., & Rillig, M. C. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi stabilize litter-derived carbon in soil?. *Journal of Ecology*, 104(1), 261-269.

Whipps, J. M. (2004). Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Canadian journal of botany*, 82(8), 1198-1227.

Wu, Q. S., Xia, R. X., & Zou, Y. N. (2008). Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. *European journal of soil biology*, 44(1), 122-128.