



KWR 2018.078 | Februari 2019

Power-to-Protein: eiwitproductie in een circulaire economie

Fase 2 Pilotonderzoek

Power-to-Protein: eiwitproductie in een circulaire economie

Fase 2 Pilotonderzoek

KWR 2018.078 | februari 2019

Deze activiteit is mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het Ministerie van Economische Zaken

Opdrachtnummer

401270

Projectmanager

Luc Palmen

Opdrachtgever

TKI Watertechnologie

Kwaliteitsborger

Emile Cornelissen

Auteurs

Frank Oesterholt, met bijdragen van:
Eddie Broeders (Nijhuis Water Technology BV)
Carlos Zamalloa (Avecom NV)

Verzonden aan

Richard Bevelander namens AEB
Kim Windey en Willy Verstraete namens Avecom
Catharina Nieuwenhuizen namens Barentz/Agri Nutrition
Jan Peter van der Hoek namens Waternet
Jaap Nonnekens namens Waterkracht als samenwerkingsverband van WS Vechtstromen, WS Drents Overijsselse Delta, WS Zuiderzeeland en WS Rijn en IJssel
Jos Boere namens Allied Waters, Allied Waters heeft samen met Avecom de verdere marktontwikkeling van het concept PtP opgepakt

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie

ir. F.I.H.M. Oesterholt
T 0621 507897
E frank.oesterholt@kwrwater.nl

Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

KWR | februari 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.



Samenvatting

POWER-TO-PROTEIN CONCEPT

Door de groeiende wereldbevolking in combinatie met klimaatverandering en welvaartstoename zal de druk op de voedselvoorziening sterk gaan toenemen. Naast een verschuiving naar plantaardige eiwitten, moet de wetenschap op zoek naar alternatieve bronnen voor eiwitten. Door micro-organismen geproduceerde eiwitten, zogenaamde single cell proteins, vormen een alternatief met een grote potentie. Dit onderzoek richt zich op de biosynthese van single cell protein (SCP) door lithotrofe waterstofoxiderende bacteriën die koolzuurgas en ammonium onder invloed van waterstof als energiedrager en zuurstof op efficiënte wijze omzetten in celeiwit. Dit power-to-protein is ontwikkeld door Avecom in Gent. In 2014/15 is een inventariserende studie in het kader van TKI Watertechnologie uitgevoerd om de levensvatbaarheid van de koppeling van het Power to Protein- concept aan de afvalwaterketen in te schatten en deze te toetsen aan een casus voor de 'urbane zone van Amsterdam, fase 1' (Oesterholt, 2015). Uit de studie bleek een enorme potentie waarbij jaarlijks 6.300 ton eiwit kan worden geproduceerd uitgaande van ammonium in de natte fractie van de slibvergisting op RWZI Amsterdam-West. Hiermee zou voor 36 % van de Amsterdamse bevolking in de (netto) eiwitbehoefte kunnen worden voorzien. De economische potentie hangt sterk af van de kosten voor de productie van de grondstoffen ammonium en waterstof én de verkoopwaarde van eindproduct.

Doel van dit 'fase 2' project is om het 'power to protein' concept op te schalen tot een productieniveau van 1 kg eiwit per dag waarbij een directe koppeling is gemaakt met de afvalwaterketen gevolgd door een beoordeling van de kwaliteit van het gevormde eiwit en een beoordeling van het economisch en milieurendement van het concept.

REACTOR BOUW EN ONTWERP

Door middel van expert meetings, modelberekeningen en CFD-analyses is een ontwerp gemaakt voor een pilot met een inhoud van 580 liter met een potentiële productiecapaciteit van 1,7 kg SCP per m³ per dag. Uitgangspunten voor het ontwerp waren optimale overdracht van waterstofgas naar het microbiom in de reactor en inherente veiligheid. Voor de productie van waterstof en zuurstof is de pilot voorzien van een kleine elektrolysecel met een maximale productie van 0,5 Nm³/uur waterstof en 0,25 Nm³/uur zuurstof. De pilot is gebouwd door de firma Maris in Schijndel in de periode van juli tot en met november 2016. In 2017 is door KWR en Avecom internationaal octrooi aangevraagd voor de 'Bioreactor for aerobic hydrogenotrophic fermentation' met aanvraagnummer PCT/NL2017/050608 en formele indieningsdatum 15 september 2017 (ref. P112565PC00). Op 22 maart 2018 is het patent gepubliceerd onder het internationale publicatienummer WO 2018/052295 AN.

RESULTATEN VAN PILOTONDERZOEK

Het pilotonderzoek is uitgevoerd op RWZI Enschede, RWZI Horstermeer en deels ook bij Avecom in Gent. Het onderzoek werd aanvankelijk gekenmerkt door opstart-problemen met het reactorsysteem. Later waren er problemen met de elektrolysecel (drooglopen) en de begassingsplaten in de reactor (breuk) die leidden tot langere stilstand. In stabiele periodes

kon de reactor, na opstart in batch modus, langzaam in een continue modus worden gebracht waarbij continue groeimedium en ammoniumoplossing aan het systeem werd toegevoerd en biomassa geoogst kon worden. De hoogst bereikte waarde voor de volumetrische productiecapaciteit is 0,7 kg per m³ per dag maar de gemiddelde productie bedroeg 0,5 kg per m³ per dag (onderzoekperiode II). De yield in de reactor, maximaal op een niveau van 0,04 kg TSS/kgCOD-H₂, was te laag waardoor het verder verkorten van de hydraulische verblijftijd leidde tot uitspoeling van het microbiom. Via een root cause analysis is uiteindelijk geconcludeerd dat de beperkte waterstofinbreng in het systeem de basisoorzaak is voor het achterblijven van de groei.

AMMONIAKTERUGWINNING UIT REJECTIEWATER

Op de locaties RWZI Enschede en Horstermeer is tevens onderzoek gedaan naar de terugwinning van ammonium uit de natte fractie van de slibvergisting (rejectiewater) op beide locaties. Hiervoor is gebruik gemaakt van een bestaande pilotinstallatie van Nijhuis Industries die is opgebouwd uit een CO₂-stripper gevolgd door een conventioneel luchtstripproces met scrubber (NAR-pilot). In de scrubber wordt de ammoniak uit de lucht in een zwavelzuuroplossing opgelost en vastgelegd als ammoniumsulfaat. Om ammonium als ammoniak te kunnen strippen moet de pH van het rejectiewater worden gecorrigeerd tot een waarde van 8,5 tot 9 en de temperatuur worden verhoogd tot 68 - 70 °C in de luchtstripper. Hoe hoger de ammoniumconcentraties in het rejectiewater hoe kostenefficiënter het proces per kg teruggewonnen stikstof

Omdat de ammoniumconcentraties in het rejectiewater van zowel Enschede en Horstermeer relatief laag waren (0,85 resp. 0,78 g/l) is gedurende korte tijd ook rejectiewater van de RWZI Hengelo in de pilot behandeld. Dit water heeft een ammoniumconcentratie van 1,64 g/l wat als meer representatief voor een grootschalige (met thermische drukhydrolyse) geoptimaliseerde vergisting kan worden beschouwd.

In algemene zin zijn de testen met de NAR-pilot zeer succesvol verlopen waarbij ammonium met een rendement van 85 tot maximaal 90 % kan worden teruggewonnen. Uitgaande van data voor RWZI Hengelo resulteert dit in een goede businesscase voor de terugwinning van ammonium: € 2,18 per kg N als geen restwarmte op locatie aanwezig is tot € 1,54 per kg N in het geval voldoende restwarmte aanwezig is om het rejectiewater te verwarmen.

ONDERZOEK KWALITEITSASPECTEN SCP

Het onderzoek met de NAR-pilot is tevens gebruikt om onderzoek te doen naar de hygiënische aspecten van koppeling van de afvalwaterketen aan de productie van SCP. Hiertoe zijn op twee data challenge- of spiketesten uitgevoerd met referentie-organismen om vast te stellen of er overdracht kan plaatsvinden vanuit het rejectiewater naar het ammoniumsulfaat dat als grondstof dient voor de productie van SCP. De relatief hoge temperaturen en verblijftijden in combinatie met een water/lucht overgang vormen de belangrijkste barrières tegen die overdracht. Als referentie-organismen is gebruik gemaakt van een thermoresistent virus (colifaag phiX174), een thermoresistente bacterie (*Salmonella senftenberg*) en sporen van sulfiet reducerende clostridia. (SSRC). De resultaten van de challengetesten tonen aan dat thermoresistente virussen en bacteriën met meer dan log 6 worden verwijderd en SSRC met gemiddeld log 5,6. Op basis van deze resultaten lijkt overdracht van fecale pathogenen vanuit het rejectiewater naar het ammoniumsulfaat onwaarschijnlijk. Wel moet rekening worden gehouden met overdracht van thermoresistente bacteriesporen. Die zullen uiteindelijk vooral bepalend zijn voor de houdbaarheid van het geproduceerde SCP.

Door de firma Nutrilab zijn gedroogde monsters van SCP uit de pilot reactor onderzocht op gehalte ruw eiwit, het gehalte niet-eiwit stikstof (NPN), de aminozuursamenstelling en de in-

vitro verteerbaarheid van het eiwit. Het ruw eiwitgehalte van SCP (49 %) blijkt vergelijkbaar met dat van sojameel en de in-vitro verteerbaarheid van SCP (85 %) blijkt vergelijkbaar met die van vismeel. Het gehalte NPN is relatief laag (1 %). Verder blijkt dat de gehalten van essentiële aminozuren in het bij dit onderzoek gevormde SCP lager liggen dan die in conventionele eiwitten. Dat geldt overigens ook als de vergelijking wordt gemaakt met het SCP dat in 2016 in de labschaalreactor van Avecom werd geproduceerd. Blijkbaar is de kwaliteit van het microbiom in de pilotreactor slechter.

LCA

Een LCA bekijkt in algemene zin het effect op het milieu van een product of service vanaf het begin (het maken) tot aan het einde (het verwerken). Dit principe wordt ook cradle-to-grave genoemd. De resultaten van een LCA analyse worden uitgedrukt in eco-punten, waarbij 1.000 eco-punten gedefinieerd is als de totale gemiddelde milieu impact van een West-Europees persoon per jaar.

Met behulp van SimaPro 8 software en de Ecoinvent 3.0 Database is de duurzaamheidsimpact van de productie van SCP bepaald en vergeleken met die van andere (conventionele) eiwitbronnen zoals vis, rundvlees, kippenvlees, varkensvlees en sojabonen. Als functionele eenheid is 'kg ruw product' gekozen, dat wil zeggen dat de milieu-impact van 1 kg gedroogd SCP is vergeleken met 1 kg (onbewerkt) rundvlees, 1 kg (onbewerkt) varkensvlees, etcetera, waarbij moet worden opgemerkt dat het eiwitgehalte van SCP hoger ligt dan die van de vleesproducten. Daarbij is in alle gevallen 'off shore wind'-energie als uitgangspunt gebruikt voor de elektriciteitsbron. Die keuze is vooral relevant voor SCP omdat het verbruik van elektriciteit in het productieproces een belangrijk aandeel vormt in de totale milieu-impact (80 %). De milieu-impact van de productie van 1 kg SCP via het power-to-protein concept bedraagt ongeveer 0,63 ecopunten. Uit de vergelijking met vijf conventionele eiwitbronnen blijkt dat SCP gunstiger scoort dan rundvlees (1,68) en kippenvlees (0,98), maar vergelijkbaar is met varkensvlees (0,63). De milieu-impact van 1 kg soja (0,23) ligt daarentegen lager.

CONCLUSIES FASE 2 PILOT ONDERZOEK

De hoofdconclusies van dit fase 2 onderzoek luiden als volgt:

- De beoogde volumetrische productiecapaciteit van SCP is niet bereikt door onvoldoende stofoverdracht van waterstof uit de microbellen naar het microbiom in het onderzochte reactorsysteem.
- Hierdoor heeft het pilotonderzoek geen inzichten opgeleverd die een herziening van de economische evaluatie uit fase 1 van het onderzoek rechtvaardigen.
- De mindere kwaliteit van het geproduceerde SCP in dit onderzoek is indirect ook het gevolg van onvoldoende stofoverdracht van gassen uit microbellen naar het microbiom in het onderzochte reactorsysteem.

Andere conclusies van dit onderzoek zijn:

- Het terugwinnen van ammonium uit het digestaat van de slibvergisting door middel van luchtstrippen en absorptie van ammoniak in een zwavelzuuroplossing blijkt zowel technisch als economisch haalbaar.
- Voor de economische haalbaarheid van de ammoniumterugwinning blijkt vooral het concentratieniveau van ammonium in het digestaat van belang, waarbij dat niveau bij voorkeur boven de 2.000 mg/l ligt. Daarnaast kan de beschikbaarheid van restwarmte op locatie de kosten van de ammoniumterugwinning aanzienlijk reduceren.

- De economische evaluatie voor de productie van SCP uit fase 1 kan op het punt van de kosten voor de terugwinning van ammonium positief worden bijgesteld.
- De hoge temperaturen en relatief lange verblijftijden bij de ammoniumterugwinning in combinatie met de water/lucht overgang (van ammoniak) zijn voldoende om micro-organismen die gevoelig zijn voor hoge temperatuur met een hoog rendement af te doden. Hierdoor is het gevormde ammoniumsulfaat bruikbaar als grondstof voor de productie van SCP.
- Houd rekening met de overdracht van thermoresistente bacteriesporen naar het ammoniumsulfaat en de reactor voor de productie van SCP. Deze bacteriesporen zullen vooral bepalend zijn voor de houdbaarheid van het gevormde SCP.
- Uit de LCA-analyse blijkt dat de milieu-impact van het PtP-concept hoofdzakelijk wordt bepaald door de elektrolyse van water tot waterstof en zuurstof en de daarvoor gebruikte elektriciteitsbron. Hieruit volgt dat hoe groener die elektriciteitsbron, hoe beter het concept presteert ten opzichte van andere eiwitbronnen.
- Met het gebruik van elektriciteit uit off-shore windparken volgt uit de LCA-analyse dat – met de gehanteerde uitgangspunten – de milieu-impact van 1 kg SCP als gedroogd product lager is dan die van rundvlees en kippenvlees, maar vergelijkbaar is met varkensvlees. Als de milieu-impact per 'kg eiwit' wordt berekend, verbetert het resultaat voor SCP aanzienlijk als gevolg van het relatief hoge ruw eiwitgehalte van SCP (49 %) ten opzicht van vlees in algemene zin (21 %).
- De LCA leert ook dat voor de ammoniumvoorziening ten behoeve van de productie van SCP, het gebruik van industrieel geproduceerd ammonium een goed alternatief is ten opzichte van terugwinning van ammonium uit de afvalwaterketen. Bijkomend voordeel van het gebruik van industrieel geproduceerd ammonium is dat de kwaliteit van de grondstof zuiverder is aangezien het geen OMPs en/of pathogene micro-organismen bevat.

AANBEVELINGEN

De belangrijkste aanbeveling is om door literatuurstudie en een modelmatige aanpak (eventueel aangevuld met praktijktesten), meer fundamenteel inzicht te krijgen in de stofoverdracht van waterstof en andere gassen in bioreactoren voor biosynthese. Een dergelijke studie moet resulteren in opties voor een opschaalbaar reactorontwerp waarbij tevens rekening wordt gehouden met de veiligheidsaspecten. Met een nieuw geoptimaliseerd reactorsysteem moeten vervolgens nieuwe pilottesten worden gedaan om de economische uitgangspunten voor de SCP-productie vast te kunnen stellen, op de wijze zoals dat in dit onderzoek voor de ammoniumterugwinning is gedaan. Daarnaast moet voor het op die wijze geproduceerde SCP worden onderzocht in hoeverre de kwaliteitsparameters zoals ruw eiwitgehalte en aminozuurgehalten zijn verbeterd ten opzichte van dit onderzoek.

De overige aanbevelingen luiden:

- Doe in een goed functionerend reactorsysteem nader onderzoek naar de aanwezigheid van thermoresistente bacteriën in het microbiom in de reactor bij gebruik van (uit digestaat) teruggewonnen ammonium.
- Doe nader onderzoek naar de aanwezigheid van vooral hydrofobe persistente OMP's in het ammoniumsulfaat op basis van een selectie van hydrofobe OMP's met de hoogste concentraties in digestaat en hoogste persistentie.
- Doe nader onderzoek naar de optimale manier om de biomassa op te werken naar een gedroogd eiwitproduct, waarbij rekening wordt gehouden met de invloed van de verwerkingsmethoden op de eiwitkwaliteit.

- Onderzoek de economische haalbaarheid van een tweede spoor voor productie van SCP waarbij gebruik wordt gemaakt van industrieel ammonium.

Inhoud

1	Inleiding	10
1.1	Aanleiding	10
1.2	Power-to-protein concept	10
1.3	Projectomschrijving en projectdoel	12
1.4	Scope en uitvoering	12
2	Reactorontwerp en-bouw	14
2.1	Expertsessies en reactorontwerp	14
2.2	Realisatie van de pilotinstallatie	15
2.3	Problemen met en aanpassingen aan de pilotinstallatie	18
2.4	Octrooi-aanvraag	20
3	Onderzoek op locatie met de power-to-protein pilot	21
3.1	Beschrijving onderzoekslocaties	21
3.2	Chronologische beschrijving projectverloop	22
3.3	Materialen en methoden	22
3.4	Pilotonderzoek op locatie RWZI Enschede (onderzoekperiode I)	24
3.5	Pilotonderzoek bij Avecom in Gent (onderzoekperiode II)	24
3.6	Pilotonderzoek op locatie RWZI Horstermeer (onderzoekperiode III)	26
3.7	Pilotonderzoek bij Avecom in Gent (onderzoekperiode IV)	27
4	Ammoniakterugwinning uit rejectiewater	30
4.1	Selectie ammoniarecovery techniek	30
4.2	Inzet van de Nijhuis Ammonia Recovery pilot	32
4.3	Samenvatting resultaten NAR pilot	34
4.4	Businesscase NAR-pilot	36
5	Onderzoek kwaliteitsaspecten SCP	39
5.1	Hygienische aspecten door koppeling met de afvalwaterketen	39
5.2	Methodebeschrijvingen challengetest	40
5.3	Resultaten challengetest	42
5.4	Interpretatie resultaten challengetest	43
5.5	Productie van SCP in de power-to-protein pilot	43
5.6	Kwaliteit van het gevormde SCP	45
5.7	Bepaling van nucleïnezuurgehalte in SCP	49
5.8	Toelatingsvereisten als Novel food en diervoeder	50
6	Life Cycle Analysis (LCA)	52
6.1	Het doel van de LCA	52

6.2	Functionele eenheid	52
6.3	Gebruikte methode	53
6.4	Systeemgrenzen en uitgangspunten	53
6.5	Resultaten LCA	55
7	Discussie	59
7.1	Technische haalbaarheid Power-to-protein concept	59
7.2	Economische haalbaarheid	61
8	Conclusies en aanbevelingen	63
8.1	Conclusies	63
8.2	Aanbevelingen	64
9	Literatuurreferenties	66
9.1	Artikelen	66
9.2	Presentaties	66
9.3	Rapporten/boeken	67
9.4	Overige	67
10	Disseminatie	68
10.1	Website power-to-protein	68
10.2	Officiële start pilotstudie in Enschede	68
10.3	Publicaties en presentaties	69
Bijlage I Overzicht analyse-resultaten challengetest NAR-pilot		71
Bijlage II Waterstofinvoer Power-Protein reactor		73
Bijlage III Analyserapporten SCP		79
Bijlage IV Vergelijking SCP met andere SCP en conventionele eiwitten		85
Bijlage V Uitgangspunten LCA-berekening PtP-concept		89
Bijlage VI Uitgangspunten LCA-berekening conventionele eiwitten		91
Bijlage VII Nadere analyse resultaat LCA-studie		94
Bijlage VIII Gedetailleerde methodebeschrijving bepaling nucleïnezuurgehalte (DNA/RNA)		101
Bijlage IX Analyse bezoekfrequentie website www.powertoprotein.eu		102
Bijlage X P&ID Power to Protein Pilot		104

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

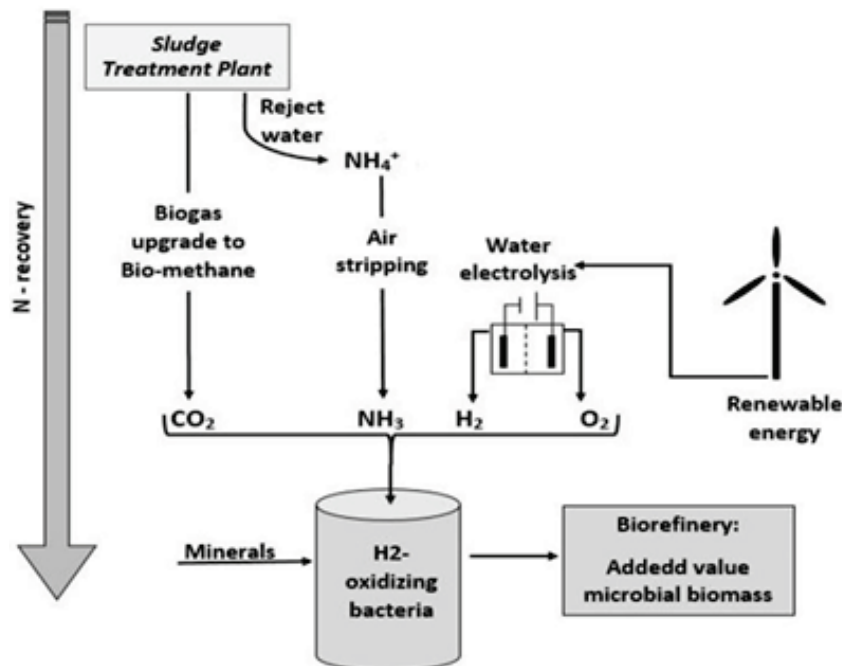
Volgens het EU-actieplan voor een circulaire economie levert de overgang naar een dergelijke economie een essentiële bijdrage aan de inspanningen van de EU om tot een duurzame, koolstofarme, hulpbronnen efficiënte en concurrerende economie te komen. De levensmiddelensector is bij uitstek een sector waar de urgentie hoog is om slagen te maken in het duurzaam gebruik van grondstoffen. Hierbij is het van belang dat de samenleving en de overheid open staan voor technologische innovaties. De productie van microbieel eiwit uit grondstoffen in onze afvalwaterketen - waar in dit rapport verslag worden gedaan - is zo'n technologische innovatie die in potentie een belangrijke bijdrage kan gaan leveren aan het wereldvoedselprobleem waarbij in de toekomst 9 tot 10 miljard monden moeten worden gevoed. Deze technologische innovatie maakt het mogelijk om de door de mens gecreëerde stikstofcyclus te verkorten en circulair te maken waardoor niet alleen veel energie en grondstoffen kunnen worden bespaard, maar ook veel minder beslag wordt gelegd op de beschikbare ruimte.

De groeiende wereldbevolking blijvend voeden op de manier zoals nu gebruikelijk is in de Westerse wereld met eiwitten uit vlees en vis, is niet houdbaar naar de toekomst. Klimaatverandering en welvaartstoename zullen de druk op de voedselvoorziening verder vergroten. Naast een verschuiving naar plantaardige eiwitten, moeten we op zoek naar alternatieve bronnen voor eiwitten, zoals insecten, algen en micro-organismen. De productie van eiwitten uit snelgroeiende micro-organismen is geen nieuwe ontwikkeling. Tijdens de eerste en tweede wereldoorlog werd in Duitsland op grote schaal eiwit uit biergist geproduceerd om voedseltekorten op te vangen. Ook de Sovjet Unie had rond 1970 een groot programma gericht op de eiwitproductie van gisten uit olieresiduen afkomstig van hun raffinaderijen. Toxiciteitsproblemen met het product noopte hen tot het sluiten van de fabrieken. De productie van single cell protein geniet nu weer volop aandacht. De keuze voor type micro-organisme, energiebron en koolstofbron biedt een scala aan mogelijkheden. Deze studie richt zich op de toepassing van waterstofoxiderende lithotrofe bacteriën die als bijkomende eigenschap hebben dat ze kooldioxide kunnen vastleggen. Het achterliggende idee is om de waterstof, als energiebron, te produceren uit hernieuwbare energiebronnen via elektrolyse van water. Hieraan ontleent het concept zijn naam: power-to-protein.

1.2 Power-to-protein concept

Het idee achter het Power-to-Protein concept is gelanceerd door prof. Willy Verstraete, Universiteit van Gent (BE). Het bedrijf Avecom dat is gelieerd aan de Universiteit Gent en dat onder leiding staat van prof. Willy Verstraete heeft de biosynthese van single cell protein (SCP) met lithotrofe waterstofoxiderende bacteriën als eerste op labschaal gerealiseerd. In een parallelle lijn doet Avecom onderzoek naar de productie van SCP met organotrofe bacteriën die organische verbindingen in (afval)water gebruiken als koolstof- en energiebron.

De essentie van het concept met lithotrofe waterstofoxiderende bacteriën laat zich samenvatten met onderstaande figuur. Koolzuurgas en ammonium afkomstig uit de afvalwaterketen worden onder invloed van waterstof als energiedrager en zuurstof op efficiënte wijze omgezet in celeiwit of SCP. Het op deze wijze geproduceerde eiwit biedt een aantal voordelen t.o.v. dierlijk eiwit, zoals wordt geïllustreerd in onderstaande tabel. PROMIC is de voorlopige werknaam voor het op deze wijze geproduceerde SCP.



In 2014/15 is een inventariserende studie in het kader van TKI WT uitgevoerd om de levensvatbaarheid van de koppeling van het Power to Protein- concept aan de afvalwaterketen in te schatten en deze te toetsen aan een casus voor de 'urbane zone van Amsterdam, fase 1' (Oesterholt, 2015). Uit de studie bleek een enorme potentie waarbij jaarlijks 6.300 ton eiwit kan worden geproduceerd uitgaande van ammonium in de natte fractie van de slibvergisting op RWZI Amsterdam-West. Hiermee kan voor 36 % van de Amsterdamse bevolking in de (netto) eiwitbehoefte worden voorzien. Verder is geconcludeerd dat de productie van SCP economisch gezien potentie heeft die overigens sterk afhangt van de kosten voor de productie van de grondstoffen ammonium en waterstof en de verkoopwaarde van eindproduct.

Op grond van de studie in fase 1 is een aantal aanbevelingen gedaan die deels in dit fase 2 onderzoek verder zijn opgepakt. Die aanbevelingen zijn deels gerelateerd aan de grondstoffen (1 t/m 5) en deels aan het product (6 t/m 10):

1. Er is nader onderzoek nodig naar het risico dat met de bronnen ammonium, kooldioxide en waterstof (via biomethaan) ongewenste stoffen waaronder organische microverontreinigingen en pathogenen worden aangevoerd naar de reactor voor SCP. Dit onderzoek is bepalend voor de benodigde opwerkingsstappen en is daarmee een belangrijke factor voor de productiekosten van SCP.
2. Daarbij is parallel onderzoek nodig naar de meest optimale opwerkingsmethoden voor de grondstoffen voor de productie van SCP. Vooral het geschikt maken van de ammoniumbron en de productie van waterstof zijn kostenbepalend.
3. Nader onderzocht moet worden of steam reforming in de praktijk ook kan worden uitgevoerd met biogas, dat wil zeggen zonder voorafgaande scheiding van CH_4 en CO_2 . Hiermee kunnen kosten worden bespaard. Daarnaast wordt de CO_2 die wordt gevormd bij de steam reforming van biomethaan normaal gesproken afgescheiden via PSA.

Onderzocht moet worden of in deze situatie deze stap nog noodzakelijk is, aangezien beide componenten aan de reactor toegevoerd kunnen worden.

4. Bij het opschalen van de productie moet aandacht worden besteed aan de veiligheidsaspecten rondom de toevoer en opslag van waterstof als energiedrager.
5. Er is pilot onderzoek nodig waarbij voor ammoniak als grondstof de koppeling wordt gemaakt met de afvalwaterketen en de andere grondstoffen als high-grade industriële gassen of producten worden toegevoerd, zodat inzicht ontstaat in de effecten op de microbiologie en toxicologie van het microbiom in de reactor.
6. Er is nader onderzoek nodig naar een effectieve en efficiënte opwerkingsmethode voor de in de SCP-reactor geproduceerde biomassa naar een bruikbaar product.
7. In verband met de (product)eisen die worden gesteld aan eiwitten bij introductie op de markt, wordt aanbevolen al in een vroeg stadium een partij bij het onderzoek te betrekken die juist op dit punt expertise kan inbrengen.
8. Het traject om SCP als novel food op de markt te brengen moet nauwkeuriger in beeld worden gebracht voor wat betreft tijdspad en kosten.
9. Parallel aan het pilot onderzoek zou moeten worden gestart met het toetsen van het power-to-protein concept bij maatschappelijke organisaties. Die weg moet voorzichtig worden betreden met een open, consistente communicatie waarbij niet alleen duidelijk wordt gemaakt waar we op dit moment staan en waar we naar toe willen, maar ook wat we op dit moment nog niet weten en om die reden nader onderzoeken.
10. Ten behoeve van de marketing en communicatie over het product wordt overigens aanbevolen in een vroeg stadium specifieke expertise in te winnen.

1.3 Projectomschrijving en projectdoel

Op basis van de resultaten en aanbevelingen van de inventariserende studie uitgevoerd in 2014/2015 is het power-to-protein concept in dit project op locatie getest door een directe koppeling te maken tussen de afvalwaterketen en een pilotinstallatie. De kwaliteitsaspecten van het in de pilot geproduceerde eiwit zijn intensief onderzocht op relevante parameters. In de overall synthese is - uitgaande van de pilotresultaten - naast de technische en juridische haalbaarheid ook aandacht besteed aan het economische en milieurendement van de productie van single cell protein.

Doel van het project is om het 'power to protein' concept op te schalen tot een productieniveau van 1 kg eiwit per dag waarbij een directe koppeling is gemaakt met de afvalwaterketen gevolgd door een beoordeling van de kwaliteit van het gevormde eiwit en een beoordeling van het economisch en milieurendement van het concept.

1.4 Scope en uitvoering

De scope voor fase 2 van het onderzoek omvat de aanbevelingen 1 tot en met 7 zoals beschreven in paragraaf 1.2, met uitzondering van aanbeveling 3, en kan als volgt worden samengevat:

- Ontwerp en bouw een pilotreactor met een beoogde productiecapaciteit van 1 kg eiwit/dag met speciale aandacht voor een op die schaal werkende reactorconfiguratie waarbij de grondstoffen (gassen) op een effectieve en veilige manier kunnen worden ingebracht (aanbeveling 5).
- Onderzoek naar de meest optimale opwerkingsmethoden voor de grondstoffen voor de productie van SCP. Daarbij vooral aandacht voor de productie van ammonium en waterstof (elektrolyse/stoomconversie) omdat die kostenbepalend zijn gebleken in de voorstudie (aanbeveling 2).
- Opzetten en uitvoeren van een pilotonderzoek waarbij voor ammonium de koppeling wordt gemaakt met de afvalwaterketen en de andere grondstoffen als high-grade

industriële gassen of producten worden toegevoerd. Dit onderzoek moet inzicht geven in de effecten op de microbiologie en toxicologie van het microbiom in de reactor. Bij het opschalen van de productie moet aandacht worden besteed aan de veiligheidsaspecten rondom de toevoer en opslag van waterstof als energiedrager (aanbeveling 4/5).

- Nader onderzoek om het risico te beheersen dat met de bronnen ammonium, kooldioxide en waterstof ongewenste stoffen waaronder organische microverontreinigingen en pathogenen worden aangevoerd naar de reactor voor SCP (aanbeveling 1).
- Onderzoek naar de opwerkingsmethode voor de in de SCP-reactor geproduceerde biomassa naar een bruikbaar product (aanbeveling 6).
- Uitvoeren of uit laten voeren van testen met het geproduceerde eiwit gericht op het vaststellen van de microbiologische en chemische samenstelling, de verteerbaarheid (in vitro en in vivo), de allergeniciteit, en de voedingswaarde (aanbeveling 7).
- Uitvoeren van een uitgebreide Life Cycle Analysis waarbij de milieu-impact van het Promic eiwit wordt vergeleken met bestaande plantaardige en dierlijk eiwitten.
- Vaststellen van het economisch rendement van de productie van Promic op grote schaal uitgaande van de resultaten van het pilotonderzoek.
- Opstellen van aanbevelingen voor verdere opschaling van de productie van Promic in een vervoltraject.
- Disseminatie van resultaten en voorlopige toetsing van het *Power to Protein* concept bij maatschappelijke organisaties, in nauw overleg met de samenwerkingspartners.

Omdat in dit onderzoek de productie van waterstof uit elektrolyse als uitgangspunt is genomen, wordt aanbeveling 3 uit fase 1 aangehouden. In algemene zin is het voor waterschappen relevant om naar de toekomst toe verdere valorisatie van biogas te overwegen door het via steam reforming om te zetten in waterstof (en CO₂).

Aan de aanbevelingen 8 tot en met 10 uit fase 1 is in dit onderzoek slechts beperkt aandacht gegeven omdat onderzoek op deze punten nog als te prematuur is beschouwd. Wel is op basis van aanbeveling 8 beperkt gekeken naar toelatingsvereisten voor SCP als Novel food en diervoeder (zie paragraaf 5.8) en is ruim aandacht gegeven aan disseminatie van de resultaten, onder andere via de website www.powertoprotein.eu (zie hoofdstuk 10).

Het consortium voor dit onderzoek bestaat uit de volgende deelnemers: AEB Amsterdam, Avecom, Barentz/Agri Nutrition, Waternet en Waterkracht als samenwerkingsverband van Waterschap Vechtstromen, Waterschap Drents Overijsselse Delta, Waterschap Zuiderzeeland en Waterschap Rijn en IJssel.

2 Reactorontwerp en-bouw

2.1 Expertsessies en reactorontwerp

Het opschalen van het power-to-protein concept vanaf de bestaande reactor van 5 liter bij Avecom in Gent naar pilotreactor van 500 liter met een potentiële productiecapaciteit van 1 kg per m³ per dag brengt de volgende twee uitdagingen met zich mee:

- hoe kan een optimale overdracht van het waterstofgas worden gerealiseerd zodanig dat waterstof zo efficiënt mogelijk wordt opgenomen in de bacteriesuspensie;
- hoe kan een reactorsysteem worden ontworpen dat inherent veilig is, dat wil zeggen waarin zich op geen enkele manier een potentieel explosief mengsel van waterstof en zuurstof kan ophopen.

Door middel van een aantal expertsessies is geprobeerd voor deze uitdagingen een oplossing te vinden en deze te combineren in een ontwerp. Daarbij is uitgegaan van verschillende bestaande reactortypes. De conclusie was dat het systeem alleen inherent veilig kan zijn als de reactor aan de bovenzijde volledig open is, zodanig dat eventueel niet opgenomen waterstof direct naar de omgeving wordt afgevoerd. Omdat waterstof zoveel lichter is dan lucht zal het zeer snel opstijgen en verdund raken. Omdat waterstof als energiedrager kan worden beschouwd als de meest waardevolle component, dient het hele ontwerp gericht te zijn op bij voorkeur volledige opname van het waterstofgas in de reactor zodanig dat er aan de bovenzijde geen waterstof meer ontsnapt.

Het is van belang om waterstofgas via microbubbles te introduceren in de reactor. Berekeningen (Bijlage II) hebben aangetoond dat de belgrootte een belangrijke rol speelt bij de stofoverdracht. Een gasbel van 30 µm doorsnede lost naar verwachting op in 100 seconden; voor 100 µm bellen is dat 330 seconden. Om aan de vraag van waterstof te voldoen, moeten per seconde circa $1 \cdot 10^{10}$ bellen van 30 µm en $2.7 \cdot 10^8$ bellen van 100 µm worden geproduceerd, hetgeen 15 tot 20 W vraagt (theoretisch 2 W). Het volume gas is ca. 2 liter per m³ reactorinhoud bij 30 µm bellen en 15 liter voor 100 µm bellen. Teneinde geen waterstof in de gasruimte bovenin de reactor te krijgen, dient de transporttijd tussen het gasinbreng- of verdeelsysteem en de gasruimte bovenin de reactor minimaal 100 seconden te bedragen en voor 100 µm bellen is dat 330 s. Vanwege de verwaarloosbare stijgsnelheid van de bellen betekent dit bij een verticale vloeistofsnelheid van 5 cm/s een reactorhoogte van 5 m. Voor 100 µm bellen is nog steeds de stijgsnelheid klein (max 1 cm/s), maar dient de transporttijd van het punt waar de verse bellen de reactor in komen naar het oppervlak minimaal 300 seconden te bedragen.

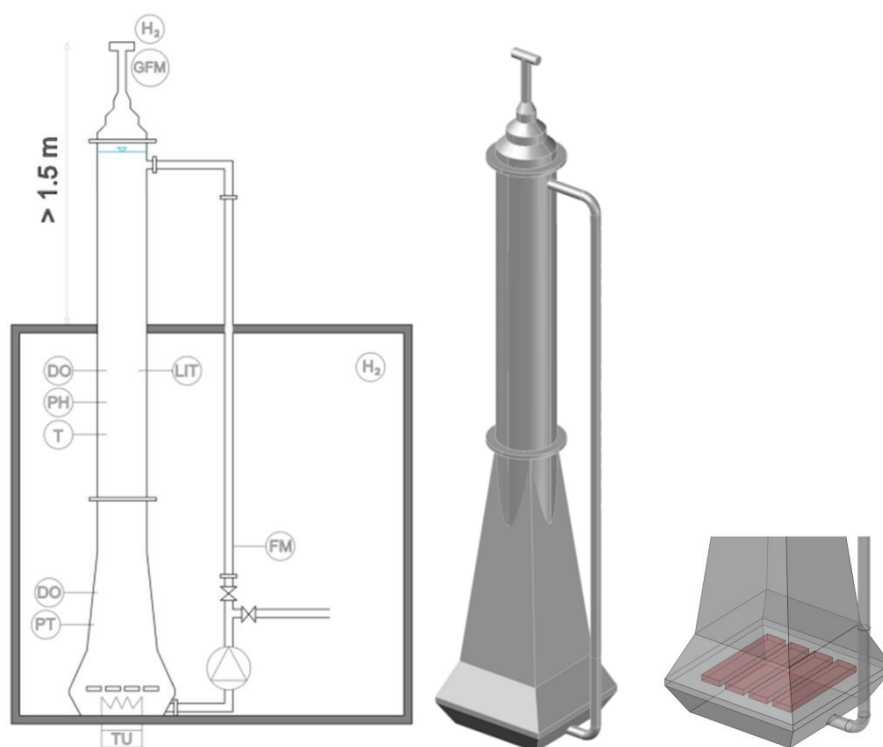
Deze theoretische berekeningen worden gecompliceerd door het feit dat naast waterstof ook zuurstof en kooldioxide aan de reactor worden toegevoerd. Wat het effect is van interactie van de gasbellen en wat het effect is van het in elkaar oplossen van de gassen is op theoretische basis lastig te voorspellen.

Essentie is dat het opstijgen van de gasbellen zoveel mogelijk moet worden vertraagd. Dit heeft geresulteerd in de gedachte om een deel van de reactorinhoud via een circulatieloop terug te brengen boven in de reactor. Hierdoor ontstaat er een neerwaartse beweging van de vloeistof in de reactor die tegengesteld is aan de beweging van de gasbellen. Door middel

van CFD¹-modellering is gekeken naar het ontwerp voor de terugvoer van de reactorinhoud bovenin de reactor. Hieruit bleek dat de inflow pijp centraal naar beneden gericht (symmetrisch) moet worden geplaatst om op die manier een sterke asymmetrie in de stroming bovenin de reactor te voorkomen. Daarnaast is met CFD het effect van begassingselementen op de hydraulica onderin de reactor en de versmalling van de bodem van de reactor onderzocht. Deze aspecten blijken de stroming niet significant te beïnvloeden. Zo leidt de aanwezigheid van de begassingselementen niet tot een zodanig snelheidsverhoging dat gasbellen worden meegevoerd tot onderin de reactor of zelfs tot in de circulatieloop.

De eerste ontwerptekeningen van de reactor zijn weergegeven in Figuur 2-1, waarbij ook de positionering van de keramische begassingselementen meer in detail is weergegeven. Het benodigde oppervlak voor begassing van de reactor is zodanig groot dat is gekozen voor een brede onderzijde en een naar boven conisch toelopende reactor. Ook de recirculatieloop is duidelijk zichtbaar in de schets. De reactor heeft een hoogte van 4 meter en een inhoud van 0,58 m³.

FIGUUR 2-1 PRINCIPESCHETS EN DRIEDIMENSIONALE WEERGAVE VAN DE POWER-TO-PROTEIN PILOT



2.2 Realisatie van de pilotinstallatie

De pilot is gebouwd door de firma Maris in Schijndel in de periode van juli tot en met november 2016. De reactor is uiteindelijk opgebouwd uit vijf HD plastic onderdelen die door middel van flenzen aan elkaar zijn gekoppeld (zie Figuur 2-2). Het bodemdeel bevat de drain van de reactor die is gekoppeld aan de recirculatieloop. In het rechthoekige en breedste deel van de reactor daarboven bevinden zich de keramische beluchtingselementen die zorgen voor de toevoer van de gassen. Daarboven is een rechthoekig conisch toelopend deel ontworpen die het breedste deel van de reactor via een klein verloopstuk verbindt met het lange cilindrische deel van de reactor (2 meter).

¹ computational fluid dynamics

In het lange cilindrische deel bevinden zich de doseerpunten voor ammoniumsulfaat, spoorelementen en eventueel anti-schuim middelen. In dit deel bevindt zich ook een groot deel van de instrumentatie. Ten slotte bevindt zich bovenaan het cilindrische deel de aansluiting van de circulatieloop en daarboven (net onder de flens) de overloop van de reactor. Het vijfde deel betreft de bovenruimte van de reactor die open is uitgevoerd en voorzien van een blower voor versnelde afvoer van de gassen in de bovenruimte.

FIGUUR 2-2 DE REACTOR IS OPGEBOUWD UIT VIJF SEPARATE ONDERDELEN



FIGUUR 2-3 INSTALLATIE VAN DE REACTOR IN DE CONTAINER MET RECHTS DE BUITEN DE CONTAINER UITSTEKENDE BOVENRUIMTE



De pilot plant zelf bestaat uit drie hoofdcomponenten, influent tanks, een elektrolysecel voor productie van waterstof en zuurstof en de reactor zelf, die zijn ingebouwd in een 10 voets container. In de container bevinden zich een tank met groeimeidium (900 liter) en een tank met water (200 l). De elektrolysecel (Hydron Energy) betreft een block stack die bestaat uit een stapel van 10 afzonderlijke cellen. Bij 120 Ampere produceert de cel maximaal 0,5 m³/h waterstof (H₂) en 0,25 m³/h zuurstof (O₂)

FIGUUR 2-4 ELEKTROLYSECELL MET DAARONDER DE VOORRAAD ULTRAPUUR WATER

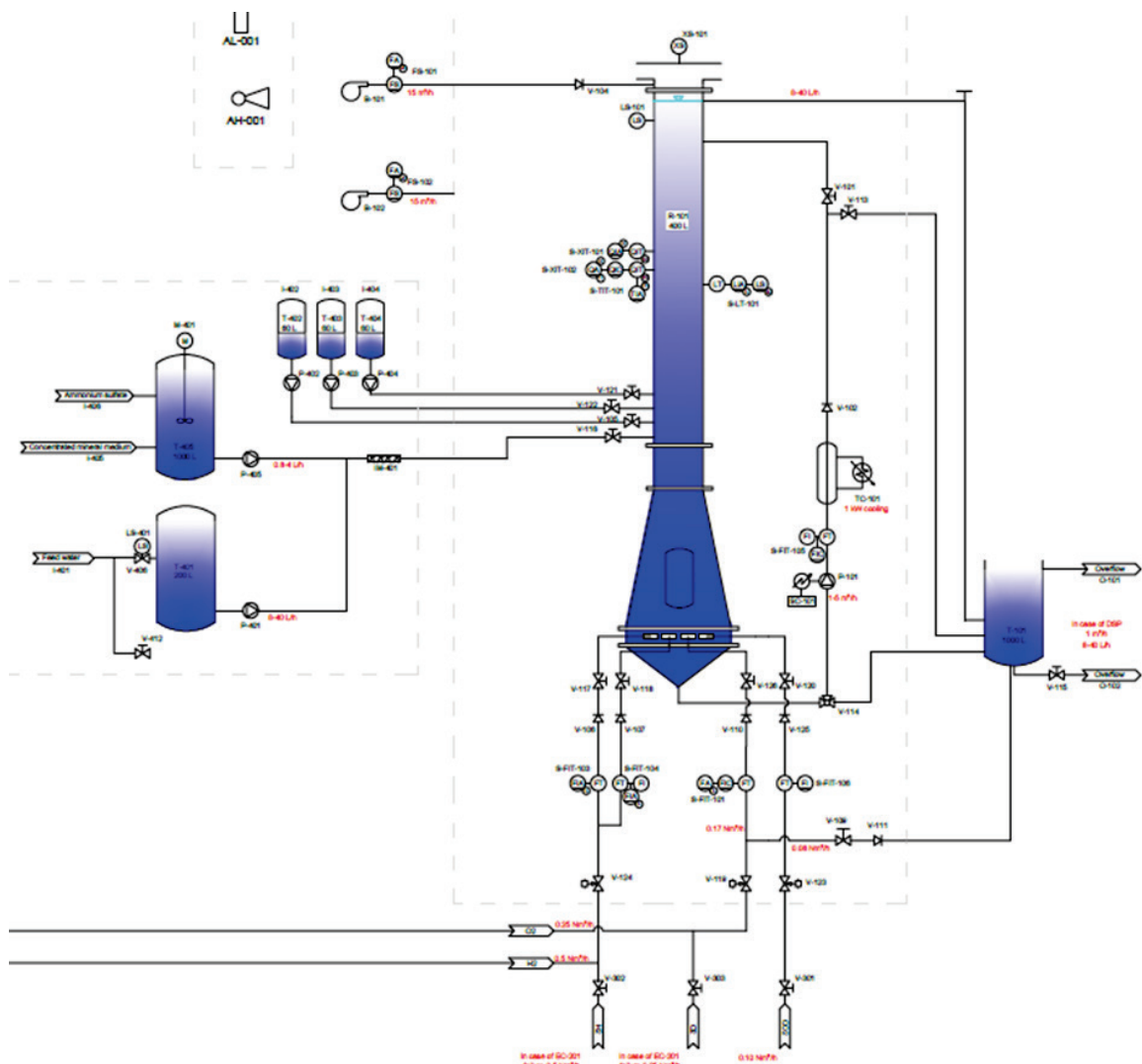


Vers groeimeidium wordt in het midden van de reactor toegevoerd. Het effluent van de reactor wordt verzameld nadat het is overstroomd boven in het cilindrische deel van de reactor. De kooldioxide wordt aan de reactor toegevoerd vanuit commercieel verkrijgbare gasflessen. Alle gassen (CO₂; H₂ en O₂) worden in de reactor gebracht met behulp van een viertal keramische begassingsplaten met een ontwerpdebiet van 6 l/min per plaat. Aan de bodemplaat van de reactor is een circulatiepomp gekoppeld met een maximum debiet van 10 m³/uur. In de recirculatieloop is ook een warmtewisselaar ingebouwd voor verwarming en koeling. Hiermee wordt de temperatuur binnen de range van 30 tot 35 °C gehouden. De pH

van het reactormedium wordt door zuur- of loogdosering (1 N HCl respectievelijk 1 N NaOH) geregeld op een waarde van 6,9.

In Figuur 2-5 is een detail opgenomen van het P&ID van de installatie. Voor de volledige P&ID wordt verwezen naar Bijlage X. Naast een P&ID zijn ook een 'Functional description'- en een 'HAZOP'-document beschikbaar. Deze documenten zijn voor het laatst geactualiseerd ten behoeve van de plaatsing van de pilot op de locatie Horstermeer in oktober 2017 [Avecom, 2017].

FIGUUR 2-5 P&ID POWER TO PROTEIN PILOT



2.3 Problemen met en aanpassingen aan de pilotinstallatie

Tijdens het pilotonderzoek dat vanaf mei 2017 afwisselend is uitgevoerd op de RWZI Enschede, de RWZI Horstermeer en bij Avecom in Gent (zie toelichting hoofdstuk 3) hebben bepaalde waarnemingen en specifieke problemen met (onderdelen van) de pilot plant geresulteerd in een aantal aanpassingen aan het oorspronkelijk ontwerp. Onderstaande tabel geeft daarvan een overzicht.

TABEL 2-1 OVERZICHTSTABEL MET AANPASSINGEN AAN DE PILOT GEDURENDE DE LOOP VAN HET ONDERZOEK

waarneming/probleem	oplossing/aanpassing
Periode 17/1/2017 – 8/5/2017 Het bleek lastig om de stroomtoevoer naar de elektrolysecel te programmeren en te regelen via de PLC Door de lage temperaturen in deze periode was een hogere spanning nodig voor de productie van waterstof en zuurstof De aflezing van de gastoevoer van waterstof en zuurstof naar de reactor fluctueerde sterk door de aanwezigheid van water in de geproduceerde gassen. Voor accurate aflezing moeten de gassen droog zijn. Lekkage van het kijkvenster in de reactor. Verstopping van de keramische begassingsplaten voor waterstof door biologische (anaerobe) activiteit.	Enschede Probleem is uiteindelijk niet opgelost Dit probleem is opgelost door installatie van een regelsysteem voor de temperatuur met een verwarmingsbad. Verschillende methoden om de gassen te drogen zijn uitgeprobeerd inclusief kolommen met droogmiddel. Dat bleek tevergeefs. Uiteindelijk is besloten om de flowmeters te bypassen en ze op die manier droog te houden. Uiteindelijk is het kijkvenster volledig dichtgemaakt. Een procedé met onderdompeling in een zwak zure oplossing (ex situ) is ontwikkeld en bleek effectief. Een dergelijk procedé moet elke maand worden herhaald.
Periode 28/7/2017 – 20/10/2017 Breuk van twee keramische platen tijdens reiniging van de platen. Zwartgekleurde anaerobe zones op de wand en bodem van de reactor.	Avecom Gent Met behulp van een Root Cause Analysis is de oorzaak voor het breken van de platen verder uitgediept. 'Gas hammering' is wellicht een onderliggende oorzaak veroorzaakt door het gebruik van een compressor en drukgolven in het systeem bij het wisselen van gasflessen. Besloten is om hier in de praktijk bewuster mee om te gaan. In plaats van ammoniumsulfaat (afkomstig van de NAR pilot) is tijdelijk overgestapt op (industriële) ammoniumchloride om sulfidevorming in de reactor te voorkomen. Een van de nieuwe platen voor zuurstoftoevoer is onder de andere platen geplaatst om op die manier anaerobe condities te voorkomen. Dit bleek op termijn weinig succesvol.
Periode 24/10/2017 – 13/12/2017 Verlies van zuurstofgas als gevolg van lekkage van een drukontlastingsklep De operationele temperatuur van de elektrolysecel blijkt lager dan verwacht.	Horstermeer Waternet Omdat de klep niet essentieel is, is besloten deze te bypassen. Er is een nieuw verwarmings/koelsysteem geïnstalleerd.

Koeling van de reactorinhoud schiet tekort om de temperatuur binnen de range te houden	Er is een additionele koeler bijgeplaatst.
Defect aan de watertoevoerpomp van de elektrolysecel waardoor ook de membranen van de elektrolysecel moesten worden vervangen.	Nieuwe pomp aangeleverd door de leverancier en reparatie van de elektrolysecel
Periode 08/02/2018 – 16/04/2018	Avecom Gent
Toename van nitraat en nitriet concentraties in de reactor wijst op nitrificatie in de reactor (omzetting van ammonium).	Om de groei van nitrificeerder te remmen is 1 mg/l N-allylthiourea (ATU) toegevoegd aan de reactor. Dit had onmiddellijk effect.
Drooglopen van de elektrolysecel is een potentieel risico voor het functioneren van de cel.	Aanbrengen van een flow switch op de toevoer van ultra-puur water moet drooglopen van de cell voorkomen.
De recirculatiepomp werkt niet op het ontwerpdebiet.	De debietmeter blijkt defect en is vervangen. Het systeem heeft een tijd lang op de helft van het ingestelde debiet gefunctioneerd. De toerentalregeling van de pomp is vervolgens manueel uitgevoerd.
De recirculatiestroom raakt de reactor wand bij terugvoer bovenin de reactor. Dit zou kunnen leiden tot ongewenste ontgassing van het reactormedium op die positie	De recirculatie is zodanig gemodificeerd dat de terugvoer in de kolom naar beneden is gericht.
Een van de begassingsplaten blijkt irreversibel vervuild (reinigingsprocedé heeft geen effect).	Het blijkt dat het messing verbindingstuk de plaat intern heeft vervuild. Bij verder gebruik van dit systeem in de toekomst, zou de verbinding beter in RVS uitgevoerd moeten worden.
Algemeen: lage opbrengst van biomassa en lage productiviteit in de reactor. Hiervoor zijn waarschijnlijk meerdere oorzaken aanwijsbaar, zoals het te lage recirculatie-debiet, verstopping van de begassingsplaten, et cetera. Via een Root Cause Analysis is geconcludeerd dat de belangrijkste oorzaak is dat de stofoverdracht van waterstof in deze reactor tekort schiet.	Om de stofoverdracht te verbeteren is besloten een de helft van de waterstof en zuurstof aan de zuigzijde van de circulatiepomp toe te voeren (venturi effect). Dit leidde tot een verbetering van de stofoverdracht en gasomzettingsefficiëntie van 15 %. Daarnaast zijn – buiten de scope van dit onderzoek – andere methoden getest om de stofoverdracht te verbeteren.

2.4 Octrooi-aanvraag

In 2017 is door KWR en Avecom internationaal octrooi aangevraagd voor de '*Bioreactor for aerobic hydrogenotrophic fermentation*' met aanvraagnummer PCT/NL2017/050608 en formele indieningsdatum 15 september 2017 (ref. P112565PC00). Op 22 maart 2018 is het patent gepubliceerd onder het internationale publicatienummer WO 2018/052295 AN.

3 Onderzoek op locatie met de power-to-protein pilot

3.1 Beschrijving onderzoekslocaties

Bij het onderzoek met de power-to-protein (PtP) pilot worden in totaal vier onderzoeksperiodes onderscheiden. Gestart is met onderzoek op de RWZI Enschede (waterschap Vechtstromen) in de periode van 17 januari 2017 tot en met 8 mei 2017 (onderzoeksperiode I). Na noodzakelijke revisies aan de pilot bij de bouwer in Schijndel is deze vervolgens verplaatst naar Avecom in Gent voor hernieuwde opstart eind juli 2017. Onderzoeksperiode II in Gent heeft geduurd tot 20 oktober 2017. De pilot is toen verplaatst naar RWZI Horstermeer (Waternet) en heeft daar gefunctioneerd in de periode van 24 oktober tot 13 december 2017 (onderzoeksperiode III). Door problemen met de pilot is besloten deze voor revisie opnieuw naar Avecom in Gent te transporteren. Op 4 februari 2018 is de pilot daar opnieuw opgestart (onderzoeksperiode IV). Op 17 april 2018 is het onderzoek met de pilot - in het kader van dit project - afgesloten.

Voor het onderzoek gericht op de terugwinning van ammonium is gebruik gemaakt van een bestaande pilotinstallatie van Nijhuis Industries (Nijhuis Ammonium Recovery of NAR-pilot). Over de keuze voor deze pilot en het onderzoek met de pilot op de onderzoekslocaties wordt verder ingegaan in hoofdstuk 4.

3.2 Chronologische beschrijving projectverloop

Tabel 3-1 geeft een chronologische weergave van de belangrijkste gebeurtenissen tijdens het onderzoek inclusief de begin en einddatum van elke onderzoeksperiode.

TABEL 3-1 BESCHRIJVING VAN HET PROJECTVERLOOP

Datum	Activiteit	Onderzoeksperiode
2 november 2015	Eerste expert sessie betreffende reactor ontwerp	
12 november 2015	Kick off meeting stuurgroep fase 2 project power-to-protein	
1 december 2015	Tweede expert sessie betreffende reactor ontwerp	
14 januari 2016	Derde expert sessie betreffende reactor ontwerp	
15 januari 2016	Start ontwerpfase pilot	
22 maart 2016	Eerste besprekingen met waterschappen i.v.m. vergunningstraject	
26 april 2016	HAZOP afgerond op basis van reactorontwerp	
1 juni 2016	Start bouw pilot	
21 juni 2016	Tweede stuurgroepvergadering	
20 oktober 2016	Derde stuurgroepvergadering	
25 oktober 2016	Start vergunningsaanvraag WS Vechtstromen	
december 2016	Opstart en eerste testen met de PtP-pilot in Schijndel	
9 januari 2017	Transport van de PtP-pilot naar Enschede	
17 januari 2017	Opstart van de pilot op locatie RWZI Enschede (start onderzoeksperiode I)	
29 maart 2017	Vierde stuurgroep vergadering	
29 maart 2017	Officiële start pilotonderzoek PtP in Enschede	I
8 mei 2017	Transport van de PtP-pilot naar Schijndel voor revisiewerkzaamheden (einde onderzoeksperiode I)	
9 juni 2017	Opstart NAR-pilot op locatie RWZI Enschede	
13 juni 2017	Transport van de PtP-pilot naar Gent voor gecontroleerde herstart	
23 juni 2017	Vijfde stuurgroepvergadering	
28 juli 2017	Opstart van de pilot bij Avecom in Gent (start onderzoeksperiode II)	
26 juni 2017	Eerste spiketesten op NAR-pilot	II
6 augustus 2017	Tweede spiketesten op NAR-pilot	
15 september 2017	Octrooi-aanvraag ingediend voor reactorontwerp PtP	
4 oktober 2017	Zesde stuurgroepvergadering	
18 oktober 2017	Einde onderzoeksperiode II in Gent.	
20 oktober 2017	Transport van de PtP-pilot naar RWZI Horstermeer (start onderzoeksperiode III)	
24 oktober 2017	Opstart NAR-pilot op locatie RWZI Horstermeer	
13 december 2017	Zevende stuurgroepvergadering	
13 december 2017	Afsluiten onderzoek Horstermeer (einde onderzoeksperiode III)	
22 december 2017	Transport PtP-pilot naar Gent voor gecontroleerde herstart	III
8 februari 2018	Opstart van de pilot bij Avecom in Gent (start onderzoeksperiode IV)	
17 april 2018	Achtste stuurgroepvergadering	

3.3 Materialen en methoden

Tijdens het gehele onderzoek is gebruik gemaakt van de PtP-pilotinstallatie zoals uitgebreid beschreven in hoofdstuk 2. De meeste onderdelen van de pilot met uitzondering van de gasflessen en de opvang van de overloop van de reactor zijn buiten de container geplaatst (zie Figuur 3-1; het gasrek is niet zichtbaar want aan de andere zijde van de container gepositioneerd).

FIGUUR 3-1 POWER-TO-PROTEIN PILOT OP LOCATIE IN ENSCHEDE



De volumetrische belasting (volumetric loading rate) van de reactor wordt berekend volgens vergelijking 1. Hierin is XH_2 de COD-belasting per dag in de vorm van waterstof (g COD- H_2 /dag) en V_r het reactorvolume in liter.

$$\text{Volumetrische belasting, } Bv = \frac{XH_2(gCOD-H_2/day)}{V_r (L)} \quad \text{vergelijking 1}$$

De productiviteit, uitgedrukt in gram CDW (droge celgewicht) per liter reactor per dag, wordt berekend volgens vergelijking 2. Hierin is CDW het droge celgewicht in grammen TSS (total suspended solids) per liter en Q_r het influent- en effluentdebiet van de reactor in liter per dag.

$$\text{Productiviteit (gCDW/L.day)} = \frac{CDW (gTSS/L) \times Q_r (L/day)}{V_r (L)} \quad \text{vergelijking 2}$$

De opbrengst van biomassa (biomass yield, YH_2) wordt op basis van de productiviteit (vergelijking 2) en de volumetrische belasting (vergelijking 1) als volgt berekend:

$$YH_2 = \frac{\text{Productiviteit (gTSS/L.day)}}{Bv (gCOD-H_2/L.day)} \quad \text{vergelijking 3}$$

In onderzoeksperiode IV (locatie Avecom Gent) zijn de aan de reactor toegevoerde en afgevoerde gassen bemeten met behulp van de waterverplaatsingsmethode (water displacement method).

De gasopname efficiëntie van de reactor wordt berekend volgens vergelijking 4, met Q_{in} het gasdebiet de reactor in en Q_{out} het gasdebiet de reactor uit.

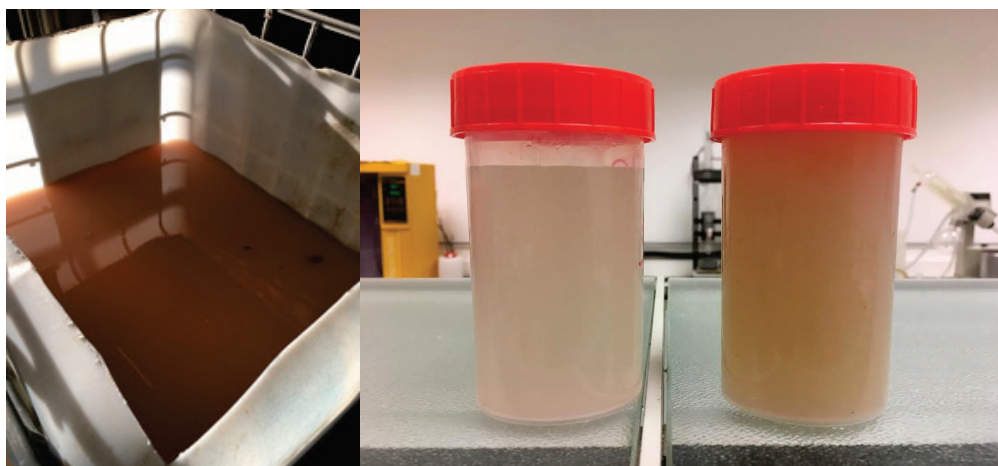
$$\text{Total gasopname efficiëntie (\%)} = \frac{(Q_{in} - Q_{out})}{Q_{in}} \times 100 \quad \text{vergelijking 4}$$

Om de efficiëntie van de waterstofconversie te kunnen berekenen, zijn de waterstofconcentraties in gas gemeten met een door Avecom ontwikkelde 'lugol methode'. Bij deze methode wordt een gasmonster geïnjecteerd in een 10 mL kolom gevuld met lugol, een oplossing van kaliumjodide en jodium in water (KI/I_2). De verplaatsing van gas in de kolom is proportioneel met de concentratie van waterstof in het gasmonster. Om de methode te kalibreren zijn ook gasmonsters met bekende waterstofconcentratie in de kolom geïnjecteerd.

3.4 Pilotonderzoek op locatie RWZI Enschede (onderzoekperiode I)

Tijdens deze onderzoeksperiode kon geen stabiele continue bedrijfsvoering worden bereikt als gevolg van technische problemen met de apparatuur en de processturing (zie Tabel 2-1). De reactor is opgestart door de reactor te vullen met 70 liter groeimedium en te enten met biomassa uit een 3-liter labschaal reactor. De reactor is gedurende twee weken in batch-mode bedreven waarbij het reactorvolume toenam tot 400 liter. De concentratie biomassa nam in die periode toe van 0,3 naar 1,5 g TSS per liter. De stikstofopname in die periode is berekend op 150 mg NH_4 -N per liter per dag. Door de instabiele bedrijfsvoering is helaas geen steady state situatie worden bereikt.

FIGUUR 3-2 FOTO'S VAN DE OPSTART VAN DE REACTOR IN ENSCHEDE. GROEI VAN BIOMASSA IN BATCH MODE VAN 0,3 NAAR 1,5 G TSS/LITER.



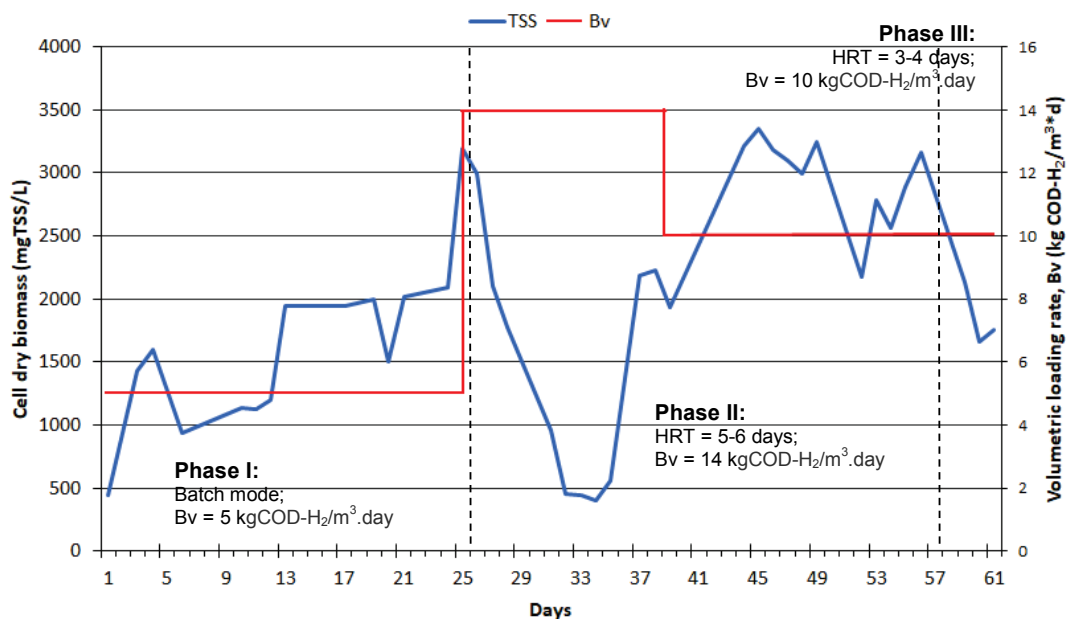
3.5 Pilotonderzoek bij Avecom in Gent (onderzoekperiode II)

In deze onderzoeksperiode is de pilot gedurende een periode van 66 dagen in drie fases bedreven. In fase I (25 dagen) werkte de installatie in een batch modus. De batch modus houdt in dat geen volume uit de reactor wordt gespuid (waardoor de verblijftijd in feite oneindig groot is). Fase II is de pilot gedurende 32 dagen in een continue modus bedreven met een hydraulische verblijftijd tussen 5 en 6 dagen. Dit betekent dat water met ammonium en groeimedium aan de reactor is toegevoerd en een zelfde volume reactorinhoud per tijdseenheid overloopt. In de laatste fase is de hydraulische verblijftijd verder verlaagd naar 3 tot 4 dagen. In deze onderzoeksperiode is de volumetrische belasting van het systeem verhoogd van 5 kg $COD-H_2/m^3.dag$ (fase I) naar 14 kg $COD-H_2/m^3.dag$ tussen dag 26 en 38. Uiteindelijk is de belasting verlaagd naar 10 $COD-H_2/m^3.dag$ voor de resterende periode.

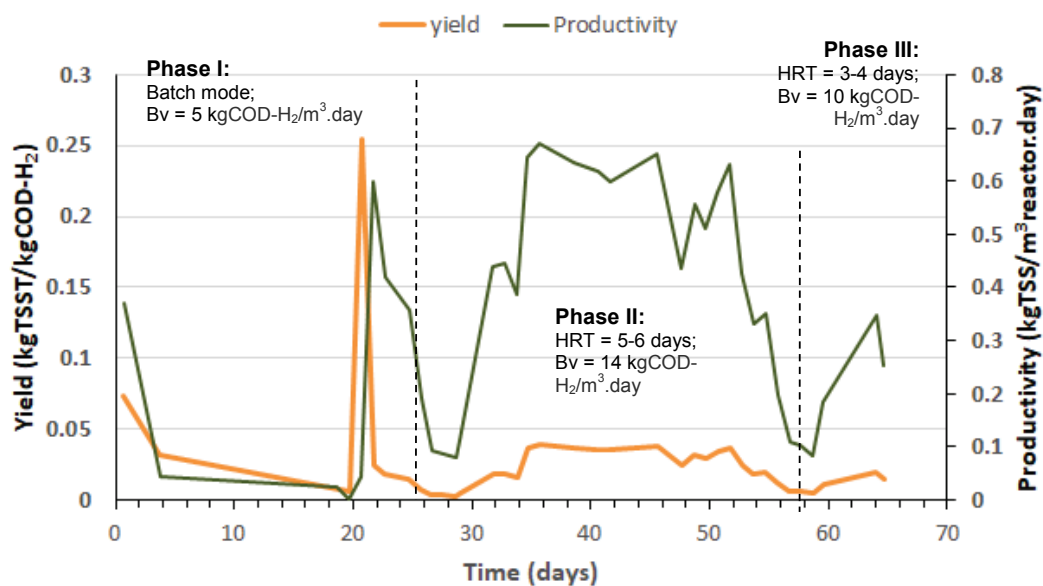
Zoals uit Figuur 3-3 blijkt neemt in fase I de hoeveelheid biomassa toe van 0,5 g TSS/L naar 3,0 g TSS/L in 25 dagen. De gemiddelde productiviteit in deze periode is 0,2 kg TSS/ $m^3.dag$. Het omzetten naar een continue modus in fase II resulteert in de eerste 11 dagen een scherpe daling van de concentratie biomassa. Daarna herstelt zich de concentratie biomassa weer en komt uit op een niveau van 2 g TSS/L. Hierbij is een gemiddelde productiviteit

bereikt van 0,5 kg TSS/m³.dag met een piek van bijna 0,7 kg TSS/m³.dag. Dit zijn tevens de hoogste bereikte waarden in het hele pilotonderzoek. De opbrengst bedraagt 0,04 kg TSS/kg COD-H₂. Gedurende de hele onderzoeksperiode is gebruik gemaakt van een ammoniumchloride oplossing als bron voor ammonium, met uitzondering van de periode tussen dag 13 en 39 waarin ammoniumsulfaat is gedoseerd die is geproduceerd in de NAR-pilot. Uit de zwartkleuring van delen van het reactoroppervlak, bijvoorbeeld langs de wand en onder de begassingsplaten, kan worden opgemaakt dat een deel van het sulfaat door sulfaatreducerende bacteriën (SRB) wordt omgezet naar sulfide in anoxische/anaerobe zones. Deze SRB kunnen ook waterstof benutten als elektronendonor zodat ze concurreren met de waterstofoxiderende SCP-bacteriën. Om het verlies aan waterstof te minimaliseren, moeten anaerobe zones worden voorkomen en voor zover dat niet mogelijk is moet de sulfaat-concentratie zo laag mogelijk worden gehouden. Daarnaast zullen anoxische/anaerobe zones in algemene zin de samenstelling en kwaliteit van het microbiom negatief beïnvloeden.

FIGUUR 3-3 VOLUMETRISCHE BELASTING VAN DE REACTOR EN HET GEHALTE BIOMASSA (DROGE CELGEWICHT; CDW) IN DE REACTOR TIJDENS ONDERZOEKSPERIODE II.



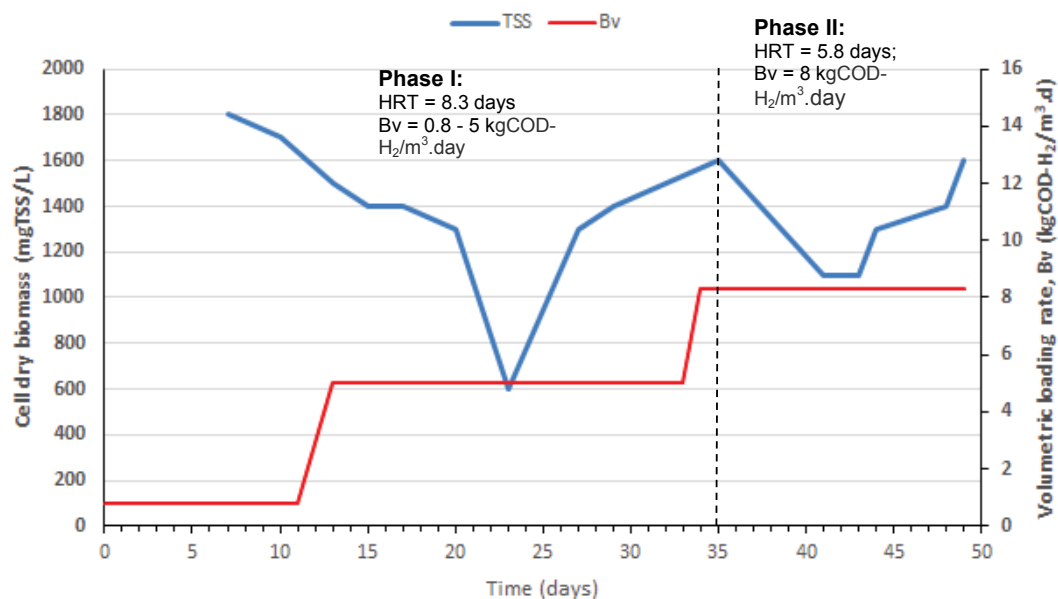
FIGUUR 3-4 BIOMASSA PRODUCTIVITEIT EN OPBRENGST GEDURENDE ONDERZOEKSPERIODE II



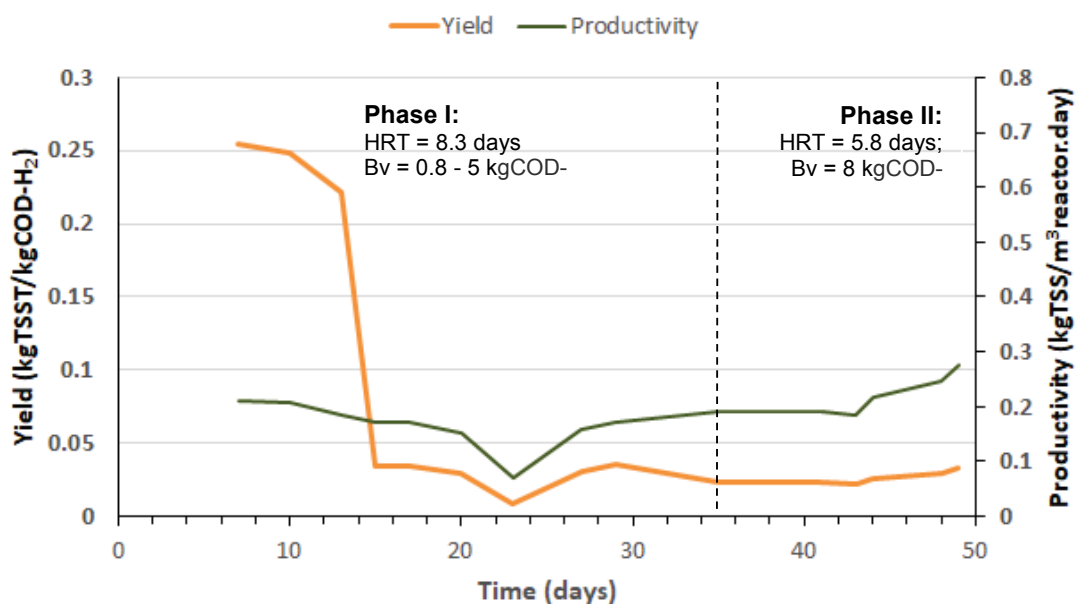
3.6 Pilotonderzoek op locatie RWZI Horstermeer (onderzoeksp periode III)

In deze onderzoeksperiode is de pilot gedurende een periode van 49 dagen in twee fases bedreven. In fase I functioneerde de reactor in een continue modus gedurende 35 dagen bij een hydraulische verblijftijd van 8,3 dagen. Tijdens fase II, vanaf dag 36 tot en met dag 49) is de hydraulische verblijftijd verlaagd naar 5,8 dagen. Gedurende de eerste 13 dagen van fase I was de volumetrische belasting van het systeem 0,8 kg COD-H₂/m³.dag. Vervolgens is de belasting verhoogd naar 5 kg COD-H₂/m³.dag tussen dag 13 en dag 34. In fase 2 is de belasting verder verhoogd naar 8,3 kg COD-H₂/m³.dag (zie Figuur 3-5).

FIGUUR 3-5 VOLUMETRISCHE BELASTING VAN DE REACTOR EN HET GEHALTE BIOMASSA (DROGE CELGEWICHT; CDW) IN DE REACTOR TIJDENS ONDERZOEKSPERIODE III.



FIGUUR 3-6 BIOMASSA PRODUCTIVITEIT EN OPBRENGST GEDURENDE ONDERZOEKSPERIODE III

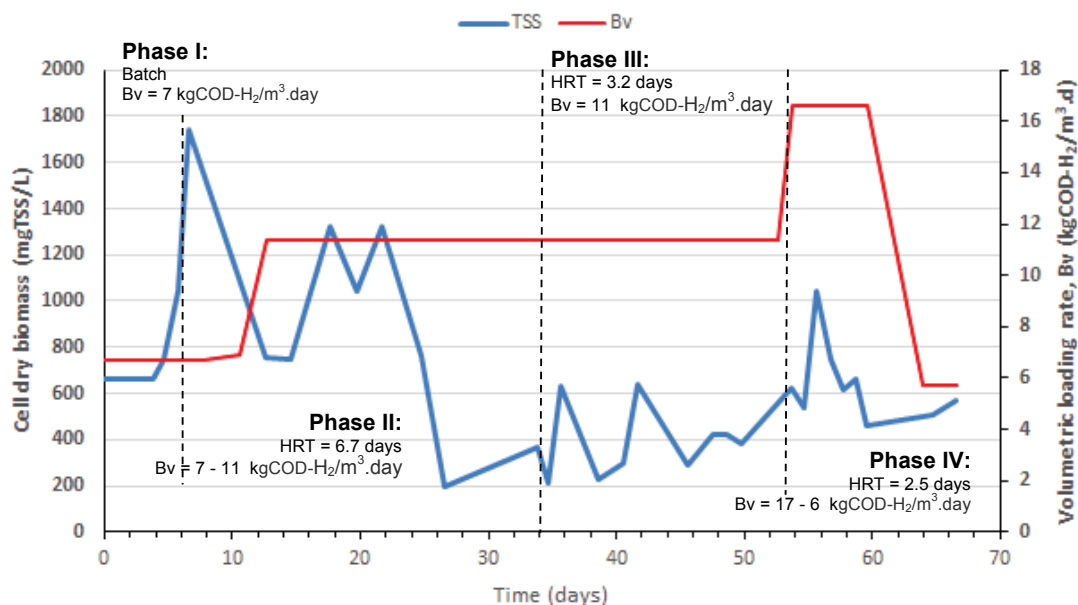


Na de start in fase I is de biomassaconcentratie gedaald van 1,8 naar 0,6 gTSS/L. Na dag 24 neemt de biomassaconcentratie weer toe en stabiliseert op een gemiddelde waarde van 1 gTSS/L (zie Figuur 3-5). Uit Figuur 3-6 blijkt dat de maximale productiviteit in deze onderzoeksperiode is blijven steken op 0,2 kg TSS/ m^3 .dag met een opbrengst van 0,04 kg TSS/kg COD- H_2 . In deze onderzoeksperiode is ook biomassa verzameld voor nadere analyse van het SCP-eiwit. De resultaten van deze analyse zijn verder uitgewerkt in paragraaf 5.6. De onderzoeksperiode moest worden afgebroken door een defect aan de elektrolysecel.

3.7 Pilotonderzoek bij Avecom in Gent (onderzoeksperiode IV)

In de laatste onderzoekfase kunnen vier fases worden onderscheiden. De reactor is gestart in de batch modus gedurende 6 dagen. Omdat de elektrolysecel nog niet beschikbaar was op dat moment, is waterstof vanuit gasflessen aan de reactor toegevoerd. De zuurstofconcentratie tijdens opstart is opzettelijk laag gehouden om inhibitie te vermijden. Tijdens lab trials was namelijk vastgesteld dat de groei van waterstofoxiderende bacteriën wordt geremd bij zuurstofconcentraties boven 2 mg/l. In fase II (dag 7 tot dag 34) is de reactor in een continue modus bedreven met een hydraulische verblijftijd van 6,7 dagen. In fase III (dag 35 tot dag 53) is de verblijftijd verlaagd naar 3,2 dagen en vervolgens in fase IV (dag 54 tot dag 66) verder naar 2,5 dagen. De volumetrische belasting is aangepast zoals weergegeven in Figuur 3-7, dat wil zeggen van 7 $\text{kg COD-H}_2 / \text{m}^3$.dag gedurende de eerste 10 dagen naar 11 $\text{kg COD-H}_2 / \text{m}^3$.dag tussen dag 11 en 54, vervolgens naar 17 $\text{kg COD-H}_2 / \text{m}^3$.dag tussen dag 54 en 59 en terug naar 6 $\text{kg COD-H}_2 / \text{m}^3$.dag in de laatste 6 dagen.

FIGUUR 3-7 VOLUMETRISCHE BELASTING VAN DE REACTOR EN HET GEHALTE BIOMASSA (DROGE CELGEWICHT) IN ONDERZOEKSPERIODE IV

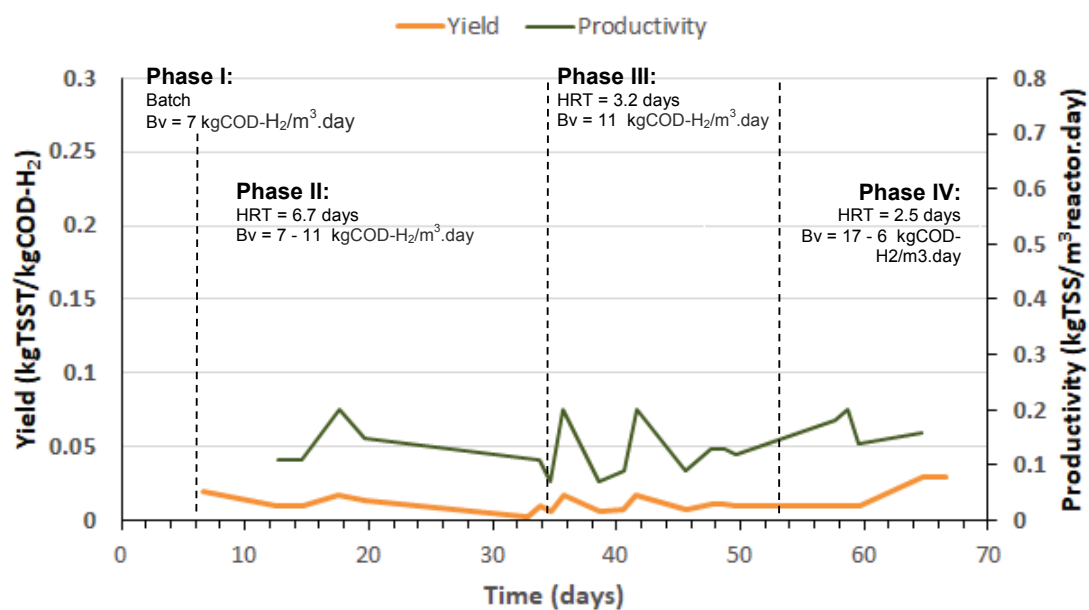


Gedurende deze onderzoeksfase zijn slechts drie van de vier keramische begassingsplaten gebruikt omdat één van de platen irreversibel verstopt bleek. Om het gebruik van potentieel goedkopere stikstofbronnen te onderzoeken, zijn verschillende stikstofbronnen getest waaronder ammoniumchloride (dag 0 - 28), kaliumnitraat (dag 29 - 53) en ammoniumnitraat (dag 54 - 64). Vastgesteld is dat nitraat-N door waterstofoxiderende bacteriën onder anaerobe condities kan worden gebruikt als elektronendonator (in plaats van zuurstof). Dit betekent dat het gebruik van nitraat mogelijk is, maar tegelijkertijd moeten anaerobe zones in de reactor worden vermeden, omdat ze leiden tot een verminderde kwaliteit van het microbiom en consumptie van waterstof.

De biomassaconcentratie in de reactor fluctueerde sterk tijdens deze onderzoeksfase. In de eerste 6 dagen is een toename vastgesteld van 0,7 naar 1,7 g TSS/L met een overall productiviteit van 0,3 g TSS/m³.dag. Na de overgang op een continue modus daalt de biomassaconcentratie aanvankelijk scherp naar 0,2 g TSS/L op dag 26. Daarna treedt herstel op en stabiliseert zich de biomassa op een concentratie van gemiddeld 0,4 g TSS/L. Gedurende fasen II en III lag de maximale productiviteit rond de 0,15 kg TSS/m³.dag met een maximale opbrengst van 0,02 kg TSS/kg COD-H₂ (zie Figuur 3-8).

Aan het eind van fase IV (na dag 65) is ook de efficiëntie van waterstofconversie gemeten. Deze ligt slechts tussen de 5 en 10 %. Ten slotte is ook in deze onderzoeksperiode biomassa verzameld voor nadere analyse van het SCP-eiwit. De resultaten van deze analyse zijn terug te vinden in paragraaf 5.4.

FIGUUR 3-8 BIOMASSA PRODUCTIVITEIT EN YIELD GEDURENDE ONDERZOEKSPERIODE IV



4 Ammoniakterugwinning uit rejectiewater

4.1 Selectie ammoniarecovery techniek

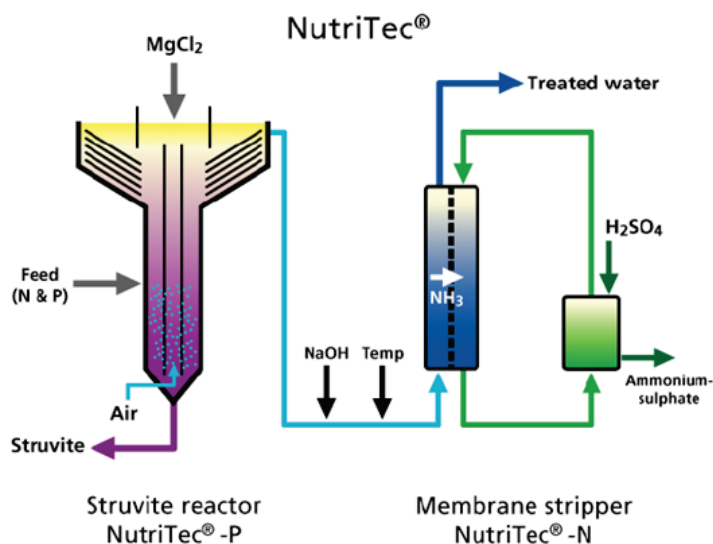
Voor ammonium zal in dit project een directe koppeling worden gemaakt met de afvalwaterketen. Daarbij zal gebruik worden gemaakt van rejectiewater afkomstig van een slibvergisting op de onderzoekslocaties. Uit het fase 1 onderzoek bleek dat het terugwinnen van ammonium uit rejectiewater en de productie van waterstof (elektrolyse/stoomconversie) kostenbepalend zijn bij de productie van SCP.

Op dit moment kan het terugwinnen van ammonium via luchtstrippen worden beschouwd als de best beschikbare techniek. Los van het Power-to-Protein concept bestaat in algemene zin veel belangstelling voor recovery van ammonium uit de afvalwaterketen, mede gebaseerd op het principe van de RWZI als grondstoffenfabriek. Ammoniak terugwinning via luchtstrippen is een energie-intensief proces waarbij de temperatuur van het rejectiewater moet worden verhoogd tot 65 – 70 °C en waarbij intensief moet worden belucht. Het chemicaliënverbruik is aanzienlijk omdat de pH van het rejectiewater moet worden verhoogd met natronloog om het evenwicht ammonium/ammoniak te verschuiven in de richting van ammoniak en daarnaast een zwavelzuuroplossing moet worden gebruikt als wasvloeistof om het ammoniak als ammoniumsulfaat te binden. Deze techniek voor ammoniumterugwinning wordt in onder andere Duitsland en Zwitserland al op grote schaal toegepast. Nijhuis Water Technology BV brengt in Nederland dit proces als NAR-proces op de markt, voornamelijk vanuit het oogpunt van maximalisatie van de waarde van het rejectiewater (digestaat) van de slibvergisting. Uitgaande van een ammoniumconcentratie van 2,5 g/l in het rejectiewater van de slibvergisting kan bij een procestemperatuur van 70 °C en een pH 9, 80 % van het ammonium worden teruggewonnen. De netto kosten van het proces zijn afhankelijk van de ammoniumconcentratie in het rejectiewater en variëren van 1,7 - 2,1 €/kg N (uitgaande van de beschikbaarheid van restwarmte, anders 2,2 - 2,6 €/kg N). Die kosten nemen geleidelijk af tot een niveau van 1 - 1,3 €/kg N bij een ammoniumconcentratie van 4 g/l (Menkveld, 2015).

Naast het klassieke stripproces is het ook mogelijk gebruik te maken van gasdoorlatende membranen als oppervlak voor overdracht tussen rejectiewater en de absorptievloeistof (H_2SO_4 -oplossing). Het principe dat hierbij toegepast wordt is in Figuur 4-1 zichtbaar gemaakt. Uit de figuur wordt duidelijk dat hiermee het gebruik van lucht als tussenmedium kan worden vermeden. Met behulp van de membranen kan in een klein volume veel oppervlak worden gerealiseerd. Hierdoor kunnen de installaties aanzienlijk compacter worden gerealiseerd. Bij de toegepaste hydrofobe holle vezel membranen kunnen alleen gasvormige stoffen het membraan passeren, door aan weerszijden van het membraan, net als in een klassieke stripper een groot concentratie verschil voor NH_3 te creëren, vindt overdracht van NH_3 plaats. Belangrijk hierbij is dat het rejectiewater (afvalwater) alleen langs de membranen stroomt en er niet doorheen geperst hoeft te worden. Hierdoor blijven de weerstanden in het systeem laag en kan een laag energieverbruik worden gerealiseerd. Ook hier bestaat het product uiteindelijk uit een ammoniumsulfaatoplossing. Voor de membranen gelden vergelijkbare optimalisaties als voor de klassieke stripper, de stofoverdracht wordt verhoogd met een hogere pH en een hogere temperatuur. De

temperatuur zal over het algemeen wat lager worden gekozen om de gelijktijdige overdracht van waterdamp te beperken.

FIGUUR 4-1 MEMBRAANSTRIPPEN ALS ALTERNATIEF VOOR AMMONIUM RECOVERY (FIRMA SUSTEC)



Deze technologie wordt onder andere door Sustec (DMT-groep) onder de naam NutriTec® op de markt gebracht. Sustec geeft globaal een netto kostprijs af van 1,3 €/kg N (mondelinge informatie Sustec).

Bij het membraanstripproces is lucht als tussenfase verdwenen. Dit betekent dat dit proces alleen ammonium als ammoniumsulfaatoplossing kan leveren ten behoeve van het power-to-protein proces. Op termijn is hier mogelijk een integratie denkbaar waarbij het ammoniakgas direct wordt overgedragen aan de bacteriesuspensie.

Bij het klassieke luchtstripproces kan in principe ook de gasfase met ammoniak rechtstreeks worden gebruikt en toegevoerd aan de power-to-protein reactor, waarbij het niet noodzakelijk is om eerst ammoniumsulfaat te vormen. Hiervoor zal het in de praktijk wel noodzakelijk zijn om de luchtfase te bufferen, wat kan leiden tot praktische bezwaren. Bovendien wordt de opname van ammonium in de reactorsuspensie dan afhankelijk van de zuurgraad in het reactorsysteem waarvoor een extra regeling nodig is en waarvan het effect op de productiecapaciteit van de waterstofoxiderende bacteriën onbekend is. Vooralsnog is daarom gekozen voor het toevoeren van ammoniumsulfaat aan de reactor.

Op grond van het meer experimentele karakter van het membraanstripproces is uiteindelijk besloten om te kiezen voor het klassieke luchtstripproces als leverancier voor het ammoniumsulfaat ten behoeve van de power-to-protein pilot. Belangrijkste overweging daarbij was dat, naast het bewezen karakter van het proces, ook de kans op overdracht van ongewenste micro-organismen vanuit de afvalwaterketen kleiner is geschat. Belangrijkste onzekerheid met betrekking tot het membraanstripproces is de mogelijke lekkage van water in het membraan naar de productzijde. Daarnaast speelden ook meer basale redenen zoals beschikbaarheid en kosten een rol bij het besluit.

4.2 Inzet van de Nijhuis Ammonia Recovery pilot

Met Nijhuis Industries zijn afspraken gemaakt over de inzet van de NAR-pilot op beide onderzoekslocaties in Enschede en Horstermeer. Uitgangspunt daarbij is dat de NAR-pilot wordt toegepast op de natte fractie (rejectiewater of digestaat) afkomstig van de slibvergisting op beide locaties. Het doel van dit onderzoek was enerzijds vast te stellen of de kwaliteit van het geproduceerde ammonium voldoende is als grondstof voor de productie van SCP en anderzijds de economische haalbaarheid van het proces als onderdeel van het totale concept aan te tonen.

Naast rejectiewater van de aangegeven onderzoekslocaties is in de NAR-pilot ook rejectiewater afkomstig van de RWZI Hengelo Overijssel behandeld. Hiertoe is besloten omdat de slibverwerking in Hengelo een grote centrale slibverwerking is die bovendien gebruik maakt van thermisch drukhydrolyse (TPH) als voorbehandeling. Het vormt hiermee een meer representatieve casus voor het opstellen van een business case dan de andere twee onderzoekslocaties. Daarnaast is het zo dat de voorbehandeling van het slib via TPH uiteindelijk leidt tot hogere ammoniumconcentraties in het rejectiewater (zie Tabel 4-1).

TABEL 4-1 GEMIDDELDE SAMENSTELLING REJECTIEWATER VOOR DE TWEE ONDERZOEKSLOCATIES EN RWZI HENGLO

Parameter:	Unit:	Enschede	Horstermeer	Hengelo
NH ₄ -N	mg/l	852	776	1640
Total carbonaten uitgedrukt in CO ₂	mg/l	2485	2430	4843
temperatuur	°C	31	22.3	11 [#]
pH	-	7.7	7.6	8

De lage temperatuur van het rejectiewater Hengelo wordt veroorzaakt door het transport van het rejectiewater naar RWZI Horstermeer

Het onderzoek naar de microbiologische kwaliteit van het geproduceerde ammoniumsulfaat staat verder beschreven in hoofdstuk 5. In dit hoofdstuk zijn de technische en economische resultaten van de inzet van de NAR-pilot kort samengevat. Die samenvatting is gemaakt op basis van het door Nijhuis Industries opgestelde eindrapport van het NAR-onderzoek [Nijhuis Industries, 2018]. Met het onderzoek is beoogd om de volgende onderzoeksvragen te beantwoorden:

- Wat zijn de optimale instellingen van de NAR met betrekking tot:
 - gas/water ratio voor CO₂ strippen?
 - pH/temperatuur?
 - gas/water ratio voor ammoniak strippen ?
- Wat zijn de optimale operationele kosten met betrekking tot:
 - chemicaliënverbruik (loog, zwavelzuur, anti-schuim)?
 - vereiste warmte input?
 - Elektriciteitsverbruik?
- Hoeveel ammonia kan worden teruggewonnen?
- Wat is de concentratie en specifieke kwaliteit van het geproduceerde ammoniumsulfaat?
- Hoe vertaalt zich dit naar een full-scale business case?

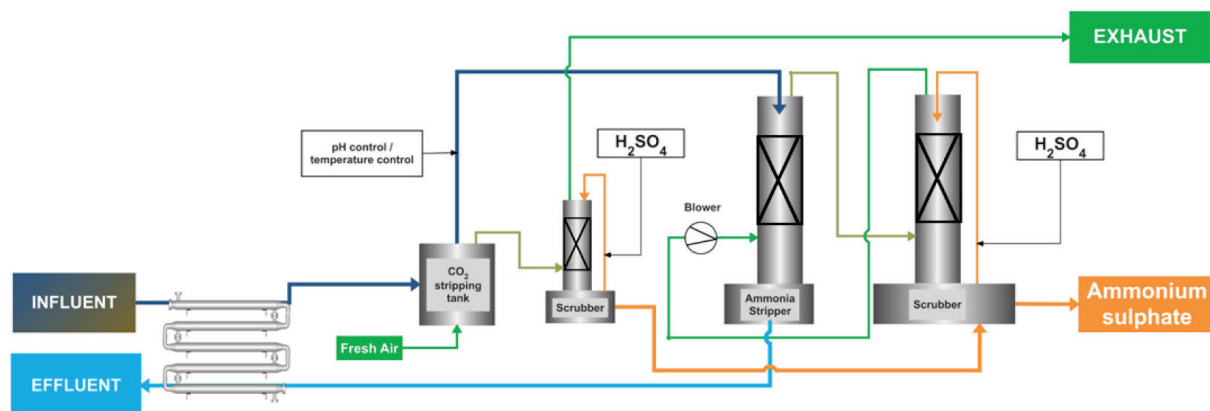
FIGUUR 4-2 NAR PILOT EN POWER-TO-PROTEIN PILOT OP LOCATIE BIJ RWZI HORSTERMEER



Het principe van ammonium terugwinnen is gebaseerd op verhogen van de pH en de temperatuur zodat ammoniak als gas kan worden gestript. De ammoniak wordt vervolgens in een scrubber uit de lucht gewassen met behulp van een zuuroplossing, bijvoorbeeld met een zwavelzuuroplossing (zie Figuur 4-3). Dat resulteert in vloeibaar ammoniumsulfaat wat kan worden hergebruikt als meststof of als grondstof voor de productie van SCP. De hoeveelheid loog die nodig is voor het verhogen van de pH in de toevoer naar de ammoniakstripper wordt beperkt door de buffercapaciteit van het rejectiewater te verlagen met behulp van een CO₂-stripper. Door het strippen van koolzuurgas wordt via het kalkkoolzuurevenwicht de bicarbonaatconcentratie verlaagd en loopt tegelijkertijd de pH op. Temperatuur en pH zijn de belangrijkste sturingsparameters in het proces. Optimalisatie richt zich vooral op het beperken van het loogverbruik en het beperken van de warmte-inbreng. Dit betekent dat in praktijksituaties de warmte in het effluent van de NAR zoveel mogelijk wordt teruggewonnen en hergebruikt. In de pilot wordt het systeem verwarmd met heet water uit een dieselboiler. De concentratie van het ammoniumsulfaat wordt geregeld met een dichtheidsmeter die stuurt op een gewenst percentage van 38 tot 39 % zodat kristallisatie van ammoniumsulfaat wordt voorkomen.

Het onderzoek met de NAR-pilot op de RWZI Enschede is uitgevoerd in de periode van 9 juni tot 15 augustus 2017. Na een korte revisieperiode is de pilot op de locatie Horstermeer ingezet vanaf 18 oktober tot en met 24 oktober met rejectiewater afkomstig van die locatie en van 13 december tot en met 19 december 2017 met rejectiewater aangevoerd van de RWZI Hengelo.

FIGUUR 4-3 FLOWSHEMA VAN DE NAR-PILOT



4.3 Samenvatting resultaten NAR pilot

De testen met de NAR-pilot op de beide onderzoekslocaties zijn succesvol geweest en hebben aangetoond dat ammoniumterugwinning technologisch haalbaar is. De testen op RWZI Enschede hebben veel hinder ondervonden van de aanwezigheid van plastic deeltjes in het rejectiewater. Deze deeltjes zorgden voor slijtage aan de pompen en verstopping van de sproeinnozzles in de ammoniakstripper. Met een zelfreinigend filter konden de problemen worden verholpen. Op RWZI Horstermeer heeft de installatie probleemloos gedraaid. Daarbij is een product gevormd in de vorm van geconcentreerd ammoniumsulfaat (tot 38 % w/w) dat uitstekend als grondstof kan dienen voor de productie van SCP.

Door middel van het strippen van CO₂ wordt de pH van rejectiewater typisch verhoogd van 7,5 – 8 tot waarden van 8,5 – 9. Hierdoor kan al, ook zonder toevoeging van natronloog, al zo'n 40 tot 50 % NH₄-N worden teruggewonnen. In dit onderzoek was dat percentage voor het rejectiewater afkomstig van de RWZI Hengelo zelfs 65 – 70 %. Dat komt door de hogere ammoniumconcentraties in het rejectiewater uit Hengelo die in de praktijk gelijk opgaan met de CO₂-concentratie waardoor in dat geval ook de hoogste pH-waarden zijn bereikt.

Door dosering van natronloog wordt het rendement verder verbeterd. Na optimalisatie van de gas/water-ratio van de ammoniakstripper door aanpassing van de blower is op de locatie Horstermeer een verwijderingsrendement gehaald van gemiddeld 85 % bij een dosering van 2 liter 33% NaOH per m³ rejectiewater. Op dezelfde locatie is met het rejectiewater van RWZI Hengelo een rendement gehaald van gemiddeld 81 % bij een vergelijkbare loogdosering.

Door de dosering natronloog te verhogen tot 3,5 liter 33 % NaOH per m³ kon het rendement verder worden verhoogd tot maximaal 90 %. Tabel 4-2 geeft een overzicht van het gemiddelde chemicaliënverbruik tijdens normaal bedrijf van de NAR-pilot. Een antischuim-middel is noodzakelijk vanwege schuimvorming en de relatief geringe bovenruimte in de CO₂-stripper. Door in het ontwerp van een fullscale installatie meer ruimte te dimensioneren is de inzet van het middel in die situatie niet nodig.

TABEL 4-2 GEMIDDELDE CHEMICALIËNVERBRUIK GEDURENDE NORMAAL BEDRIJF VAN DE NAR-PILOT

Parameter	Unit	Enschede	Horstermeer	Hengelo
Natronloog 33 %	l/m ³	2.5 – 3.5	2	2.5 - 3.3
Zwavelzuur 96 %	l/m ³	1,8	1,6	2,9
Antischuimmiddel	l/m ³	0.2	0.2	0.2

Het verhogen van de temperatuur van het rejectiewater verbruikt een significante hoeveelheid energie. In Tabel 4-3 is een overzicht gegeven van de gemeten temperaturen en temperatuurranges in de verschillende onderdelen van de NAR-pilot tijdens normaal bedrijf.

TABEL 4-3 TEMPERATUURMETINGEN PER LOCATIE GEDURENDE NORMAAL BEDRIJF VAN DE NAR-PILOT

Parameter	Unit	Enschede	Horstermeer	Hengelo
Temp buffer tank	°C	31	22,3	11
Temp pre-heating tank	°C	35	40	34
Temp na warmtewisselaar	°C	50-55	48-50	50-55
Temp in CO ₂ stripper	°C	62-68	65-68	66-69
Temp voor ammoniakstripper	°C	68-70	68-70	68-70
Temp effluent	°C	63	63	63
Temp scrubber	-	61	61	55

De energie-input die tijdens de pilottesten nodig is om de temperaturen in de tabel te bereiken, zijn niet representatief voor een praktijksituatie. Zo was het rejectiewater van Hengelo per as aangevoerd naar de locatie Horstermeer en volledig afgekoeld.

TABEL 4-4 ENERGIEVERBRUIK PER M³ REJECTIEWATER EN PER KG TERUGGEWONNEN N IN DE PILOT EN GECORRIGEERD VOOR EEN PRAKTIJKINSTALLATIE

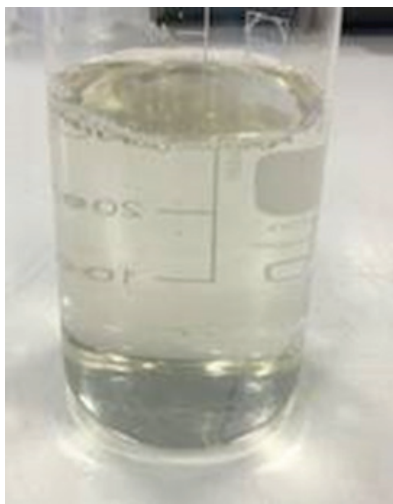
Parameter	Unit	Enschede	Horstermeer	Hengelo
Gemiddeld dagelijks energieverbruik	kWh/d	341	545	454
gemiddeld energieverbruik per uur	kWh/h	14	23	19
Energieverbruik per m ³ rejectiewater	kWh/m ³	36	45	47
Warmteverlies door verdamping in de CO ₂ stripper	kWh/m ³	3.9	4.8	5.0
Warmte input via HE1 tot 69 °C	kWh/m ³	17.5	17.5	17.5
Warmteverliezen via leidingen en oppervlakken	kWh/m ³	3.7	5.0	5.5
Potentieel herwinbare warmte	kWh/m ³	10.5	18.1	19.4
Compensatie voor warmteverlies (10%)	kWh/m ³	0.2	0.5	0.7
Gecorrigeerd energieverbruik per m³	kWh/m³	24.9	26.9	27.2
Energieverbruik per kg N	kWh/kg N	37,7	38,2	19,3

Aanvoerslangen, verbindingsslangen maar ook andere onderdelen van de pilot zijn niet of niet optimaal geïsoleerd. Maar wat vooral van belang is dat in een praktijkinstallatie warmte uit het effluent van de stripper wordt teruggewonnen via een warmtewisselaar. Nijhuis heeft

voor deze aspecten gecorrigeerd door rekening te houden met herwinbare warmte (zie Tabel 4-4) wat resulteert in een energieverbruik per kg N variërend van 19,3 tot 38,2 kWh. Ter vergelijking het energieverbruik voor de productie van ammoniak via het Haber-Bosch proces bedraagt ongeveer 13 kWh/kg N (Matassa & Verstraete, 2016).

Op RWZI Enschede is na 2,5 maand testen een ammoniumsulfaatoplossing geproduceerd met 30 gewichtsprocent (% w/w) ammoniumsulfaat. Dat betekent een totaal N-gehalte van 65 kg/m³. Deze relatief lage waarde werd veroorzaakt doordat condensaatwater afkomstig uit de ammoniakstripper in de scrubber terecht kwam. Door het installeren van een drain op het laagste punt tussen de gasuitlaat van de ammoniakstripper en de scrubber kon op de RWZI Horstermeer binnen een periode van 5 dagen een 38 % w/w ammoniumsulfaatoplossing worden geproduceerd met een gehalte van 85 kg N per m³. Het product is helder en bevat geen zichtbare verontreinigingen (zie Figuur 4-4).

FIGUUR 4-4 GEPRODUCEERD AMMONIUMSULFAAT OP DE LOCATIE HORSTERMEER



4.4 Businesscase NAR-pilot

Uit Tabel 4-4 blijkt indirect het belang van een zo hoog mogelijke ammoniumconcentratie in het rejectiewater voor de economische haalbaarheid van ammoniakterugwinning via luchtstrippen. Zou in het geval van het rejectiewater uit Hengelo de ammoniumconcentratie nog verder toenemen tot bijvoorbeeld een waarde van 4 g/l NH₄-N dan resulteert dit via extrapolatie in een energieverbruik van 8 kWh per kg N.

Door Waterschap Vechtstromen zijn data aangeleverd voor de productie van rejectiewater in de slibvergisting van RWZI Hengelo (zie Tabel 4-5). Die data zijn samen met de data uit Tabel 4-6 door Nijhuis gebruikt voor het doorrekenen van een business case.

TABEL 4-5 UITGANGSPUNTEN VOOR HET REJECTIEWATER UIT DE SLIBVERGISTING HENGELO

Parameter	Unit	Value
gemiddeld debiet	m ³ /d	690
Maximum hydraulisch capaciteit	m ³ /d	850
Gemiddelde NH ₄ -N concentratie	mg/l	1667
Verwijderingspercentage	%	90%
Effluentconcentratie NH ₄ -N	mg/l	167
Temperatuur rejectiewater	°C	25
Aantal dagen in bedrijf per jaar	days	365
Aantal uren per dag	hours	24

TABEL 4-6 UITGANGSPUNTEN ECONOMISCHE PARAMETERS BEREKENING BUSINESS CASE AMMONIUM TERUGWINNING

Parameter	Eenheid	Kosten
Afschrijvingstermijn	jaar	10
NaOH (33%)	€/kg	0.20
H ₂ SO ₄ (96%)	€/kg	0.10
Citroenzuur (100%)	€/kg	1.50
Elektriciteit	€/kWh	0.07
Warmte	€/kWh	0.04
Waarde ammoniumsulfaat	€/ton	10.00

TABEL 4-7 BUSINESSCASE VOOR TERUGWINNEN VAN AMMONIUM UIT HET REJECTIEWATER OP RWZI HENGLO

Parameter	Eenheid	Case Hengelo	
NH4-N influent	mg/l	1667	
NH4-N effluent	mg/l	167	
NH4-N teruggewonnen	mg/l	1500	
Operationele kosten (OPEX)		Totaal kosten	Kosten per kg N
Elektrisch	€ or €/kgN	€ 19,100	€ 0.05
Warmte	€ or €/kgN	€ 243,000	€ 0.64
H ₂ SO ₄ (96%)	€ or €/kgN	€ 137,500	€ 0.36
NaOH (33%)	€ or €/kgN	€ 205,500	€ 0.54
Antischuimmiddel	€ or €/kgN	€ -	€ -
Citroenzuur	€ or €/kgN	€ 10,500	€ 0.03
Onderhoud	€ or €/kgN	€ 35,000	€ 0.09
Opbrengst Ammoniumsulfaat	€ or €/kgN	€ -47,000	€ -0.12
Totaal OPEX	€ or €/kgN	€ 603,600	€ 1.60
zonder restwarmte beschikbaar			
Totaal OPEX met restwarmte beschikbaar	€ or €/kgN	€ 360,600	€ 0.95
Investeringskosten (CAPEX)			
Totale investering	€ or €/kgN	€ 1,750,000	
jaarlijkse kosten CAPEX	€ or €/kgN	€ 220,000	€ 0.58
Totale kosten NAR-proces			
Totale kosten (zonder restwarmte beschikbaar)	€/KgN		€ 2.18
Total costs (met restwarmte beschikbaar)	€/KgN		€ 1.54

In Tabel 4-7 zijn de resultaten van de economische berekeningen weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een situatie waarin het rejectiewater kan worden verwarmd met op de locatie aanwezige restwarmte en een situatie waarbij die warmte separaat moet worden geproduceerd. De totale kosten van het NAR-proces per kg N bedragen dan € 2,18 zonder beschikbare restwarmte en € 1,54 met beschikbare restwarmte.

Mocht de ammoniumconcentratie in het rejectiewater door optimalisatie van het slibvergistingsproces toenemen tot bijvoorbeeld 2.500 mg/l dan nemen de totale kosten verder af tot €1,60 en €1,17 per kg N respectievelijk voor de situatie zonder en met beschikbare restwarmte. Daarnaast kunnen de kosten verder worden geoptimaliseerd door gebruik van kalkmelk in plaats van natronloog, door het CO₂-stripproces efficiënter te maken, door de gas/water-ratio tijdens het ammoniakstrippen te verhogen en door verdere verlaging van de investeringskosten.

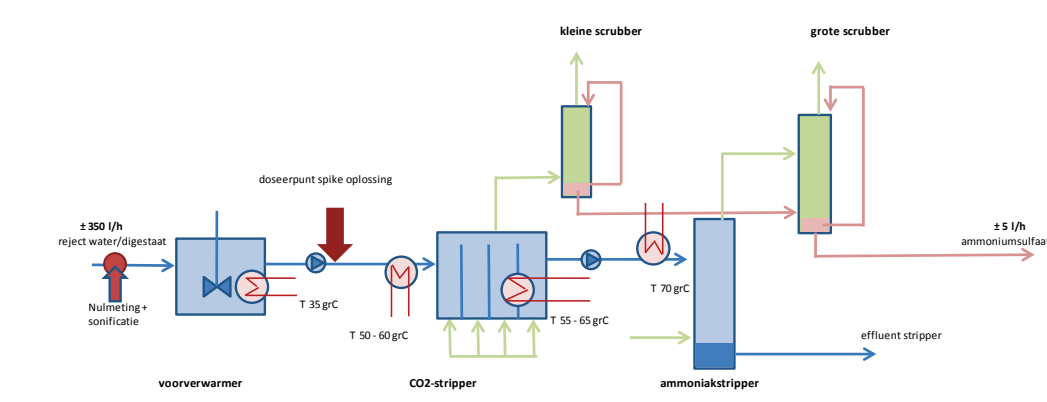
5 Onderzoek kwaliteitsaspecten SCP

5.1 Hygienische aspecten door koppeling met de afvalwaterketen

Bij de productie van SCP volgens het in dit onderzoek geteste concept wordt een directe koppeling gemaakt tussen afvalwaterketen en de productie van eiwitten in de Power-to-Protein reactor. Die koppeling wordt in dit onderzoek gelegd door de NAR-pilot die zorgt voor het luchtstrippen van het ammonium uit het rejectiewater en het vastleggen van het ammonium als ammoniumsulfaat met behulp van een zwavelzuuroplossing in een scrubber (zie hoofdstuk 4). Het ammoniumsulfaat dient vervolgens als voeding voor de Power-to-Protein reactor.

Om dit proces effectief te laten verlopen wordt – zoals in hoofdstuk 4 besproken – het rejectiewater voor de ammoniakstripper op een temperatuur van 65 tot 75 °C gebracht waarbij de pH wordt verhoogd tot een waarde van 8 – 8,5. In de stripper wordt de ammoniak getransporteerd naar de luchtfase en vervolgens in een scrubber tot ammoniumsulfaat gebonden in een zwavelzuuroplossing. Om de hoeveelheid chemicaliën (loog) te beperken, wordt het rejectiewater voor de luchtstripper in een CO₂-stripper behandeld waarbij een deel van het kooldioxide wordt verwijderd. Dit proces verloopt bij een temperatuur van 50 tot 60 °C. In tabel zijn de condities kort samengevat.

TABEL 5-1 PROCESGEGEVENS WATERLIJN NAR-PILOT



Onderdeel waterlijn	Temperatuurrange [°C]	Gemiddelde HRT [min]
Voorverwarmer + heater	35	30
Doseerpunt natronloog		
CO ₂ -stripper + heater	50 - 60	300
heater	65 - 75	1
Ammoniakstripper	65 - 75	1

Op basis van de actuele capaciteit van de NAR-pilot, de concentratie ammonium in het rejectiewater en het rendement van de ammoniakstripper kan de productie ammoniumsulfaat (NH₄)₂SO₄ worden berekend. Deze gegevens kunnen worden gebruikt om de netto log-verwijdering van de referentiepathogenen over de installatie te berekenen

waarbij ook rekening wordt gehouden met de overgang van de waterfase naar de luchtfase in de ammoniakstripper.

De onderzoekshypothese op voorhand luidt dat door de hoge temperaturen, de lucht-water overgang en de condities in de opslag van ammoniumsulfaat geen significante overdracht plaatsheeft van pathogene micro-organismen naar het product (ammoniumsulfaat).

5.2 Methodebeschrijvingen challengetest

Bij het onderzoek naar kwaliteitsaspecten van het gevormde SCP zijn challengetesten uitgevoerd om vast te stellen of er overdracht plaats kan vinden van pathogenen vanuit de afvalwaterketen naar het product. Daarvoor is gekozen om te werken met zogenaamde referentie-organismen of modelorganismen. Dit betekent concreet dat een vertegenwoordiger voor (klassen van) pathogenen wordt gekozen die representatief is voor de inactivatie van pathogenen in het systeem dat wordt onderzocht. Omdat voor het systeem van slibvergisting en ammoniakterugwinning, waarbij temperatuur een belangrijke factor is, vanwege hun thermoresistentie ook bacteriesporen relevant kunnen zijn, is gekozen voor de volgende referentie-organismen:

- Een thermoresistent virus (colifaag phiX174) als indicator voor thermoresistente virussen.
- een bacterie (*Salmonella senftenberg*) als indicator voor thermoresistente bacteriën.
- sporen van sulfiet reducerende clostridia (SSRC) waarvan *Clostridium perfringens* de belangrijkste vertegenwoordiger is.

Somatische fagen staan model voor (pathogene) virussen, ze zijn groter dan F-specifieke fagen en komen in (drink)water in hogere (10x) concentraties voor. Somatische fagen grijpen aan op de celwand van de gastheer, terwijl F-specifieke fagen aangrijpen op de pili van de gastheer. Onderzoek naar fagen in algemene zin wordt vooral uitgevoerd om zuiveringsprocessen te beoordelen op het vermogen om micro-organismen te elimineren te beoordelen. De bepaling van somatische colifagen is uitgevoerd volgens KWR huisvoorschrift LMB-041 conform ISO 10705-2. Aantoonbaarheidsgrens is 1 plaque vormende eenheid (pve) per ingezet volume.

Sporen van *sulfietreducerende clostridia* (SSRC) hebben een hoge resistentie tegen natuurlijke inactivering en desinfectie. Onderzoek naar SSRC wordt dan ook voornamelijk uitgevoerd om zuiveringsprocessen te beoordelen op het vermogen om micro-organismen te elimineren. De parameter SSRC is bij deze matrix vooral een indicator voor thermoresistente bacteriesporen. De methode voor bepaling van SSRC is uitgevoerd volgens KWR huisvoorschrift LMB-033 conform NEN 6567 (1985). De aantoonbaarheidsgrens in water ligt bij 1 kve/100 ml.

Salmonella senftenberg is een bacterie die eerder in slib is aangetroffen en thermoresistent is. Er zijn meerdere referentiestammen van *Salmonella* serotype *senftenberg* te verkrijgen. Hier is gekozen voor *Salmonella senftenberg* W775 omdat dit de meest hitte-resistente stam is. Uitgangspunt voor het aantonen van *Salmonella* is norm NEN-EN-ISO 6579 en amendement 1 annex D, voor het bepalen van *Salmonella* in complexe matrices. De methode is ten behoeve van het onderzoek geïntroduceerd op het KWR laboratorium, getest met gespiked oppervlaktewater en drinkwater en gevalideerd. De concentraties zijn bepaald met de MPN methode (most probable number) waardoor zowel lage als hoge concentraties *Salmonella* kunnen worden aangetoond.

Op 30 juni en 7 augustus zijn op locatie In Enschede challengetesten uitgevoerd. In Tabel 5-2 zijn de actuele procesgegevens van beide dagen weergegeven. Hieruit blijkt de relatief lage ammoniumconcentratie in het rejectiewater van de RWZI Enschede en bovendien blijkt uit de data dat het systeem op 7 augustus al beter was geoptimaliseerd, getuige het hogere rendement van de luchtstripper en de hogere concentratie van het geproduceerde ammoniumsulfaat (wat correspondeert met een lagere productie).

TABEL 5-2 ACTUELE PROCESDATA NAR-PILOT OP TESTDAGEN (BRON NIJHUIS)

		30 juni 2017	7 augustus 2017
Influentflow rejectiewater	l/uur	300	350
Actuele ammoniumconcentratie	mg/l	817	800
Gemeten concentratie ammoniumsulfaat	w/w %	14,5	26
Gemeten stripperrendement	%	71	81
Ammoniumsulfaatproductie	l/uur	6,6	3,7

Voordat is gestart met het doseren van de spike-oplossing met referentie-organismen, is een monster genomen van het rejectiewater (monsterpunt [1] in Figuur 5-1). Op basis daarvan zijn de concentraties van de referentie-organismen in het onbehandeld influent bepaald (zie Tabel 5-3).

TABEL 5-3 CONCENTRATIE VAN REFERENTIE MICRO-ORGANISMEN IN INFLUENT

	Salmonella spp. MPN/l	SSRC KVE/l	Somatische colifagen PFU/l
Influent [1]	< 0,6	$1,2 \cdot 10^7$	$3,95 \cdot 10^6$
Influent na sonificatie [1]	0,6	$0,8 \cdot 10^7$	$4,15 \cdot 10^6$

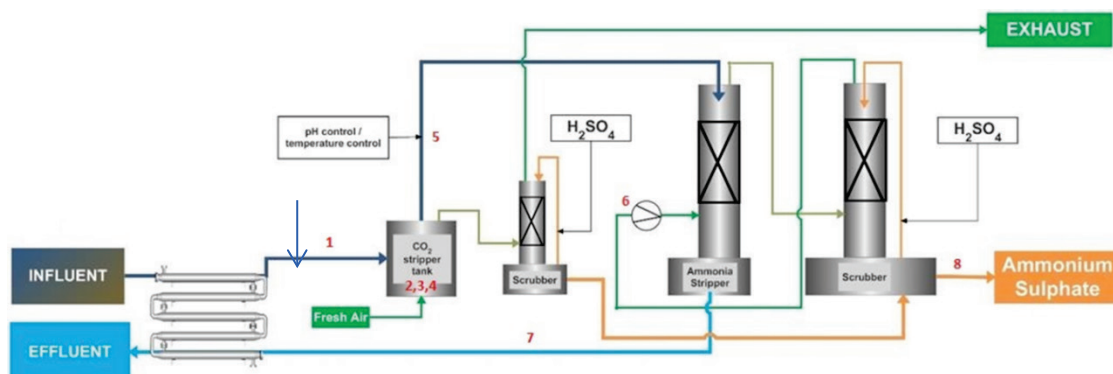
Door sonificatie worden micro-organismen die gebonden zitten aan deeltjes in de oplossing vrijgemaakt.

Voorafgaand aan de testdagen is een spike-oplossing bereid die tijdens de test is gedoseerd aan het influent rejectiewater met een debiet van 500 ml/uur gedurende 24 uur. Tabel 5-4 geeft een overzicht van de concentraties in de spike-oplossingen op beide dagen.

TABEL 5-4 CONCENTRATIE VAN DE SPIKE-OPLOSSING OP BEIDE TESTDAGEN

	Salmonella spp. MPN/l	SSRC KVE/l	Somatische colifagen PFU/l
Test 30 juni 2017	$2,2 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$8,8 \cdot 10^9$
Test 7 augustus 2017	$5,5 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{10}$	$4,1 \cdot 10^9$

FIGUUR 5-1 OVERZICHT VAN DE MEETPUNTEN IN DE NAR-PILOT TIJDENS DE CHALLENGETEST. DE PIJL GEEFT DE LOCATIE WEER WAAR DE SPIKE-OPLOSSING IS GEDOSEERD.



Tijdens de challengetest zijn op acht punten in de installatie monsters genomen (zie Figuur 5-1): influent [1], CO₂-stripper eerste, tweede en derde compartiment [2,3,4], effluent CO₂-stripper [5], effluent ammoniakstripper [7] en het condensaat van de ammoniakstripper [6]. Daarnaast is het ammoniumsulfaat als product bemonsterd [8]. Monsterpunten 1, (2,3,4,) 5 en 8 liggen in de route die het ammonium/ammoniak aflegt vanuit het rejectiewater naar het geconcentreerde ammoniumsulfaat als product. Bij het vaststellen van het moment van monsterneming is per monsterpunt rekening gehouden met de hydraulische verblijftijd in het systeem, zodat het effluent van de CO₂-stripper na 6,5 uur en het effluent van de ammoniakstripper na 7 uur zijn bemonsterd. Het monster van het gevormde ammoniumsulfaat is pas de volgende dag (na 23 uur) genomen. Ook de overgang van water naar lucht bevindt zich in die route. Hier is sprake van een concentratiefactor (CF) die is meegenomen in de berekening van de logverwijdering. Op 30 juni bedroeg de CF 45 (= 300/6,6 zie Tabel 5-2) en op 7 augustus was de CF toegenomen naar 95 (= 350/3,7).

5.3 Resultaten challengetest

In Tabel 5-5 zijn de resultaten van de challengetests en de berekeningen van de logverwijdering samengevat. Voor een uitgebreid overzicht van de analyseresultaten wordt verwezen naar bijlage I.

TABEL 5-5 RESULTATEN VAN BEIDE CHALLENGETESTEN NAR-PILOT UITGEVOERD IN JUNI EN AUGUSTUS 2017 [MEETPUNTEN]

challengetest	Salmonella senf.	SSRC	colifaag phiX174	Temperatuur
30 juni 2017				
	MPN/l	KVE/l	PFU/l	°C
Influent + ent [1]	> 3,7*10 ⁴	4,2*10 ⁷	1,9*10 ⁷	24,2
Effluent CO ₂ -stripper [5]	3	1,5*10 ⁷	3,6*10 ³	63
(NH ₄) ₂ SO ₄ uit scrubber [8]	< 0,6	5,8*10 ³	< 100	60,1
Log-verwijdering				
na CO ₂ -stripper	> 4,8	0,4	3,7	
na NH ₄ -stripper en scrubber	> 1,6	5,1	> 3,2	
overall	> 6,4	5,5	> 6,9	
Bewaarprouf				
(NH ₄) ₂ SO ₄ uit scrubber				

T = 0	< 0,6	5,8*10 ³	< 100
T = 4 dagen	< 0,6	3,2*10 ³	< 100
T = 7 dagen	< 0,6	2,9*10 ³	< 20
T = 39 dagen		2,5*10 ³	

Challengetest 7 augustus 2017	Salmonella senf.	SSRC	colifaag phiX174	Temperatuur
	MPN/l	KVE/l	PFU/l	°C
Influent + ent [1]	7,8*10 ⁷	8,4*10 ⁶	7,7*10 ⁶	-
Effluent CO ₂ -stripper [5]	< 0,6	4,6*10 ⁵	3,3*10 ³	-
(NH ₄) ₂ SO ₄ uit scrubber [8]	< 0,6	1,7*10 ³	< 100	-
Log-verwijdering				
na CO ₂ -stripper	> 8,1	1,3	3,4	
na NH ₄ -stripper en scrubber	> 2,1	4,4	> 3,5	
overall	> 10,1	5,7	> 6,9	

PFU = plaque forming units; KVE = kolonievormende eenheden; MPN = most probable number

5.4 Interpretatie resultaten challengetest

Beide challengetesten geven een redelijk consistent beeld waarbij alle micro-organismen die gevoelig zijn voor hoge temperatuur (indicatoren *Salmonella senftenberg* en colifagen) met een zeer hoog rendement worden afgedood (> 99,99999 %). Alle micro-organismen die resistent zijn tegen hoge temperaturen (indicatororganisme SSRC) worden aanzienlijk gereduceerd (> 99,999 %). Overdracht van fecale pathogenen vanuit het rejectiewater naar het ammoniumsulfaat, dat als grondstof voor de productie van SCP wordt gebruikt, lijkt op basis van deze resultaten erg onwaarschijnlijk. De aanwezigheid van SSRC in het ammoniumsulfaat betekent dat wel rekening moet worden gehouden met overdracht van thermoresistente bacteriesporen. De resultaten van de bewaarproef, uitgevoerd op 30 juni 2017 (zie Tabel 5-5), tonen aan dat de sporen goed kunnen overleven in een geconcentreerde ammoniumsulfaatoplossing. De logverwijdering in 39 dagen bedraagt slechts 0,36. Thermoresistente bacteriesporen kunnen in de Power-to-Protein-reactor reacteren en groeien op het substraat in de reactor, wat de kwaliteit van het microbiom in de reactor negatief beïnvloedt. Nader onderzoek aan het microbiom moet uitwijzen in hoeverre dit in de praktijk daadwerkelijk optreedt. Mogelijk ondervinden de thermoresistente bacteriesporen teveel concurrentie van de waterstofoxiderende bacteriën in de reactor en spoelen ze uit. Aangezien de thermoresistente bacteriesporen ook relatief ongevoelig zullen zijn voor het sproeidrogen van de gecentrifugeerde biomassa tijdens de downstream processing, moet tevens rekening worden gehouden met de aanwezigheid van deze micro-organismen in het gedroogde product. Thermoresistente bacteriesporen kunnen eventueel wel door sterilisatie of gammastraling worden gedood.

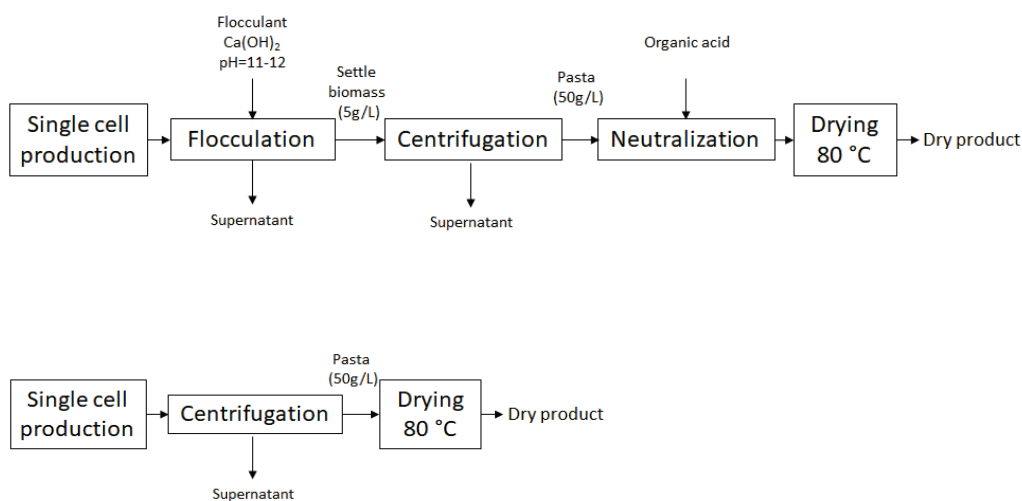
5.5 Productie van SCP in de power-to-protein pilot

Zowel tijdens onderzoeksperiode III als IV (zie Tabel 3-1) is biomassa uit de power-to-protein reactor opgewerkt tot gedroogd product. De biomassa uit de reactor heeft een laag drogestofgehalte (d.s.), wat typisch rond de 0,5 % ligt. Voordat het product efficiënt gedroogd kan worden, moet dit mechanisch ontwaterd worden tot bij voorkeur 10% d.s. Omdat drogen relatief veel energie kost, geldt in algemene zin dat de mechanische ontwatering zo veel mogelijk moet worden geoptimaliseerd. Door sproeidrogen kan vervolgens het ontwaterde product tot een gedroogd product worden omgezet (90 % d.s.). In

dit onderzoek is mechanisch ontwaterd via centrifugeren en is het ontwaterde product gedroogd bij 80 °C in een oven.

Tijdens het onderzoek zijn twee verschillende processen gebruikt voor het opwerken van de biomassa zoals geïllustreerd in Figuur 5-2 . Tijdens periode III is er voor gekozen om de biomassa te flocculeren met kalkmelk (Ca(OH)_2). Belangrijkste reden hiervoor was stabilisatie en conservering van de biomassa op locatie in Horstermeer alvorens het voor verdere verwerking is getransporteerd naar Avecom in Gent. Na bezinking en centrifuge is de pasta vervolgens geneutraliseerd met een organisch zuur. Hiervoor is zowel gebruik gemaakt van azijnzuur als boterzuur, zodat twee verschillende producten zijn gevormd. Monsters van die producten zijn ter analyse aangeboden bij Nutrilab (zie paragraaf 5.6).

FIGUUR 5-2 DOWN STREAM PROCESSING TIJDENS ONDERZOEKSPERIODE III (BOVEN) EN IV (ONDER)



Tijdens onderzoeksperiode IV (in Gent) is biomassa opgevangen tot een volume van 300 liter gedurende 3 dagen. Daarbij is de biomassa belucht om bederf te voorkomen. Vervolgens is de biomassa gecentrifugeerd tot een pasta met een gehalte van ongeveer 5 % d.s. De pasta is bij 80 °C gedroogd in een oven. Ook een monster van dit product is ter analyse aangeboden bij Nutrilab.

In Tabel 5-6 is een overzicht van parameters opgenomen die informatie geven over het functioneren van de power-to-protein reactor in de perioden waarin biomassa is geoogst

TABEL 5-6 KARAKTERISTIEKEN POWER-TO-PROTEIN PILOT TIJDENS OOGSTEN VAN BIOMASSA IN ONDERZOEKSPERIODE III EN IV

Parameter		Onderzoeksfase III RWZI Horstermeer	Onderzoeksfase IV Avecom Gent
pH	-	6,5 – 6,6	6,5 – 7,1
volumetrische productiviteit	kg TSS/m ³ .dag	0,6 – 0,7	0,20
maximale yield (H ₂)	kg TSS/kg COD-H ₂	0,05	0,02
maximale efficiëntie waterstofconversie	%	niet gemeten	5 – 10
maximaal percentage droog celgewicht	%	70	73

Figuur 5-3 toont foto's van het gedroogde materiaal. De lichte kleur van het gedroogde SCP in onderzoeksperiode III is het gevolg van het gebruik van kalkmelk ter conservering van de biomassa.

FIGUUR 5-3 FOTO'S VAN HET GEDROOGDE SCP TIJDENS ONDERZOEKSPERIODE III (LINKS) EN IV (RECHTS).



5.6 Kwaliteit van het gevormde SCP

Door Nutrilab zijn in de aangeleverde monsters de volgende bepalingen uitgevoerd:

- bepaling gehalte ruw eiwit (Dumas, N x 6,25)
- bepaling verteerbaar eiwit (pepsinetest)/ bepaling in vitro onverteerbaar eiwit (Methode van Boisen en Fernandez uit 1997)
- bepaling gehalte afzonderlijke aminozuren
- bepaling NPN, non protein nitrogen of percentage niet-eiwit stikstof

De bepaling van het ruwe eiwitgehalte is gebaseerd op de analyse van N-Kjeldahl in de biomassa conform de Dumas-methode waarna de waarde standaard met een factor 6,25 wordt vermenigvuldigd als correctie voor microbieel eiwit.

Op de twee SCP-monsters uit Horstermeer is alleen een (eenvoudige) pepsinetest uitgevoerd. Met het SCP-monster dat in onderzoeksfase IV in Gent is geproduceerd, is een in-vitro verteerbaarheidstest uitgevoerd conform de methode van Boisen en Fernandez uit 1997 (Boisen *et al.*, 1997). Dit is een methode waarmee het verteringsproces bij eenmagigen in de maag, de dunne darm en dikke darm wordt gesimuleerd door successievelijk met drie enzymen te incuberen, namelijk pepsine, pancreatine en Viscozyme, een multi-enzym complex.

In Tabel 5-7 zijn de analyseresultaten samengevat. In het overzicht zijn alleen de meest essentiële aminozuren - vanuit oogpunt van voedingswaarde - opgenomen. De volledige analyselijsten zijn opgenomen in bijlage III. Uit de tabel blijkt dat door de conservering van de biomassa met kalkmelk (en neutralisatie met organisch zuur) het eiwitgehalte van het SCP dat is geogst in Horstermeer relatief laag is, en het asgehalte navenant hoog. Hierdoor zijn ook de gemeten gehalten aan aminozuren lager. Als echter wordt gecorrigeerd voor het hoge gehalte anorganisch materiaal dan zijn de gehalten van de belangrijkste aminozuren vergelijkbaar. Hierbij moet worden bedacht dat in een toekomstige praktijksituatie waarbij SCP op grote schaal wordt geproduceerd en de down-stream-processing als een continue proces wordt uitgevoerd met relatief korte verblijftijden, de conservering van biomassa met kalkmelk niet noodzakelijk is.

Door Barentz Animal Nutrition is het SCP dat is geproduceerd in onderzoeksfase IV (Gent) vergeleken met soja meel (sojaschroot HiPro-High Protein) en vismeel (RE 65 – 68%). Beide producten zijn zeer gangbaar als eiwitbron in diervoeder. De vergelijking in Tabel 5-8 is

gemaakt aan de hand van de CVB tabel, dat is de Nederlandse veevoedertabel die wordt gebruikt voor het waarden van diervoeders.

TABEL 5-7 ANALYSERESULTATEN VOOR KWALITEITSPARAMETERS VAN HET GEVORMDE SCP

Parameter		Onderzoeksperiode III RWZI Horstermeer	Onderzoeksperiode IV Avecom Gent
vochtgehalte	%	3 – 6	6,5 – 7,1
as gehalte (anorganisch deel)	%	40 – 55	21
eiwit gehalte	%	26 – 31	49
pepsine verteerbaarheid	%	19 – 21	-
in vitro verteerbaarheid (Boisen & Fernandez)	%	-	85
niet eiwit stikstof (non protein nitogen)	%	1	0,5
<i>Overzicht belangrijkste aminozuren</i>			
ARG/Arginine	g/100 g	1,45 – 1,70	1,98
CYS/Cysteine	g/100 g	0,17 – 0,18	0,19
LYS/Lysine	g/100 g	1,39 – 1,64	2,10
MET/Methionine	g/100 g	0,53 – 0,71	0,73
THR/Threonine	g/100 g	1,11 – 1,38	1,94
TRP/Tryptophan	g/100 g	0,42 – 0,58	0,68

Uit de vergelijking in Tabel 5-8 blijkt dat het SCP een ruw eiwitgehalte heeft dat vergelijkbaar is met sojameel. De in-vitro verteerbaarheid van SCP is vergelijkbaar met die van het vismeel, maar ligt wel lager dan die van sojameel. Overigens geeft de in-vitro verteerbaarheid slechts een indicatie voor de werkelijke verteerbaarheid in levende organismen. Een in-vivo test zal op termijn alsnog moeten worden uitgevoerd, maar tijdens dit pilotonderzoek kon hiervoor niet voldoende materiaal worden geproduceerd. Uit de vergelijking van de belangrijkste aminozuren blijkt dat in beide gevallen de gehalten in SCP lager liggen. Netto is de conclusie dat de kwaliteit van het SCP-eiwit minder is dan die van twee gangbare eiwitrijke diervoedergrondstoffen.

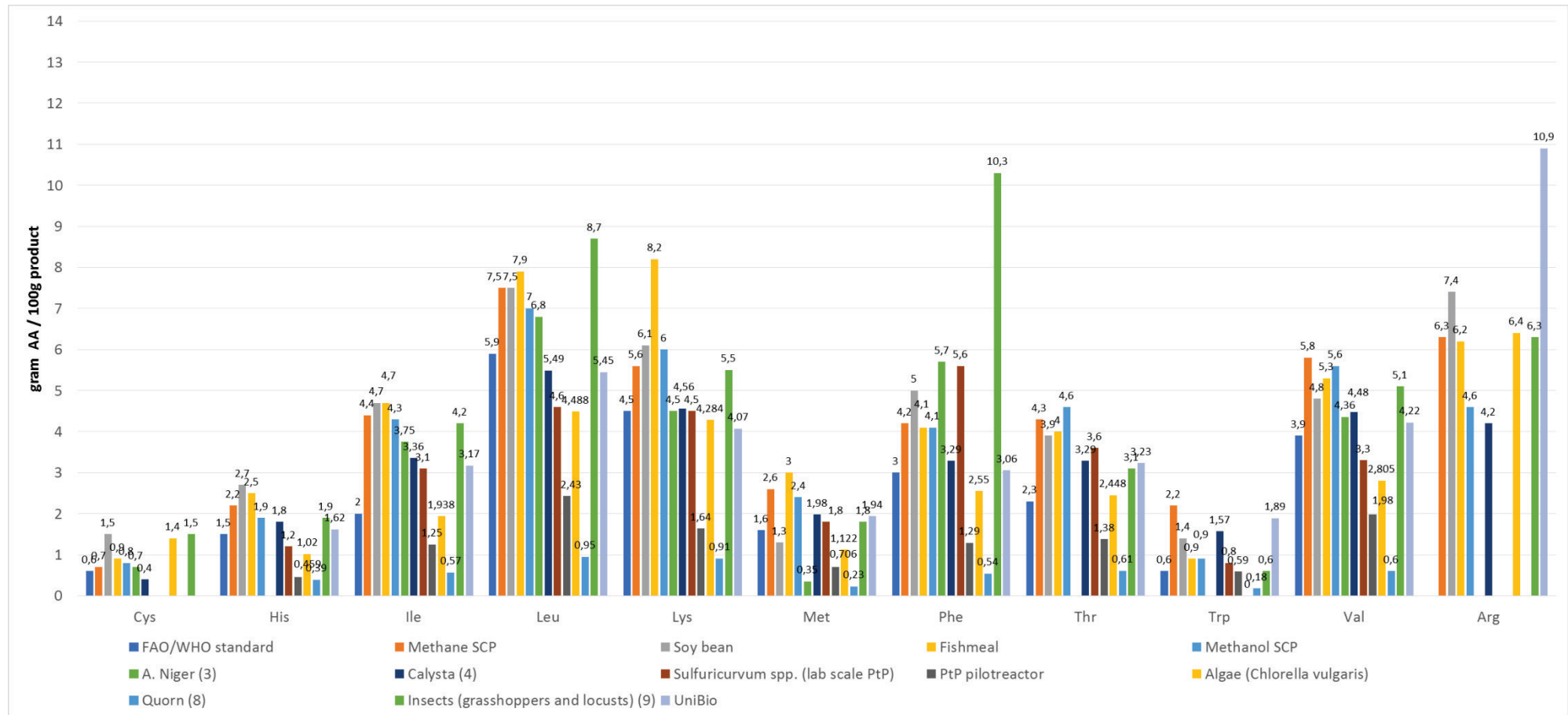
TABEL 5-8 VERGELIJKING VAN SCP MET SOJAMEEL EN VISMEEL ALS GANGBARE PRODUCTEN VOOR DIERVOEDING

Parameter		Sojameel HiPro	Vismeel RE 65-68%	SCP Periode IV
ruw eiwit gehalte	%	49	66	49
in vitro verteerbaarheid	%	90 - 92	87	85
<i>Overzicht belangrijkste aminozuren</i>				
ARG/Arginine	g/100 g	3,64	3,87	1,98
CYS/cysteine	g/100 g	0,73	0,59	0,19
LYS/Lysine	g/100 g	3,01	4,99	2,10
MET/Methionine	g/100 g	0,68	1,84	0,73
THR/Threonine	g/100 g	2,76	2,76	1,94
TRP/Tryptophan	g/100 g	0,63	0,72	0,68

Door KWR is separaat een vergelijking gemaakt met andere, commercieel beschikbare, SCP eiwitten en een aantal conventionele eiwitten gericht op het gehalte van een negental essentiële aminozuren (zie Figuur 5-4). Deze vergelijking is gemaakt op basis van het SCP geproduceerd in onderzoeksperiode IV. Voor een uitgebreide achtergrond en een overzicht van de gebruikte referenties wordt verwezen naar Bijlage IV. In Figuur 5-4 worden overigens feed- en food-toepassingen met elkaar vergeleken. In dat verband is het van belang om op te merken dat bij food-toepassingen de functionele eigenschappen van eiwitten veelal belangrijker zijn dan de voedingswaarde op basis van de aminozuursamenstelling. De voedingswaarde is vooral van belang bij de toepassing van een product als diervoeder.

De vergelijking leidt overigens tot een eenzelfde conclusie, namelijk dat de gehalten aminozuren in het bij dit onderzoek gevormde SCP lager liggen dan die in conventionele eiwitten, maar ook lager dan die in een aantal vergelijkbare single cell proteins zoals methaan-SCP, methanol-SCP en Calysta. Enige uitzondering is het product Quorn (een SCP op basis van een schimmelcultuur) dat nog lagere gehalten heeft. Daarnaast is ook de vergelijking gemaakt met het SCP-product uit de reactor op labschaal (5 liter) bij Avecom in Gent (in Figuur 5-4 opgenomen als “sulfuricurvum spp. labscale PtP”). De gebruikte data komen uit de thesis van Matassa (Matassa, 2016). Dit betrof een monocultuur die ontstond nadat de reactor langere tijd in een continue modus was bedreven met relatief korte hydraulisch verblijftijden (die in dit pilotonderzoek niet zijn gehaald). De kwaliteit het product blijkt op basis van het gehalte aminozuren beter dan het product uit de pilot reactor.

FIGUUR 5-4 VERGELIJKING VAN DE GEHALTES VAN EEN SELECTIE VAN ESSENTIELE AMINOZUREN VOOR VERSCHILLENDE SCP EIWITTEN EN CONVENTIONELE EIWITTEN



5.7 Bepaling van nucleïnezuurgehalte in SCP

(Deze paragraaf is deel van de output van de activiteiten van Martin Spruijt bij KWR als onderdeel van zijn stage-opdracht in 2018).

Het nucleïnezuurgehalte is een belangrijke parameter voor de kwaliteit van SCP. Een te hoog gehalte nucleïnezuur in voedsel leidt namelijk tot jicht. De richtlijn is door de WHO gesteld op max 2g/100gram eiwit (WHO, 2017).

Literatuurstudie geeft aanleiding te verwachten dat het gehalte nucleïnezuur voor SCP afkomstig van bacteriën hoog is (Kuhad *et al.*, 1997; Strong *et al.*, 2015, Yazdian *et al.*, 2005). Wanneer het nucleïnezuurgehalte hoger is dan de richtlijn van WHO, is het relevant om te onderzoeken hoe de nucleïnezuren kunnen worden verwijderd met tegelijkertijd het behoud van de eiwitten. In deze paragraaf zijn kort de gehanteerde analysemethode beschreven en de resultaten van de experimentele bevindingen.

De bepaling van het nucleïnezuurgehalte is tweeledig: de hoeveelheid DNA en RNA is afzonderlijk bepaald. In eerste instantie is het Power-to-protein product direct in water gebracht. Van de ontstane suspensie is van de vloeistoffase de nucleïnezuurconcentratie gemeten. De lage concentraties die werden gemeten gaven aanleiding op zoek te gaan naar methodes om DNA of RNA te extraheren uit het Power-to-Protein product. Met behulp van de DNeasy PowerBiofilm Kit en de RNeasy PowerBiofilm Kit kan DNA en RNA afzonderlijk worden geïsoleerd. Deze methodes zijn gebaseerd op chemische lyse van de bacteriële cellen en daarop extractie van DNA en RNA.

In totaal is in vijf monsters afkomstig uit verschillende onderzoeksfases van het Power-to-Protein project het nucleïnezuurgehalte bepaald:

- Monster 1 is het SCP-poeder afkomstig uit de reactor op labschaal gesuspenderd in water.
- Monster 2 is SCP-poeder afkomstig uit de reactor op labschaal dat eerst is gevijzeld en vervolgens gesuspenderd in water.
- Monster 3 is SCP-poeder uit onderzoeksfase IV (1/4/18 – 16/4/18) dat is gesuspenderd in water.
- Monster 4 betreft geïsoleerd DNA/RNA van SCP- poeder uit onderzoeksfase IV (= monster 3 na extractie van DNA en RNA)
- Monster 5 betreft geïsoleerd DNA/RNA uit biomassa direct afkomstig uit de bioreactor dat nog niet gesproeidroogd is en dat door Avecom bij KWR is aangeleverd op 5/9/18.

In deze monsters is in triplo de DNA-concentratie en RNA-concentratie bepaald. Een gedetailleerde methodebeschrijving is opgenomen in Bijlage VIII. De analyseresultaten zijn opgenomen in Tabel 5-9. Uit de metingen blijkt dat het SCP uit de Power-to-Protein reactor een product is met een relatief laag gehalte nucleïnezuur ten opzichte van andere SCP's die vermeld worden in de literatuur waar waardes van 18-25/100 g drooggewicht voorkomen (Kuhad *et al.*, 1997; Strong *et al.*, 2015, Yazdian *et al.*, 2005). Dit betekent dat onder de condities van de huidige bioreactor geen extra stappen nodig zijn in het proces om nucleïnezuren te verwijderen, omdat wordt voldaan aan de WHO norm.

TABEL 5-9 RESULTATEN VAN DE BEPALING VAN NUCLEINEZUREN IN VIJF VERSCHILLENDE SCP-MONSTERS

Monster	g DNA/ g eiwit	g RNA/ g eiwit	g DNA+RNA/ g eiwit
1	0,085	-	0,085
2	0,19	0,070	0,26
3	0,113	0,052	0,165
4	0,43	0,109	0,44
5	1,39	0,29	1,68

Verder valt op te merken dat de nucleïnezuurconcentratie hoger is in monster 5. Dit kan te wijten zijn aan de fase in het proces. Monster 5 is namelijk biomassa uit de bioreactor die nog niet gesproeidroogd is, terwijl de andere vier monsters wel een sproeidroging (85 °C) hebben ondergaan. Nucleïnezuren kunnen worden afgebroken door verhitting (Abou-Zeid et al., 1995)), waardoor de nucleïnezuurgehalten lager uitvallen voor monsters 1,2,3 en 4. Voor wat betreft de gehanteerde methode van nucleïnezuurbepaling leert het verschil in uitkomst tussen monster 3 en 4 dat een significant lagere nucleïnezuurconcentratie wordt gemeten bij het enkel suspenderen van het SCP- product in water. Om die reden lijkt de toepassing van een DNA/RNA-extractie (isolatiestap) essentieel.

5.8 Toelatingsvereisten als Novel food en diervoeder

Een circulaire economie is een economisch en industrieel systeem dat de herbruikbaarheid van producten en grondstoffen als uitgangspunt neemt, waardevernietiging in het hele systeem minimaliseert en waardecreatie in iedere schakel van het systeem nastreeft. Buiten alle technologisch uitdagingen wordt steeds meer duidelijk dat een circulaire economie ook vragen oproept over de (belemmerende of stimulerende) werking van onze wetgeving en de grondslagen daarvan. Dat geldt bijvoorbeeld ook voor de productie van eiwitten uit ammoniak afkomstig uit afvalwater als technologische innovatie met de ambitie om de voedselketen te verkorten en circulair te maken.

In de bundel “*met recht naar een circulaire economie*” van de Vereniging voor Milieurecht uit (Bakker, 2017) wordt in verschillende bijdragen aandacht besteed aan juridische uitdagingen gekoppeld aan de circulaire economie. Eén van de bijdragen richt zich op het inzetten van insecten als nieuwe eiwitbron. Deze bijdrage bevat veel informatie die één op één ook interessant is bij de introductie van microbieel eiwit. Deze informatie is hieronder bulletgewijs opgesomd.

- Ingevolge Verordening (EG) nr. 258/97 – met ingang van 1 januari 2018 vervangen door Verordening EU nr. 2015/2283 – geldt voor levensmiddelen die niet voor 1997 een geschiedenis van veilig gebruik binnen de EU hebben opgebouwd (zogenaamde ‘novel food’) dat deze slechts op de markt worden gebracht wanneer zij op basis van een wetenschappelijke veiligheidsbeoordeling zijn toegelaten. De onderneming die om toelating van een product vraagt, is verantwoordelijk voor het aanleveren van een wetenschappelijk veiligheidsdossier. Een van de categorieën die onder deze verordening vallen zijn “voedingsmiddelen en voedsel ingrediënten bestaande of geïsoleerd uit micro-organismen, schimmels of algen”. De auteurs geven aan dat uit empirisch onderzoek is gebleken dat de lasten in termen van kosten van het veiligheidsonderzoek, onzekerheid van de uitkomst van de politieke besluitvorming in comitologie² en vertraging van de marktintroductie zodanig hoog zijn dat zij slechts door kapitaalkrachtige ondernemingen gedragen kunnen worden. En zelfs die ondernemingen wagen zich er alleen aan als het gaat om producten die commercieel gezien veelbelovend zijn. De

² Europees recht: alles hetgeen samenhangt met de verschillende comités die de tenuitvoerlegging van het EU-beleid controleren.

conclusie is dat de markttoegangseisen voor novel foods in de EU een vrijwel niet te nemen hindernis vormen. Tegenwoordig wordt deels aan dit probleem tegemoet gekomen doordat autoriteiten het veiligheidsonderzoek op eigen initiatief organiseren.

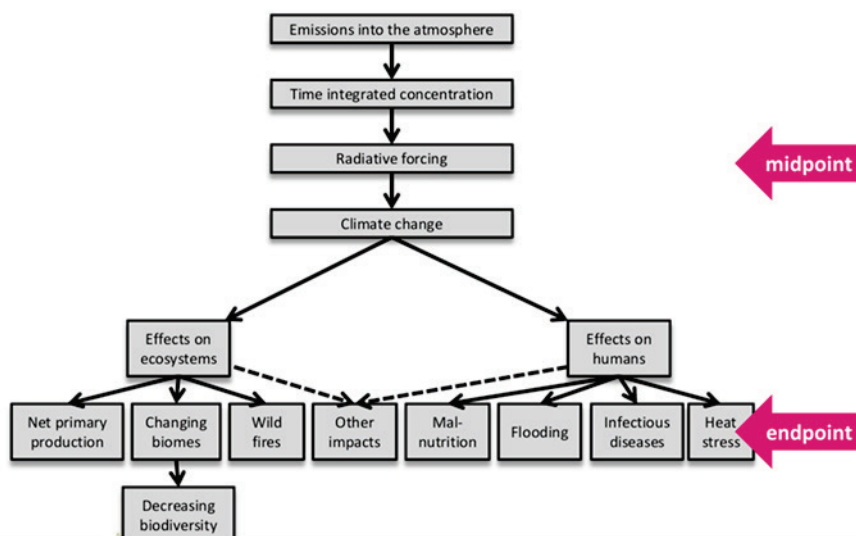
- Op 11 december 2015 is de nieuwe Verordening betreffende nieuwe voedingsmiddelen gepubliceerd in het publicatieblad van de Europese Unie. Met deze verordening zullen nieuwe voedingsmiddelen sneller op de markt gebracht kunnen worden. De wet is van toepassing met ingang van 1 januari 2018. Dankzij de nieuwe Verordening verloopt de vergunningsprocedure straks vlotter en kunnen veilige en innovatieve voedingsmiddelen sneller in de handel worden gebracht en onnodige handelsbelemmeringen uit de weg worden geruimd. De verordening voorziet in een gecentraliseerd vergunningensysteem dat een vlottere en snellere vergunningsprocedure waarborgt en aanvragers van een vergunning meer rechtszekerheid biedt. De EFSA zal de aanvragen aan een wetenschappelijke risicobeoordeling onderwerpen, terwijl de Commissie de dossiers van alle aanvragers zal beheren en voorstellen zal indienen voor de toelating van nieuwe en veilige voedingsmiddelen.
- Ook bij diervoeders geldt het basisvereiste (conform Verordening (EG) 187/2002) dat zij niet op de markt mogen worden gebracht wanneer zij onveilig zijn. Het gaat dan zowel om de veiligheid voor het dier als voor de mens die de producten van dat dier consumeert. Voor diervoeders geldt niet een equivalent van de Novel Foodsverordening, wat betekent dat dit voor nieuwe bronnen van eiwitten niet vooraf in een zware procedure hoeft te worden aangetoond. Er is een notificatieverplichting die niet gepaard gaat met een veiligheidsverklaring. Materialen die worden gebruikt als diervoeder moeten een registratie hebben in een register dat als bijlage is opgenomen in Verordening (EU) nr. 68/2013. Een uitvoeringsverordening bij Verordening (EG) nr. 767/2009.

6 Life Cycle Analysis (LCA)

6.1 Het doel van de LCA

Een LCA bekijkt in algemene zin het effect op het milieu van een product of service vanaf het begin (het maken) tot aan het einde (het verwerken). Dit principe wordt ook cradle-to-grave genoemd. Het milieueffect kan worden bekeken op verschillende schaalniveaus, op zogenaamde 'midpoints' en 'endpoints' (zie Figuur 6-1). Een midpoint betreft een mondiaal effect, zoals bijvoorbeeld klimaatverandering. Dit midpoint kan verder uitgesplitst worden in verschillende endpoints, zoals (lokaal) effect op overstromingen of afnemende biodiversiteit. Met de verschillende midpoints en endpoints worden meerdere milieueffecten meegenomen, zodat niet alleen de CO₂ uitstoot beschouwd wordt. De endpoints worden alle gewogen, volgens een wetenschappelijk vastgestelde methode die toegepast wordt in de gebruikte SimaPro-software, zodat de vergelijking tussen verschillende scenario's gemaakt kan worden op basis van een gestandaardiseerde eenheid. De resultaten van een LCA-analyse worden uitgedrukt in eco-punten, waarbij 1.000 eco-punten gedefinieerd is als de totale gemiddelde milieu impact van een West-Europees persoon per jaar.

FIGUUR 6-1 VOORBEELD VAN EEN MIDPOINT (CLIMAT CHANGE) EN DE DAARAAN GERELATEERDE ENDPOINTS ALS ONDERDEEL VAN DE LCA



Doel van de LCA in dit project is het vaststellen van de volledige milieu-impact (cradle-to-grave analysis) voor de (toekomstige) productie van single-cell-proteins (SCP, Promic) met waterstofoxiderende autotrofe micro-organismen ten opzichte van een aantal belangrijke referentie eiwitten (vlees, vis, soja).

6.2 Functionele eenheid

Om de duurzaamheidsimpact van elk scenario te kunnen vergelijken moet de eenheid waarover de berekeningen worden gemaakt (de “functionele eenheid”) goed worden gekozen. In dit geval is ervoor gekozen als functionele eenheid 1 kg ruw product te gebruiken, dus bijvoorbeeld 1 kg SCP (droog product) en 1 kg onverwerkt rundvlees of 1 kg onverwerkt soja.

Deze keuze houdt vooral verband met het feit dat in bestaande databases voor de conventionele eiwitten de data per kg product beschikbaar zijn. Dit betekent dus dat de vergelijking wordt gemaakt op basis van kg eiwithoudend product en niet op basis van kg eiwit. Omdat de (ruwe) eiwitgehaltenes van de meeste producten bekend zijn, kan hierop eenvoudig worden gecorrigeerd.

Het gedroogde SCP in dit onderzoek bevat bijvoorbeeld 49 % ruw eiwit (tabel 5.7). De vleesproducten die in de vergelijking zijn meegenomen bevatten ook relatief veel water zodat het eiwitgehalte uitkomt op gemiddeld 21 % (Chizzolini *et al.*, 1999). Voor soja ligt het ruw eiwitgehalte rond de 40 %.

6.3 Gebruikte methode

Voor deze LCA is gebruik gemaakt van SimaPro 8 software. De benodigde data is afkomstig uit de Ecoinvent 3.0 database (zie literatuurlijst onder overige), met uitzondering van gegevens over rundvlees, kippenvlees en varkensvlees ('beef', 'chicken' en 'pig') waarvoor gebruik is gemaakt van de Agri-footprint database en de gegevens over vis waarvoor gebruik is gemaakt van de LCA food database (<http://lcafood.dk>). De berekeningen zijn uitgevoerd met ReCiPe Endpoint € V1.10/Europe ReCiPe E/A, en uitgedrukt in ecopunten. Er is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van data die specifiek zijn voor Nederland. Indien deze niet beschikbaar waren, is deze volgorde toegepast: 1) data voor Europa (RER), 2) Zwitserland (CH), en 3) de rest van de wereld (ROW).

6.4 Systeemgrenzen en uitgangspunten

Bij het uitvoeren van deze LCA is als systeemgrens gebruikt het ruwe product dat nog niet verder is verwerkt tot consumentenproducten. Dat is een gebruikelijke systeemgrens bij dit type LCA's die meestal wordt aangeduid met "*off slaughterhouse*" verwijzend naar ruwe vleesproducten direct na de slacht die nog niet zijn verwerkt en verpakt voor de consument (Tuomisto, 2018). Voor het SCP wordt als systeemgrens gehanteerd de productie van het ruwe gedroogde product, dus met de downstream processing (zie paragraaf 5.4) maar zonder de verwerking van dit product in voor dierlijke of menselijke consumptie geschikte producten.

6.4.1 Uitgangspunt keuze energiebronnen

Een belangrijk uitgangspunt betreft de keuze van de elektriciteitsbronnen in de LCA-berekening. Het hele power-to-protein concept is gebaseerd op de productie van groene waterstof. Dit betekent dat voor het elektriciteitsverbruik van de elektrolyser in de berekeningen het gebruik van groene stroom als uitgangspunt is gehanteerd. Daarvoor is gekozen voor groene stroom uit 'off shore wind', wat correspondeert met een toekomstbeeld voor de lange termijn. Naast de elektrolyser wordt ook voor andere unit operations elektriciteit verbruikt, zoals de pompen en blowers in de ammoniakterugwinning of de schroefpers voor slibontwatering. Ook hiervoor is besloten te kiezen voor 'off shore wind' energie als uitgangspunt en om de vergelijking eerlijk te houden is ook voor elektriciteitsverbruik in de productie van conventionele eiwitten gebruik gemaakt van dit energietype.

Voor de energie die nodig is voor het opwarmen van het digestaat in de ammoniakterugwinning is uitgegaan van het gebruik van biogas uit slibvergisting als best case scenario.

6.4.2 Uitgangspunten productie SCP conform het power-to-protein concept

De uitgangspunten voor de LCA-berekening zijn in tabelvorm opgenomen in Bijlage V. De gebruikte gegevens zijn gebaseerd op de business case voor RWZI Hengelo zoals geformuleerd in paragraaf 4.4 waarbij is uitgegaan van een productie gedurende 24 uur per

dag (24/7). Verder is gebruik gemaakt van de resultaten van de NAR-pilot uit dit onderzoek, bijvoorbeeld met betrekking tot het specifieke chemicaliënverbruik, energieverbruik en warmteverbruik. Dit betekent concreet de recovery van 1.250 kg ammonium per dag. De power-to-protein pilot heeft in dit onderzoek niet aan de doelstellingen voldaan. Tijdens het onderzoek is een maximale productiviteit gehaald van 0,7 kg TSS/m³.dag, terwijl de doelstelling het drievoudige was (2,0 kg TSS/m³.dag). Belangrijkste oorzaak is de geringe waterstof opname efficiëntie in de reactor (tussen 5 en 10 % in onderzoeksperiode IV, zie paragraaf 3.7), wat direct ook de belangrijkste uitdaging is voor vervolgonderzoek (zie hoofdstuk 7). Een reactor bedienen met een zo'n lage waterstof opname efficiëntie is niet realistisch. Wil het power-to-protein concept slagen dan moet het reactorconcept zodanig worden verbeterd dat waterstof meer efficiënt wordt benut. Daarom zijn voor de LCA voorlopig de volgende uitgangspunten gehanteerd voor de waterstof opname efficiëntie en de productiviteit per volume-eenheid:

- waterstof opname efficiëntie: 80 %
- reactor productiviteit: 2 kg TSS/m³.dag (oorspronkelijke doelstelling)

Dit leidt overigens tot een reactorvolume van 4.500 m³ waarmee vervolgens ruim 9 ton SCP per dag wordt geproduceerd. Voor de opwerking van het product zijn kentallen gebruikt voor het gebruik van een schroefpersfilter voor de mechanische ontwatering en een spreedroger voor het drogen. Daarnaast is bij het uitvoeren van de LCA een vergelijking gemaakt tussen het gebruik van ammonia uit de afvalwaterketen – zoals hierboven omschreven – en industrieel geproduceerd ammonia, bijvoorbeeld via het Haber-Bosch proces. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande data in de EcolInvent 3.0 database. Voor het gemak is daarbij aangenomen dat het industrieel geproduceerd ammonium direct inzetbaar is. In de praktijk zal dat niet zo zijn en zal er nog wel een bewerking plaats moeten vinden (bijvoorbeeld verdunning) voordat het ammonium aan de reactor kan worden toegevoegd.

6.4.3 Uitgangspunten conventionele eiwitten

Voor de conventionele eiwitten op basis van rundvlees, kip en varken is gebruik gemaakt van bestaande data uit de Agri Footprint database (Agri Footprint, 2017) en bij kip en varken bovendien van literatuurbedata (Luske *et al.*, 2009). In deze paragraaf staat een korte schets van de uitgangspunten van deze berekeningen. Detailinformatie is opgenomen in Bijlage VI. Overigens is soja als product beschikbaar in de EcolInvent 3.0 database en is voor vis gebruik gemaakt van op internet beschikbare data uit Denemarken (<http://lcafood.dk>)

Bij de berekening van de ecopunten voor rundvlees is in de Agri Footprint database uitgegaan van de productie van rundvlees in Ierland (Casey & Holden, 2006). In dit productiesysteem staan de vleeskoeien, die gemiddeld 2 jaar leven, 214 dagen per jaar buiten op grasland. In deze periode is gras hoofdzakelijk onderdeel van het dieet. De rest van het jaar (151 dagen) worden de koeien gevoed met mengvoer dat voornamelijk bestaat uit gerst, koolzaad, soja en maïs. De broeikasgasemissie behelst voor een groot deel de productie en transport van kunstmest en diervoeding. Daarnaast draagt mestverwerking bij aan de emissie. De ecologische effecten van grazen is ook opgenomen in de berekening.

De Nederlandse kippenvleesproductie bestaat uit drie fases. In de eerste fase worden de vleeskuikenouders gefokt tot de 20e week. Daarna gaan de vleeskuikenouders eieren leggen in de tweede fase waarop slachting volgt. De eieren worden overgebracht naar een broederij en wanneer deze zijn uitgekomen worden de kippen gefokt tot een paar weken om vervolgens te worden geslacht voor de productie van kippenvlees. Elektriciteit, gas, water en voeding zijn nodig voor alle drie fases.

De productie van varkensvlees kent twee fases in Nederland. Eerst worden biggen geboren

uit een varkenszeug, waarna deze tot 25 kg groeien. In de tweede fase worden de biggen vetgemest tot 120 kg in 16-17 weken. Het voeder bestaat voornamelijk uit tarwe (26%), gerst (36%) en soja (17%). De emissies van broeikasgassen wordt veroorzaakt door transport van diervoeding, elektriciteit- en gasgebruik, alsmede mestverwerking en darmgisting. De berekening van ecopunten aangaande in het wild gevangen kabeljauw is gebaseerd op het koelen van de gevangen vis, de diesel voor de boot en activiteiten in de haven. In de berekening is ook rekening gehouden met verzuring van de oceaan en eutrofiëring. Het verwerken tot filet is niet meegenomen in de berekening (wat conform de gekozen systeemgrens is).

6.5 Resultaten LCA

De milieu-impact van de productie van 1 kg SCP via het power-to-protein concept bedraagt ongeveer 0,63 ecopunten (zie Tabel 6-1; scenario Basis a). De waarde voor SCP wordt voor 80 % bepaald door het gebruik van elektriciteit in het productieproces (productie waterstof en zuurstof in elektrolysecel). Dit betekent dat de bron van elektriciteit in hoofdzaak bepalend is voor de milieu-impact. Indien de berekening bijvoorbeeld wordt uitgevoerd uitgaande van energie uit waterkracht ('hydro'), de groenste van alle elektriciteitssoorten, dan is de milieu-impact slechts 0,22 ecopunten per kg product. Wordt daarentegen uitgegaan van 'onshore wind' elektriciteit dan bedraagt het aantal ecopunten 2,49 per kg product wat weer aanzienlijk hoger ligt dan 'offshore wind'. In Tabel 6-1 is dit naast 'hydro' en 'onshore wind' voor (een mix van) verschillende energiesoorten berekend.

TABEL 6-1 OVERZICHT VAN DE LCA-BEREKENING VOOR DE MILIEU-IMPACT VAN SCP BIJ VERSCHILLENDE ELEKTRICITEITSSOORTEN EN -MIXEN (MARKET = ACTUELE MIX VAN ELEKTRICITEITSSOORTEN IN NL)

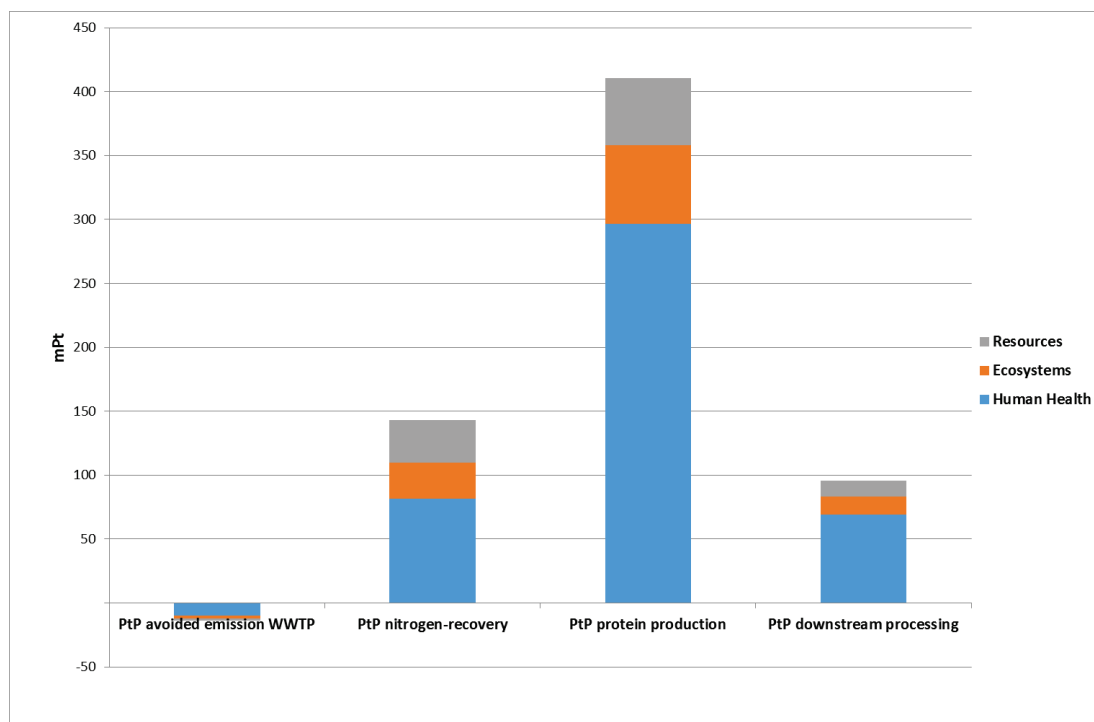
Scenario	N verwijdering RWZI	General electricity	Electrolyser electricity	Ecopunten (Pt)
Basis a	Nitri-denitri	Wind offshore	Wind offshore	0,635
Basis b	Anammox	Wind offshore	Wind offshore	0,646
1 a	Nitri-denitri	Hydro	Hydro	0,221
1 b	Anammox	Hydro	Hydro	0,222
2	Nitri-denitri	Market	Onshore wind	3,31
3	Nitri-denitri	Market	Offshore wind	1,79
4	Nitri-denitri	Market	Market	7,08
5	Nitri-denitri	Wind onshore	Wind onshore	2,49
6	Nitri-denitri	Natural gas	Natural gas	4,59
7	Nitri-denitri	Hard coal	Hard coal	10,3
8	Nitri-denitri	Oil	Oil	5,50

In Figuur 6-2 is weergegeven hoe de verschillende unit operations bijdragen aan de milieu-impact van de productie van SCP. In deze figuur is ook de vermeden emissie voor omzetting van ammonium op de RWZI via nitrificatie/denitrificatie meegenomen. Die bijdrage blijkt overigens relatief gering (2 %). Bovendien kan uit de data in Tabel 6-1 worden opgemaakt dat het voor de milieu-impact van SCP vrijwel niet uitmaakt of op de RWZI conventionele nitrificatie/denitrificatie dan wel het Anammox-proces wordt toegepast. Als Anammox wordt toegepast, is de vermeden emissie in potentie net iets lager.

Figuur 6-5 geeft de boomstructuur weer voor de berekening van de milieu-impact voor SCP. Ook hier is een onderscheid gemaakt naar unit operations. Deze figuur maakt de grote bijdrage van het elektriciteitsverbruik van de elektrolyser inzichtelijk. Daarnaast leveren het energieverbruik voor de ammoniumterugwinning (opwarming digestaat) en de verwerking van de biomassa (drogen SCP) een significante bijdrage aan de milieu-impact.

In Figuur 6-3 is de vergelijking gemaakt met de vijf conventionele eiwitbronnen. Hieruit blijkt dat SCP gunstiger scoort dan rundvlees en kippenvlees, maar vergelijkbaar is met varkensvlees. De milieu-impact van 1 kg soja en 1 kg vis ligt daarentegen lager. Ook hier is de bijdrage van het elektriciteitsverbruik bij de productie van SCP allesbepalend.

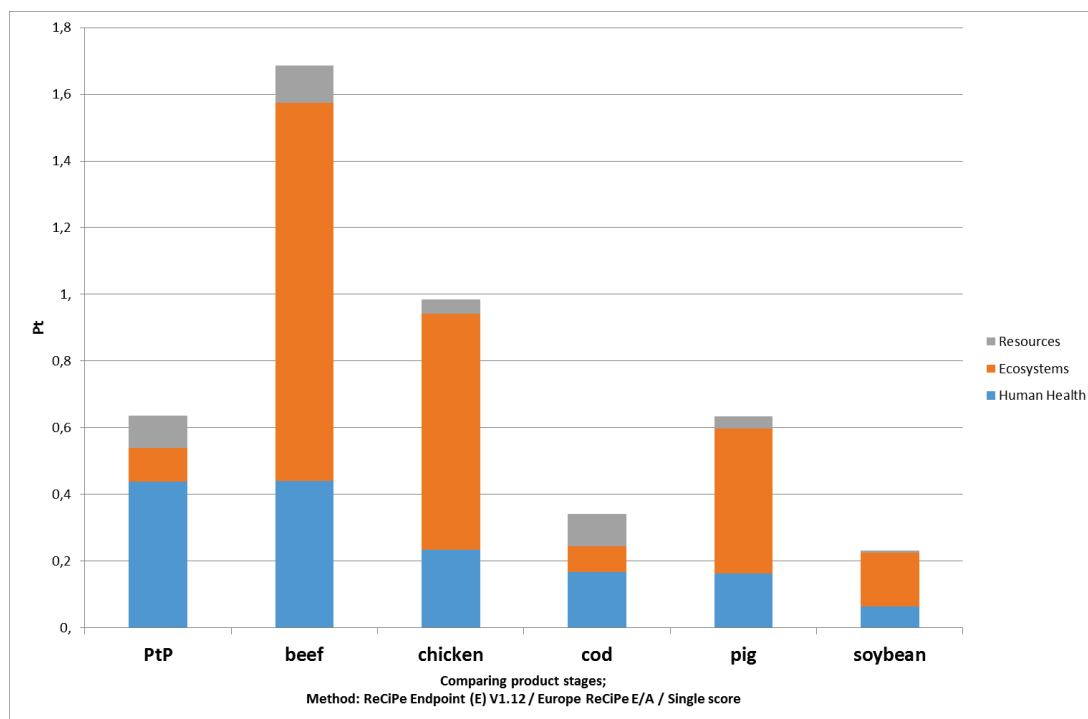
FIGUUR 6-2 BIJDRAGE VAN DE VERSCHILLENDE UNIT OPERATIONS VOOR DE PRODUCTIE VAN SCP AAN DE MILIEU-IMPACT PER KG PRODUCT IN MILLI-ECOPUNTEN (VERDEELD NAAR MIDPOINTS EN INCLUSIEF VERMEDEDE EMISSIE)



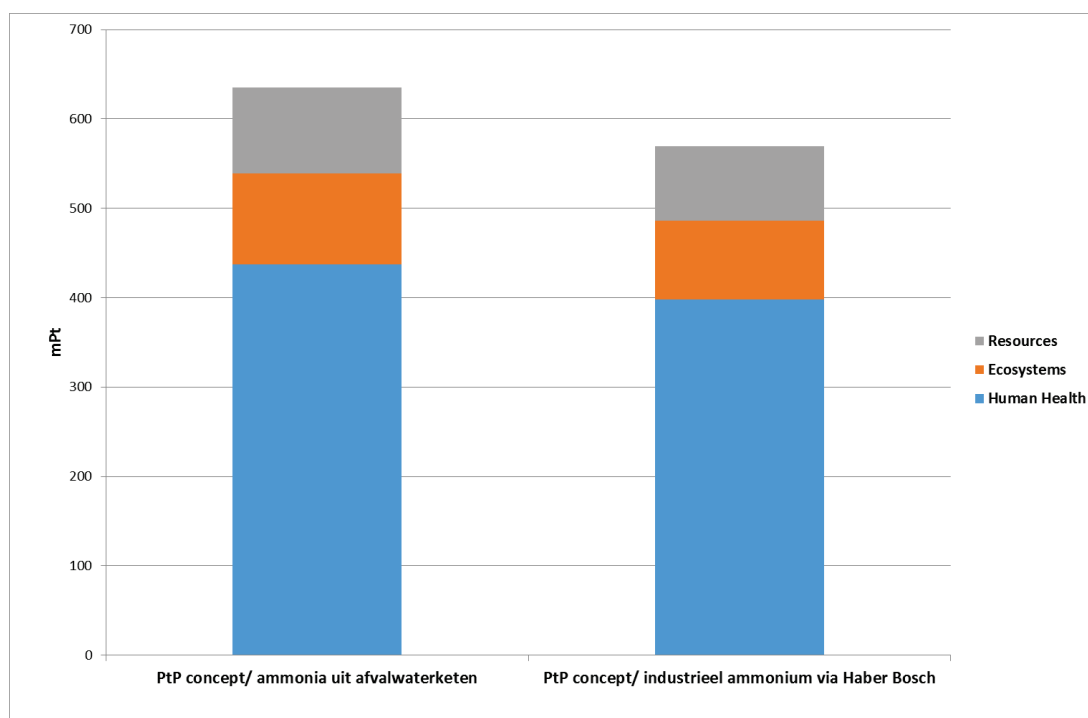
Bij de andere conventionele eiwitten speelt elektriciteitsverbruik nauwelijks een rol in de totale milieu-impact. Wat dan opvalt, is dat een groene elektriciteitssoort als *'off shore wind'* blijkbaar toch al een zodanig significante milieu-impact heeft dat SCP wat betreft duurzaamheid niet kan concurreren met soja en vis. Uit Tabel 6-1 blijkt dat een overgang naar *'hydro'* als elektriciteitssoort leidt tot een waarde van 0,22 Pt per kg SCP, waarmee het direct als beste uit de vergelijking zou komen (soja-eiwit scoort 0,23 Pt/kg).

In Figuur 6-4 ten slotte is weergegeven wat het zou betekenen voor de milieu-impact van SCP als in plaats van ammonium uit het digestaat dat wordt teruggewonnen via luchtstrippen, gebruik wordt gemaakt van industrieel geproduceerd ammonium (met *'off shore wind'* electriciteit). Wat opvalt is dat het via het Haber-Bosch geproduceerde ammonium leidt tot een lagere milieu-impact (- 10 %).

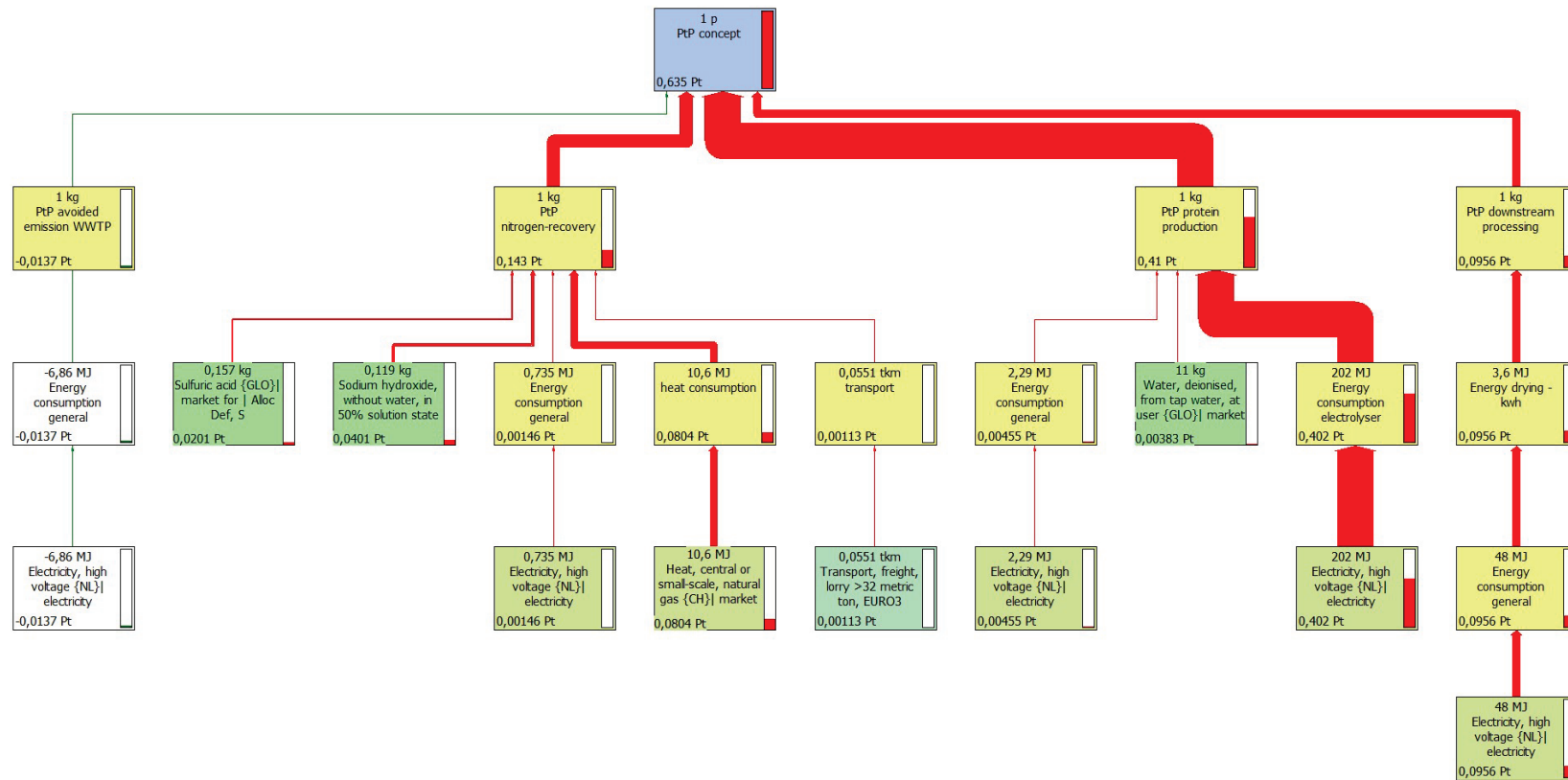
FIGUUR 6-3 AANTAL ECOPUNTEN PER KG PRODUCT VOOR SCP IN VERGELIJKING MET VIJF CONVENTIONELE EIWITBRONNEN (VERDEELD NAAR MIDPOINTS)



FIGUUR 6-4 EFFECT OP DE MILIEU-IMPACT IN MILLI-ECOPUNTEN PER KG SCP BIJ GEBRUIK VAN INDUSTRIEEL GEPRODUCEERD AMMONIUM.



FIGUUR 6-5 BOOMSTRUCTUUR VOOR DE LCA-BEREKENING VAN DE MILIEU-IMPACT VOOR DE PRODUCTIE VAN 1 KG SCP OPGESPLITST NAAR UNIT OPERATIONS (INCL VOORKOMEN EMISSIE)



7 Discussie

7.1 Technische haalbaarheid Power-to-protein concept

In dit rapport is een beschrijving gegeven van het ontwerp en de bouw van de power-to-protein pilot en het daarop volgende praktijkonderzoek in de periode van januari 2017 tot en met april 2018. Ondanks de aandacht die tijdens het ontwerp is besteed aan optimalisatie van de stofoverdracht van waterstof in het reactormedium (zie hoofdstuk 2), is tijdens het onderzoek vastgesteld dat de opname efficiëntie van waterstof door het systeem ruimschoots onvoldoende is. Dit betekent dat het inbrengen van waterstof door de vorming van microbubbles via keramische beluchtingselementen tekort is geschoten. De elementen zelf bleken daarnaast ook nog eens gevoelig voor breuk waarschijnlijk door een verschijnsel dat ‘gas hammering’ wordt genoemd en dat enige analogie vertoont met het verschijnsel waterslag. Met deze kennis kan dit specifieke probleem overigens in de praktijk worden voorkomen door de drukken meer geleidelijk op te voeren.

Problemen met gasoverdracht (van zuurstof) liggen waarschijnlijk ook ten grondslag aan de aanwezigheid van anoxische zones in de reactor, vooral langs de wand van de reactor en in het reactordeel onder de begassingselementen. Het verlagen van de positie van het begassingselement voor zuurstof tijdens het onderzoek heeft dit probleem niet kunnen verminderen. Uiteraard heeft de aanwezigheid van deze anoxische zones een negatief effect op het microbiom in de reactor omdat daarmee ongewenste micro-organismen een niche kunnen vinden die vervolgens ongewenste verbindingen kunnen introduceren. Overigens is tijdens het onderzoek vastgesteld dat nitrificeerders ook een niche vinden in de reactor waarbij ze een deel van het ammonium omzetten naar nitraat en nitriet. Ook hier kunnen de anoxische zones indirect een rol hebben gespeeld omdat daar mogelijk nitraat en nitriet worden verbruikt als elektronenacceptoren en verder worden gereduceerd tot stikstofgas zodat inhibitie van de nitrificatie niet plaatsheeft.

Die mindere kwaliteit van het microbiom in de pilot reactor komt tot uiting in de analyse van het opgewerkte SCP (zie hoofdstuk 5). Om te beginnen is het ruw eiwitgehalte (49 %) van het SCP uit onderzoeksperiode IV een fractie lager dan van het SCP dat in het verleden is opgewerkt uit de laboratorium reactor (5 liter) bij Avecom met een (stabiele) monocultuur van *Sulfuricurvum spp* (60%). Zoals blijkt uit de informatie in Figuur 5-4 kon het SCP uit die laboratorium reactor zich ook nog perfect meten met de kwaliteit van vismeel en sojameel. Gelet op de gehalten aminozuren heeft het SCP uit de pilot reactor echter een aanzienlijk mindere kwaliteit. Dit biedt tegelijkertijd de hoop dat met het verbeteren van de overdracht van gasen in de reactor, niet alleen het probleem met de anoxische zones kan worden opgelost, maar ook de kwaliteit van het microbiom kan worden verbeterd zodat een SCP-kwaliteit wordt bereikt die meer in lijn is met de kwaliteit gevonden in de kleinschalige reactor bij Avecom. Daarbij geeft ook dit onderzoek voldoende redenen om aan te nemen dat het microbiom in principe goed zijn werk doet, maar dat de problemen in de kern vooral zijn terug te voeren op de problematiek van het reactorontwerp en een goede stofoverdracht.

Een ander belangrijk aspect met betrekking tot de kwaliteit van het gevormde eiwit houdt verband met de mogelijke overdracht van pathogenen vanuit de afvalwaterketen naar het product. In dit onderzoek is dit door middel van challengetesten met indicatororganismen onderzocht. Met deze challengetesten kon de oorspronkelijke onderzoekshypothese worden bevestigd. Die hypothese luidde dat door de hoge temperaturen, de lucht-water overgang en

de condities in de opslag van ammoniumsulfaat geen significante overdracht plaatsheeft van pathogene micro-organismen naar het product. Overigens bleken de condities tijdens de opslag van het gevormde ammoniumsulfaat slechts een gering effect te hebben op SSRC, als enige nog meetbare indicatororganisme. De challengetesten geven wel aan dat rekening moet worden gehouden met de overdracht van thermoresistente bacteriesporen naar de reactor en naar het product. Deze thermoresistente bacteriesporen zullen uiteindelijk vooral bepalend zijn voor de houdbaarheid van het eindproduct (zoals niet ongebruikelijk bij voedingsmiddelen in algemene zin).

In dit onderzoek is geen aandacht besteed aan de overdracht van organische microverontreinigingen (OMP's) vanuit de afvalwaterketen naar het ammoniumsulfaat. Voor zover het gaat om vluchtige verbindingen bestaat uiteraard het risico dat deze worden gestript in de ammoniakstripper. Het effect van wassen of scrubben van de lucht met een zwavelzuuroplossing zal naar verwachting voor vluchtige organische componenten echter veel minder effectief zijn (ten opzichte van ammoniak) zodat verwacht mag worden dat de meeste vluchtige componenten met de luchtfase zullen worden afgevoerd. De overdracht van niet-vluchtige verbindingen zal voornamelijk afhangen van de concentratie van die verbindingen in het digestaat, de thermische stabiliteit van die verbindingen en de meesleep van waterdruppels in de ammoniakstripper. Bekend is dat vooral hydrofobe OMP's zich ophopen in het slib van rioolwaterzuiveringen en redelijke persistent kunnen zijn ook onder de anaerobe condities tijdens vergisting. Dit aspect moet nader worden onderzocht.

Een LCA bekijkt in algemene zin het effect op het milieu van een product of service vanaf het begin (het maken) tot aan het einde (het verwerken). Uit de uitgevoerde LCA-analyse blijkt voor het power-to-protein concept in het bijzonder de grote gevoeligheid voor de keuze van de bron van elektriciteit (zie Tabel 6-1). Hoe duurzamer de productie van elektriciteit, hoe lager de milieu-impact van het concept. Deze afhankelijkheid van het power-to-protein concept wordt voor een groot deel veroorzaakt door de energievraag van de elektrolyser voor de productie van waterstof en zuurstof en voor een klein deel door de energievraag voor het strippen van ammonium en de downstream processing van het gevormde SCP. Omdat die afhankelijkheid van de elektriciteitsbron voor conventionele eiwitbronnen veel minder prominent is, kan bij keuze voor off-shore windenergie het power-to-protein concept beter scoren dan de productie van rundvlees en kippenvlees. Dat geldt echter niet voor varkensvlees, soja en vis. Zoals in paragraaf 6.2 bij de keuze van de functionele eenheid al is opgemerkt zou nog een correctie kunnen worden gemaakt als de milieu-impact per 'kg eiwit' wordt bepaald (in plaats van 'per kg product'). Uit dit onderzoek blijkt bijvoorbeeld dat de milieu-impact van de productie van 1 kg SCP en 1 kg varkensvlees gelijk is aan elkaar (0,63 Pt/kg product). Maar uitgedrukt per kg eiwit wordt dat 1,29 Pt/kg SCP-eiwit respectievelijk 3,00 Pt/kg varkens-eiwit. Hierbij moet bovendien worden opgemerkt dat het ruwe eiwitgehalte van het SCP dat is geproduceerd in dit onderzoek - om hierboven beschreven redenen - nog relatief laag is geweest.

Uit de LCA-analyse blijkt vooral de lage impact van het power-to-protein concept op de ecosystemen (als endpoint) ten opzicht van alternatieve eiwitten. Dat heeft direct te maken met relatief ongunstige aspecten (midpoints) die zijn gekoppeld aan de productie van vlees zoals verzuring van de bodem, eutrofiëring van oppervlaktewater, landgebruik en verlies aan natuur. Het power-to-protein concept scoort relatief slecht op het endpoint "human health" of menselijke gezondheid. Dat wordt veroorzaakt door de hoogste relatieve scores op midpoints zoals menselijke toxiciteit en in mindere mate ioniserende straling. Zoals uit de LCA-analyse zelf blijkt - en dan met name uit de vergelijking met gebruik van waterkracht (hydro power) - moet deze score vooral worden gerelateerd aan de productie van elektriciteit via off-shore windparken. Daarbij vereist de productie van SCP veel elektrische energie. Het is niet mogelijk om in SimaPro rechtstreeks te doorgronden waardoor deze relatief hoge scores op deze midpoints worden veroorzaakt. In Bijlage VII is een nadere analyse uitgevoerd

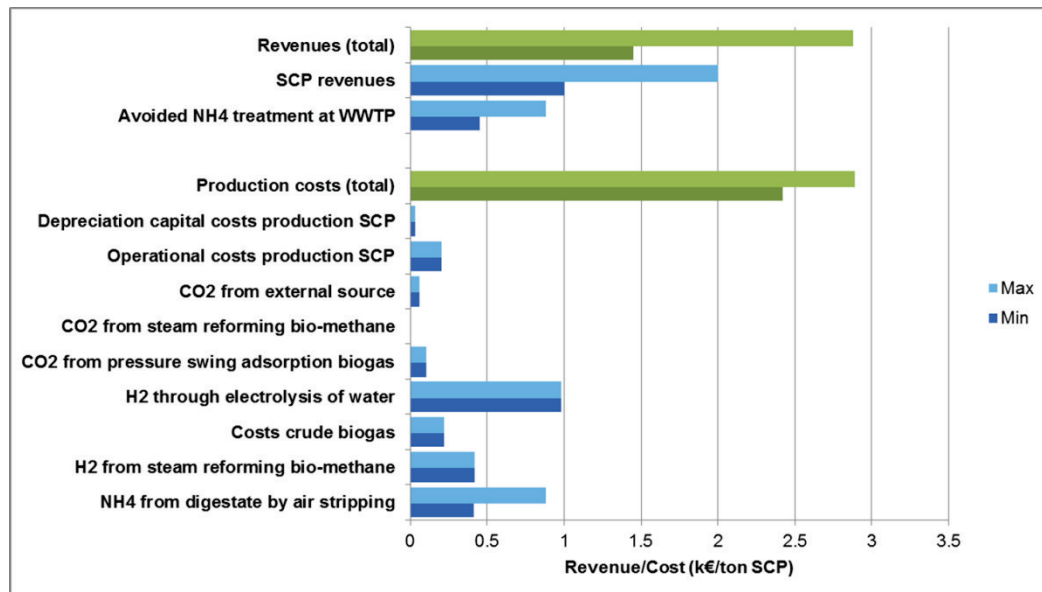
van het LCA-resultaat waarbij een aantal externe referenties zijn betrokken. Uit die analyse en referenties blijkt dat aan de productie van elektriciteit in algemene zin gezondheidsrisico's zijn gekoppeld. Voor duurzame bronnen zijn die – na omzetting in DALY's – evident lager dan voor fossiele bronnen, maar niet te verwaarlozen. Bij windparken moet vooral worden gedacht aan risico's gekoppeld aan de constructie en het onderhoud van de windmolens (occupational hazards) en risico's gekoppeld aan het vrijkomen van verontreinigingen die vrijkomen bij de fabricage en ongevallen tijdens transport van de onderdelen (public hazards). Deze risico's leiden bij de omzetting van DALY's in eco-punten tot een significante bijdrage in het eindresultaat.

Een opvallend resultaat van de LCA is dat de milieu-impact van het gebruik van industrieel ammonium gunstiger uitkomt dan het gebruik van teruggewonnen ammonium uit de afvalwaterketen (zie Figuur 6-4). Overigens is dit aspect slechts globaal onderzocht en is het berekende verschil marginaal, maar zelfs als er geen verschil zou zijn, biedt dit een goed perspectief voor de productie van eiwitten met 'schoon' ammonium, dat wil zeggen ammonium met minder kans op aanwezigheid van bacteriesporen of OMP's. Dit zou in de toekomst kunnen leiden tot twee verschillende productiesporen, één spoor waarbij industrieel ammonium wordt gebruikt en waarvan het product wordt gebruikt als basis voor menselijke consumptie en een tweede spoor waarbij teruggewonnen ammonium wordt gebruikt voor de productie van diervoeder.

7.2 Economische haalbaarheid

Voor de terugwinning van ammonium is in het kader van dit onderzoek een business case doorgerekend uitgaande van de data van RWZI Hengelo (zie paragraaf 4.4). Qua omvang en opzet staat de gecentraliseerde slibvergisting op de RWZI Hengelo model voor een efficiënte slibverwerking in Nederland. Op grond van de behaalde resultaten met de NAR-pilot is een kostprijs berekend van € 2,18 per kg N. Indien sprake is van restwarmte die kan worden benut, kan dit bedrag verder afnemen tot € 1,54 per kg N. In de economische evaluatie (business case voor Amsterdam) in de rapportage van fase 1 van het onderzoek (KWR-rapport 2015.049) is uitgegaan van kosten voor luchtstrippen van ammonium in de range van € 2,1 – 2,6 per kg N. Dit uitgangspunt lijkt met dit onderzoek bevestigd. De ammoniumconcentratie in het digestaat van Hengelo is daarbij nog relatief laag ten opzichte van het uitgangspunt in de economische berekening van fase 1 (1.667 mg/kg ten opzichte van 2.600 mg/kg). Bij een concentratie van 2.600 mg/kg ammonium in het digestaat komen de op basis van dit onderzoek berekende kosten per kg N uit op €1,60, en dat is ruim onder de aanname destijds. Het gebruik van restwarmte kan de kosten per kg N nog verder omlaag brengen. Aangezien in fase 1 is vastgesteld dat de terugwinning van ammonium uit afvalwater een significante kostenpost is (zie Figuur 7-1), heeft dit onderzoek geleerd dat de uitgangspunten in fase 1 van het onderzoek te conservatief zijn geweest. Dit betekent dat in Figuur 7-1 voor de terugwinning van ammonium ten minste uit mag worden gegaan van de minimale kosten.

FIGUUR 7-1 KOSTEN EN OPBRENGSTEN VAN DE PRODUCTIE VAN SCP VOOR DE BUSINESS CASE AMSTERDAM UIT FASE 1 VAN DE STUDIE



Dit pilotonderzoek heeft geen aanvullende inzichten opgeleverd met betrekking de productie van het SCP zelf die aanpassing van de economische beschouwing uit fase 1 op dat punt zouden rechtvaardigen. Daarvoor is er nog teveel onduidelijkheid over het reactorconcept en moet eerst de waterstof efficiëntie aanzienlijk worden verbeterd.

Met de verbetering van het reactorontwerp moet tegelijkertijd ook de kwaliteit van het geproduceerde SCP sterk verbeteren. De kwaliteit van het gevormde SCP houdt direct verband met de prijs die het eiwit op de markt kan gaan opbrengen. In de uitgangspunten voor Figuur 7-1 is uitgegaan van een opbrengst tussen 1 en 2 €/kg. Uitgaande van de productiekosten zullen de opbrengsten dichterbij de 2 €/kg moeten liggen. Dit vereist waarschijnlijk een hoger ruw eiwitgehalte en een betere kwaliteit ten opzichte van het SCP zoals in dit onderzoek is geoogst.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Het doel van dit project was opschaling van het power-to-protein concept tot de productie van 1 kg SCP per dag, wat neer komt op een productiecapaciteit van 1,7 kg per m³ per dag. De eindconclusie moet luiden dat de beoogde volumetrische productiecapaciteit niet is gehaald door onvoldoende snelle groei van het microbioom in de reactor. De hoogst bereikte waarde voor de volumetrische productiecapaciteit is 0,7 kg per m³ per dag maar de gemiddelde productie bedroeg 0,5 kg per m³ per dag (onderzoekperiode II). De yield in de reactor, maximaal op een niveau van 0,04 kg TSS/kgCOD-H₂, is te laag geweest waardoor het verkorten van de hydraulisch verblijftijd leidde tot uitspoeling van het microbioom. Via een root cause analysis is uiteindelijk geconcludeerd dat de beperkte waterstofinbreng in het systeem de basisoorzaak is voor het achterblijven van de groei. Metingen hebben dat bevestigd.

- De beoogde volumetrische productiecapaciteit van SCP is niet bereikt door onvoldoende stofoverdracht van waterstof uit de microbellen naar het microbioom in het onderzochte reactorsysteem.
- Hierdoor heeft het pilotonderzoek geen inzichten opgeleverd die een herziening van de economisch evaluatie uit fase 1 van het onderzoek rechtvaardigen.

In algemene zin is vastgesteld dat het laten groeien van een productief HOB (hydrogen oxidizing bacteria) microbioom in het reactorsysteem geen bijzondere problemen meer oplevert (buiten het feit dat de groei wordt beperkt door onvoldoende beschikbaar waterstof). Uit analyses blijkt wel dat de kwaliteit van het geproduceerde SCP achter blijft bij de kwaliteit van het SCP geproduceerd in de labschaal reactor bij Avecom. Ook hier vormt de slechte gasoverdracht in de pilotreactor een basisoorzaak omdat daardoor anoxische zones ontstaan die ook de groei van nitrificatoren bevorderen.

- De mindere kwaliteit van het geproduceerde SCP in dit onderzoek is indirect ook het gevolg van onvoldoende stofoverdracht van gassen uit microbellen naar het microbioom in het onderzochte reactorsysteem.

Andere conclusies van dit onderzoek zijn:

- Het terugwinnen van ammonium uit het digestaat van de slibvergisting door middel van luchtstrippen en absorptie van ammoniak in een zwavelzuuroplossing blijkt zowel technisch als economisch haalbaar.
- Voor de economische haalbaarheid van de ammoniumterugwinning blijkt vooral het concentratieniveau van ammonium in het digestaat van belang, waarbij dat niveau bij voorkeur boven de 2.000 mg/l ligt. Daarnaast kan de beschikbaarheid van restwarmte op locatie de kosten van de ammoniumterugwinning aanzienlijk reduceren.
- De economische evaluatie voor de productie van SCP uit fase 1 kan op het punt van de kosten voor de terugwinning van ammonium positief worden bijgesteld.
- De hoge temperaturen en relatief lange verblijftijden bij de ammoniumterugwinning in combinatie met de water/lucht overgang (van ammoniak) zijn voldoende om micro-organismen die gevoelig zijn voor hoge temperatuur met een hoog rendement af te

doden. Hierdoor is het gevormde ammoniumsulfaat bruikbaar als grondstof voor de productie van SCP.

- Houd rekening met de overdracht van thermoresistente bacteriesporen naar het ammoniumsulfaat en de reactor voor de productie van SCP. Deze bacteriesporen zullen vooral bepalend zijn voor de houdbaarheid van het gevormde SCP.
- Uit de LCA-analyse blijkt dat de milieu-impact van het PtP-concept hoofdzakelijk wordt bepaald door de elektrolyse van water tot waterstof en zuurstof en de daarvoor gebruikte elektriciteitsbron. Hieruit volgt dat hoe groener die elektriciteitsbron, hoe beter het concept presteert ten opzichte van andere eiwitbronnen.
- Met het gebruik van elektriciteit uit off-shore windparken volgt uit de LCA-analyse dat – met de gehanteerde uitgangspunten – de milieu-impact van 1 kg SCP als gedroogd product lager is dan die van rundvlees en kippenvlees, maar vergelijkbaar is met varkensvlees. Als de milieu-impact per 'kg eiwit' wordt berekend, verbetert het resultaat voor SCP aanzienlijk als gevolg van het relatief hoge ruw eiwitgehalte van SCP (49 %) ten opzicht van vlees in algemene zin (21 %).
- De LCA leert ook dat voor de ammoniumvoorziening ten behoeve van de productie van SCP, het gebruik van industrieel geproduceerd ammonium een goed alternatief is ten opzichte van terugwinning van ammonium uit de afvalwaterketen. Bijkomend voordeel van het gebruik van industrieel geproduceerd ammonium is dat de kwaliteit van de grondstof zuiverder is aangezien het geen OMPs en/of pathogene micro-organismen bevat.

8.2 Aanbevelingen

Op grond van deze conclusies wordt in de eerste plaats aanbevolen om door literatuurstudie en een modelmatige aanpak (eventueel aangevuld met praktijktesten), meer fundamenteel inzicht te krijgen in de stofoverdracht van waterstof en andere gassen in bioreactoren voor biosynthese, waarbij rekening wordt gehouden met de volgende aspecten:

- invloed van het gebruik van materialen op de stofoverdracht;
- effecten van het microbiom en omzettingsskinetiek op de stofoverdracht van waterstof;
- effecten van in het microbiom aanwezige organische moleculen op de stofoverdracht;
- effecten van andere gassen (O_2 , CO_2) op de stofoverdracht van waterstof;

Een dergelijke studie moet resulteren in opties voor een opschaalbaar reactorontwerp waarbij tevens rekening wordt gehouden met de veiligheidsaspecten. Met een nieuw geoptimaliseerd reactorsysteem moeten nieuwe pilottesten worden gedaan om de economische uitgangspunten voor de SCP-productie vast te kunnen stellen, op de wijze zoals dat in dit onderzoek voor de ammoniumterugwinning is gedaan. Daarnaast moet voor het op die wijze geproduceerde SCP worden onderzocht in hoeverre de kwaliteitsparameters zoals ruw eiwitgehalte en aminozuurgehalten zijn verbeterd ten opzichte van dit onderzoek.

De overige aanbevelingen luiden:

- Doe in een goed functionerend reactorsysteem nader onderzoek naar de aanwezigheid van thermoresistente bacteriën in het microbiom in de reactor bij gebruik van (uit digestaat) teruggewonnen ammonium.
- Doe nader onderzoek naar de aanwezigheid van vooral hydrofobe persistente OMP's in het ammoniumsulfaat op basis van een selectie van hydrofobe OMP's met de hoogste concentraties in digestaat en hoogste persistentie.
- Doe nader onderzoek naar de optimale manier om de biomassa op te werken naar een gedroogd eiwitproduct, waarbij rekening wordt gehouden met de invloed van de verwerkingsmethoden op de eiwitkwaliteit.

- Onderzoek de economische haalbaarheid van een tweede spoor voor productie van SCP waarbij gebruik wordt gemaakt van industrieel ammonium.

9 Literatuurreferenties

9.1 Artikelen

Abou-Zeid, A., Khan, J.A., Abulnaja, K.O. On methods for reduction of nucleic acids content in a single-cell protein from gas oil. *Bioresource Technology* , 1995, Vol. 52.

Boisen, S., and J. A. Fernandez. 1997. Prediction of the total tract digestibility of energy in feedstuffs and

Casey, J.W. & Holden, N.M. (2006) Quantification of GHG emissions from sucker-beef production in Ireland. *Agricultural systems*, vol 90, p.79-98

Chizzolini, R., E. Zanardi, V. Dorigoni and S. Ghidini. Caloric value and cholesterol content of normal and low-fat meat and meat products. *Trends in Food Science & Technology* 10 (1999) 119±128

Kuhad, R.C. et al. Microorganisms as an alternative source of protein. *Topics in food science and nutrition*, 1997, Vols. 55, No. 3.

Luske, B., & Blonk, H. (2009). Milieueffecten van dierlijke bijproducten (pp. 1–79). Gouda: Blonk Milieu Advies, Gouda.

Matassa, S., W. Verstraete et al (2016). Autotrophic nitrogen assimilation and carbon capture for microbial protein production by a novel enrichment of hydrogen-oxidizing bacteria. *Water Research* 101

Pig diets by in vitro analyses. *Anim. Feed Sci. Technol.* 68(3-4): 277-286.

Strong, P.J., Xie, S., Clarke, W.P. Methane as a resource: Can the Methanotrophs Add Value? *Environmental science & technology*, 2015, Vol. 49.

Yazdian, F. et al. Production of single cell protein from natural gas: Parameter optimization and RNA evaluation. *Iranian journal of biotechnology*, 2005, Vol. 3 No.4.

9.2 Presentaties

Menkveld, W. (2015). Recovery of ammonium from digestate as fertilizer. Presentation at the 1st IWA Resource Recovery Conference. Gent September 2015.

Oesterholt, Frank, Laura Snip, Silvio Matassa, Willy Verstraete (2016). Feasibility of the Power-to-Protein concept in the circular economy of the city of Amsterdam. Presented at the IWA World Water Congress. Brisbane, October 2016.

Oesterholt, Frank, Silvio Matassa, Luc Palmen, Kees Roest, Willy Verstraete. Pilot scale production of single cell proteins using the power-to-protein concept. Presented at the 2nd Int. Resource Recovery Conference, New York, 2017.

9.3 Rapporten/boeken

Bakker, C. e.a. (2017) Met recht naar een circulaire economie. Vereniging voor Milieurecht. Uitgegeven door Boom juridisch. VMR 2017-01.

Avecom I (2017). P&ID Power-to-protein pilot versie 13.

Avecom II (2017) HAZOP Power-to-protein pilot – edit 17 October 2017.

Avecom III (2017) Functional description power-to-protein pilot – edit 17 October 2017.

Matassa, S. (2016) Exploring protein production by hydrogen oxidizing microbiomes. Thesis. University of Gent. November 2016.

Nijhuis Industries (2018). AECO-NAR for recovery of ammonium. As a fertilizer or raw material for production of single cell proteins. Confidential – intern report. Maart 2018.

Oesterholt, F., Versteeg E., Verstraete W., Boere J. TKI-project Power to Protein. Toepassing van het “Power-to-Protein” concept in de stedelijke watercyclus van Amsterdam. TKI Watertechnologie, 2015. KWR rapport 2015.049.

WHO. Protein and amino acid requirements in human nutrition. World Health Organization. 935, s.l. : United nations university, 2007, Vol. WHO technical report series

9.4 Overige

Agri-Footprint - Part 2 - Description of data” (Blonk Agri-footprint BV, 2017)

Ecoinvent 3.0 (Ecoinvent centre; Swisse centre for life cycle inventories). Data is opgenomen op basis van “Weide BP, Bauer C, Hischier R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo C.O., Wernet G. (2013). Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre.

<http://lcafood.dk/>

Tuomisto, Hanna (2018). University of Helsinki. Mondelinge informatie/advies.

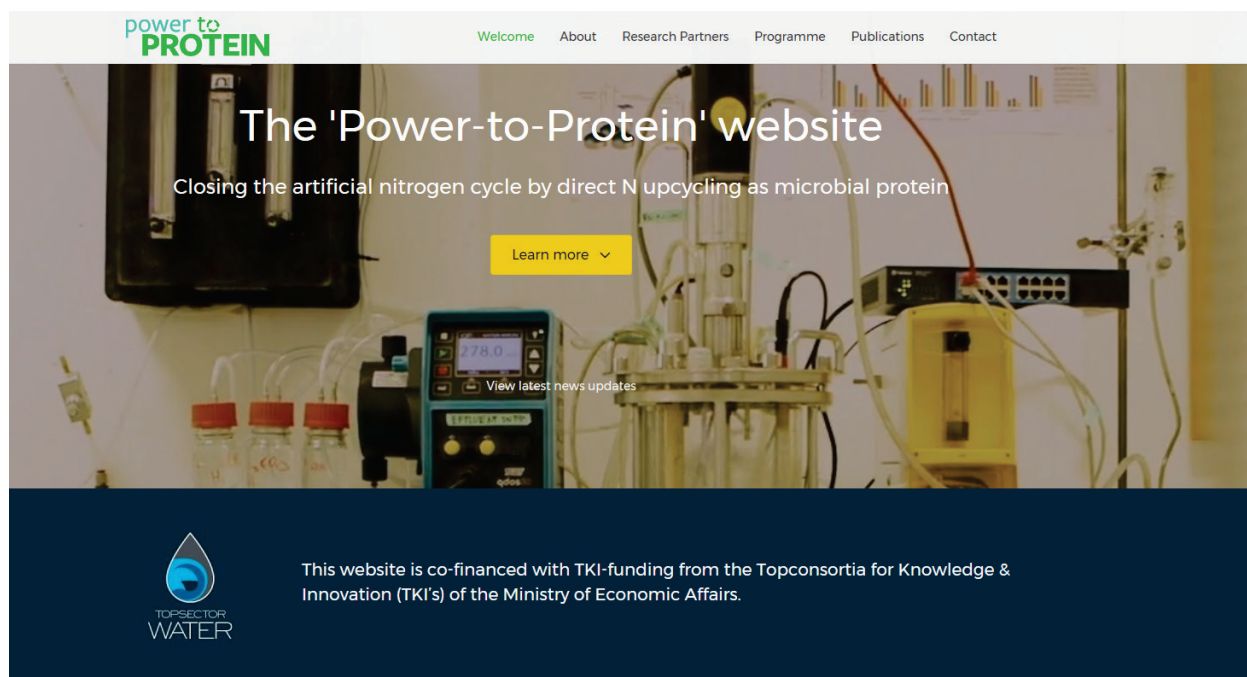
10 Disseminatie

10.1 Website power-to-protein

Voor de optimale informatievoorziening naar het grote publiek over het concept power-to-protein en het projectverloop, is eind 2015 de website www.powertoprotein.eu gelanceerd. De website bevat, naast een toelichting op het concept, een overzicht van de projectpartners, een beschrijving van het onderzoeksprogramma en een overzicht van alle publicaties gerelateerd aan het project.

In Bijlage IX is een overzicht opgenomen van de statistieken van de website over de periode 1 januari 2016 tot en met augustus 2018. In die periode hebben ongeveer 6.500 personen de website geraadpleegd waarbij 11 % meer dan eenmaal.

FIGUUR 10-1 WEBSITE POWER-TO-PROTEIN



10.2 Officiële start pilotstudie in Enschede

Op 29 maart 2017 is de power-to-protein op RWZI Enschede officieel in gebruik genomen met een minisymposium in de Grolsch Veste waarna een gezelschap van ongeveer 50 genodigden de power-to-protein pilot en de NAR-pilot bezochten op het naastgelegen RWZI-terrein. Er was veel belangstelling van lokale media waaronder RTV Oost en TV Enschede.

FIGUUR 10-2 IMPRESSIE OFFICIELE OPENING POWER-TO-PROTEIN PILOT OP 29 MAART 2017



De genodigden werden ontvangen door Jan van Hoek, lid van het dagelijks bestuur van Waterschap Vechtstromen, gevolgd door presentaties van Peter Sengers namens Barentz Animal Nutrition, Silvio Matassa namens Avecom en Frank Oosterholt namens KWR Watercycle Research Institute. Vervolgens zijn de NAR-pilot en de Power-to-Protein pilot op de RWZI Enschede bezichtigd door de deelnemers.

10.3 Publicaties en presentaties

Tijdens de duur van het onderzoek zijn de volgende publicaties en presentaties opgeleverd:

- Interview De Ingenieur, 13 januari 2016; <https://www.deingenieur.nl/artikel/eiwit-uit-rioolwater>
- Interview H2O Waternetwerk; <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-nieuws/1003-eiwitproductie-uit-afvalwater-op-rioolwaterzuivering-enschede>
- Artikel in tijdschrift Het Waterschap
- Artikel in Utilities, Power to Protein koppelt water, energie en food. Mei 2016.
- Presentatie tijdens het IWA World Water Congres in Brisbaen, oktober 2016 (Oosterholt, 2016)
- Promotie Silvio Matassa in November 2016 (Matassa, 2016)
- Presentatie tijdens Nationale Waternetwerkdag in Gorinchem (maart 2017)
- Genomineerde Enlightenment prijs/ Water Innovatie prijs
- Persbericht uitgebracht door WS Vechtstromen i.v.m. de opening op 29 maart 2017

- Kort artikel MilieuMagazine mei 2017 n.a. de opening
- Kort artikel Recycling Magazine
- Artikel De Ingenieur, Voeding uit Afvalwater. April 2017.
- Presentatie project aan Statenleden Overijssel op RWZI Enschede op 17 mei 2017
- Presentatie tijdens International Resource Recovery Congress in (IRRC) 2017 New York, augustus 2017 (Oosterholt, 2017).
- Unie van Waterschappen: "Making Waves bijeenkomst". September 2017". Inzending namens KWR/Avecom (filmpje + projectomschrijving).

Bijlage I Overzicht analyse- resultaten challengetest NAR-pilot

Challengetest	30-6-2017									
Monsterpunt Schema	Monsteromschrijving	Monsternummer	Salmonella MPN/l	SSRC kve/l	SSRC herhaling 4 kve/l (- past.)	SSRC herhaling 4 kve/l (+ past.)	Ø174 pfu/l	Ø174 herhaling 4 pfu/l	ATP ng/l	Temperatuur °C
1	Influent	LMB-33918	< 0,6	> 3,0E+05 past.	ntb, pinpoint	1,20E+07	> 1,0E+07	3,95E+06	2,60E+05	24,2
1	Influent + sonificatie	LMB-33919	0,6	> 3,0E+05 past.	ntb, pinpoint	8,00E+06	> 1,0E+07	4,15E+06	1,90E+05	24,2
	Doseersuspensie	LMB-33920	> 2,2E+07	> 3,0E+08 past.	ntb, pinpoint	1,80E+10	> 1,0E+09	8,80E+09		5,9
2	CO ₂ stripper, 1e compartiment	LMB-33921	920	1,20E+07			4,85E+05			62,4
3	CO ₂ stripper, 2e compartiment	LMB-33922	48	9,20E+06			1,85E+04			63,4
4	CO ₂ stripper, 3e compartiment	LMB-33923	9,20E+03	8,40E+06			1,20E+04			63,8
5	CO ₂ stripper, 4e compartiment	LMB-33924	3	1,50E+07			3,60E+03			62,9
6	Ammonium stripper, condensaat	LMB-33925	930 (div. sp)	3,40E+04			<100			
7	Ammonium stripper, effluent (binnen)	LMB-33926	2,20E+05	5,40E+06			1,15E+04			60,1
8	Ammoniumsulfaat T=0	LMB-33927	< 0,6	5,80E+03			<100		74 ± 21 (remming 98,58%)	
	Bewaarprouf + ent T=0	LMB-33928	18,6	1,30E+04			170		120 ± 21 (remming 98,61%)	
8	Bewaarprouf - ent T=4 dgn	LMB-33929	< 0,6	3,20E+03			< 100		110 ± 34 (remming 98,71%)	
	Bewaarprouf + ent T=4 dgn	LMB-33930	6	1,20E+04			100		120 ± 22 (remming 98,66%)	
8	Bewaarprouf - ent T=7 dgn	LMB-33931	< 0,6	2,90E+03			< 20		120 ± 34 (remming 98,69%)	
	Bewaarprouf + ent T=7 dgn	LMB-33932	< 0,6	1,10E+04			80		100 ± 11 (remming 98,69%)	
	Bewaarprouf - ent T=39 dgn	LMB-36614		2,50E+03						

Challengetest	7-8-2017				
Monsterpunt Schema	Monsteromschrijving	Monsternummer	Salmonella MPN/l	SSRC (D10) kve/l	Ø174 pfu/l
1	Influent (+ ent)	LMB-36483	7,80E+07	8,4E+06	7,7E+06
5	Ammonium stripper, 4e compartiment	LMB-36484	< 0,6	4,6E+05	3,3E+03
6	Ammonium stripper, condensaat	LMB-36485	> 2,2E+05	1,2E+04	< 100
7	Ammonium stripper, effluent (buiten)	LMB-36486	< 0,6	2,8E+05	300
8	Ammoniumsulfaat voor dosering	LMB-36487	< 0,6	50	< 100
8	Ammoniumsulfaat na dosering	LMB-36488	< 0,6	1,7E+03	< 100

Bijlage II Waterstofinvoer Power-Protein reactor

Scope

Dit document beschrijft een belangrijk dimensioneel aspect van een van de proces/apparaattopties, nl het effect van de belgrootte. Een van de uitgangspunten is dat in het proces waterstof door microbubbles wordt ingebracht, welke gedurende hun verblijftijd geheel oplossen. In dat geval is de fermentor zelf relatief eenvoudig, een geroerde of airlift tank met draft tube, hetgeen op korte tijdschaal (die waarin een bel oplost) procesmatig dan overeenkomt met een omloopreactor.

Samenvatting berekening.

Onder o.a. de aannames dat de concentratie opgeloste waterstof de helft van de oplosbaarheid bedraagt, dat het oplossen met een factor 5 verlaagd wordt door verontreinigingen en de druk 1 bar is, wordt gevonden:

Een bel van 30 μ doorsnede ($2.83\text{E-}9 \text{ m}^2$, $1.41\text{E-}14 \text{ m}^3$) lost naar verwachting op in 100 seconden (voor 100 μ bellen: $3.14\text{E-}8 \text{ m}^2$, $5.24\text{E-}13 \text{ m}^3$, 330 seconden). Er moeten per seconde ca $1\text{E}10$ (bellen van 30 μ) (100 μ : $2.7\text{E}8$) bellen worden geproduceerd, hetgeen 15 tot 20 W vraagt (theoretisch 2 W). De holdup is ca. 2 L gas per m^3 reactorinhoud (voor 100 μ bellen: 15 L).

Teneinde geen waterstof in de bovenruimte te krijgen, dient de transporttijd tussen de sparger en de bovenruimte minimaal 100 seconden te bedragen (voor 100 μ bellen: 330 s). Vanwege de verwaarloosbare stijgsnelheid van de bellen betekent dit bij een verticale vloeistof snelheid van 5 cm/s een hoogte van 5 m. Voor 100 μ bellen is nog steeds de stijgsnelheid klein (max 1 cm/s), maar dient de transporttijd van de vloeistof waarin de verse bellen de reactor in komen naar het oppervlak minimaal 300 seconden te bedragen.

Aanbevolen wordt eerst de oplossnelheid van waterstof in een reeel systeem te verifiëren.

Indien zuurstoftransportsnelheid vanuit de bel gelijk blijft in verhouding tot die van waterstof (nl 1:3), en deze ook gehinderd wordt, geldt daar ongeveer een analoog verhaal.

Daarnaast kunnen waterstofbellen zuurstof uit het water strippen, en omgekeerd.

Het wordt aanbevolen om zo klein mogelijke bellen te produceren.

A. Uitgangspunten:

1) Stoichiometrie (geschat):

voor de groei: $-2.1 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 + 0.2 \text{ NH}_3 + 1.5 \text{ H}_2\text{O} + 1x$ ($x = \text{C}_1\text{H}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$)

plus voor de energie: $- 5 \text{ H}_2 - 2.5 \text{ O}_2 + 5 \text{ H}_2\text{O}$

totaal: $7 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 + 2.5 \text{ O}_2 + 0.2 \text{ NH}_3 \rightarrow 1\text{x} + 6.5 \text{ H}_2\text{O}$

2) Produktiesnelheid: overeenkomend met de opgegeven 1 kg H_2 per dag. Dat levert ca $200 \text{ gram gebonden N op (idealiter)}$, hetgeen ongeveer overeenkomt met de door Avecom opgegeven 150 gram per dag . Er moet derhalve ca 6 mmol H_2 per seconde ($1.3 \cdot 10^{-4} \text{ Normaal-m}^3$) worden ingevoerd.

3) Reactorkeuze: geroerde tank, met invoer van waterstof middels microbellen. Recirculatie door milde propelloractie of airlift, gecombineerd met een draft tube. De microbellen kunnen rechtstreeks onder druk vanuit de electrolyse geproduceerd worden. Mits voldoende klein, lossen de bellen lossen snel op, waardoor er in principe geen gascirculatie nodig is. Alternatieven zouden zijn: a) Geroerde tank, met grote bellen, en gasrecirculatie. b) Plunging jet reactor.

4). Diverse aannames (later te verifiëren, en/of te variëren voor gevoeligheidsanalyse):

- Microbellen zijn rigide.
- De steady state waterstofconcentratie in de vloeistof bedraagt de helft van de verzadigingsconcentratie.
- Op basis van literatuur, die overigens grote spreiding vertoont, is de lineaire oplosnelheid van de bellen constant. Dit experimentele gegeven is anders dan de theoretische oplosnelheid waarbij de diffusiegrenslaag rond microbellen gelijk is aan de straal van de bellen, hetgeen equivalent is met $Sh=2$.
- De waterstof wordt gegenereerd bij een druk van 10 bar in de electrolyse. Deze overdruk wordt gebruikt om gemakkelijk microbellen te genereren in bv een membraanunit. Deze microbellen hebben dan een druk die gegeven is door de Laplacedruk.
- Viscositeit van de vloeistof is gelijk aan die van water bij kamertemperatuur.
- Power input = 1 kW/m^3 , dan is voor een waterig systeem de Kolmogorov lengte ongeveer 50μ (de kleinste schaal van turbulentie).
- De diffusie van waterstof wordt gehinderd door oppervlakte actieve stoffen aan het oppervlak van de bel hetgeen volgens literatuur een factor 5 uitmaakt.
- Druppels van 100μ en kleiner stijgen met 1 cm per seconde of minder, en worden geacht geheel meegesleurd te worden door de vloeistof.

B. Berekening belgrootte.

Vereist totaaloppervlak en holdup.

Microbellen kunnen worden opgevat als rigide bellen, waarvan de oplosnelheid gelimiteerd wordt door de diffusie door de grenslaag in de omringende vloeistof. De drijvende kracht stellen we gelijk aan het concentratieverschil tussen de met waterstof verzadigde vloeistof nabij de bel en in de bulk van de oplossing, onder bovenstaande aanname gelijk aan $\Delta c(\text{H}_2) = p\text{H}_2(\text{verzadigd})/\text{Henry-coeff} - c\text{H}_2(\text{bulk}) = (0.8 \text{ mmol/L}) \cdot p_{\text{bel}} - 0.4 \text{ mmol/L} = 0.4 \text{ mmol H}_2 \text{ opgelost per L ofwel } 0.4 \text{ mol H}_2/\text{m}^3 \text{ opgelost}$.

Daarbij stellen we dan conservatief dat de partiele druk van het waterstofgas 1 bar is (later te corrigeren voor Laplacedruk $\Delta P = 2 \sigma / r$) en evt drukreactorontwerp).

De vereiste oplossnelheid aan totaal waterstof is 6 mmol H_2 per seconde.
De Kolmogorovlengte (kinematische viscositeit³/energiedissipatie)^{1/4} = $((10^{-6})^3 / 1000)^{1/4} = 55$ micrometer. Dit is (toevallig) vrijwel gelijk aan de te verwachten diffusie grenslaagdikte van 50 micron (verse bel van 100 μ). Bij een diffusiecoëfficiënt D van $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ is de overdracht theoretisch $D \cdot (0.4) / (55 \cdot 10^{-6}) = 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ mol per m}^2 \text{ beloppervlak per m}^3 \text{ vloeistof per seconde}$.

Uitgedrukt in Sherwoodgetal: $Sh = 2 = k \cdot \text{beldiameter} / D = 2 \cdot \text{straal} \cdot k / D$, hetgeen overeenkomt met een grenslaag gelijk aan de straal ($k = D / \text{straal}$).

Er is dan benodigd $A = 0.006 \text{ (mol } H_2 \text{ per seconde benodigd)} / 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ (mol } H_2 \text{ getransporteerd per m}^2 \text{ per seconde)} = 170 \text{ m}^2 \text{ beloppervlak (= A)}$.

Als alle bellen 100 μ zouden zijn ($r = 50 \mu$, opp. per bel is dan $3.1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$):

Het beloppervlak $A = 4\pi r^2 \cdot \text{aantal bellen (n}_{\text{bel}})$.

De holdup aan waterstof $h = \# \text{ m}^3 H_2 \text{ per m}^3 \text{ reactorvolume} = (4/3)\pi r^3 \cdot n_{\text{bel}} = (4/3)\pi r^3 \cdot A / (4\pi r^2) = h = A \cdot r / 3 = 170 [\text{m}^2] \cdot r [\text{m}] / 3 \approx 60r [\text{m}^3] = 3 \text{ normaal-liter (per m}^3 \text{ reactorvolume)}$. (n_{bel} is dan $5.4 \cdot 10^9$). NB bij 30 μ bellen is $h = 0.9 \text{ L per m}^3$, $n_{\text{bel}} = 3 \cdot 10^9$.

Deze tussenuitkomst moet nog worden gecorrigeerd voor het feit dat er een bellendistributie is, en voor het door oppervlakte actieve stoffen vertraagde oplossen.

Bij een bellendistributie moet het derde moment van de verdeling genomen worden. Die verdeling is te berekenen (later).

Oplossnelheid van 1 bel met doorsnede 100 micron

Als de diffusiegrenslaag d door de vloeistof gelijk is en blijft aan 55 micron, bedraagt bij een afmeting r van een bel de transportsnelheid Rate (in mol per seconde per m^2) van waterstof naar de vloeistof $\text{Rate} = D (\Delta c_{H_2}) / d = (\text{onder de aannames}) 5 \cdot 10^{-9} [\text{m}^2/\text{s}] \cdot 0.4 [\text{mol}/\text{m}^3] / 55 \cdot 10^{-6} [\text{m}] = 3.6 \cdot 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dit leidt tot een afname van de hoeveelheid waterstof in de bel van

$\text{Rate} \cdot 4\pi r^2 \text{ mol/s (= } 3.6 \cdot 10^{-5} \cdot 4\pi r^2 \text{ mol s}^{-1})$, hetgeen weer leidt tot een afname van r door een veranderend volume (een volume afname ΔV van $3.6 \cdot 10^{-5} [\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}] \cdot 4\pi r^2 [\text{m}^2] \cdot 22 \cdot 10^{-3} [\text{m}^3/\text{mol}] \text{ m}^3/\text{s} = 2.5 \text{E-14 m}^3/\text{s}$).

Volume bolschil ΔV met dikte Δr bedraagt $\Delta V = 4\pi r^2 \cdot \Delta r$. Door dit volume gelijk te stellen aan de hierboven berekende volume afname komt er uit dat $\Delta r = 0.8$ micron per seconde. Stel dat de oppervlakte actieve stoffen het transport hinderen, dan wordt dat naar schatting 0.15 micron/s.

Uiteraard wordt dan het vereiste totaal oppervlak ook groter (ca 900 m^2).

Oplossnelheid van krimpende bel

Aanemende dat de grenslaag gelijk is aan de straal r van de bel, dan komt theoretisch de oplostijd korter uit. $Sh=2= k.L/D$, $L=$ diameter bel. $k= 2D/L$. rate $= k.A= 2DA/L = 4\pi r^2 \cdot D^*/r$.

Echter, conservatief nemen we aan dat over het hele traject de laagste (begin)snelheid van toepassing is. Experimentele studies (bv Xiaogan Lian et al., Nanotechnology **18** (2007) 25303) voor luchtbellen laten ook een nagenoeg lineair verloop zien, voor lucht van ca 10 micron per seconde [check of geometrie vergelijkbaar is].

Oplossnelheid van een populatie bellen

Het totaal beschikbare oppervlak van een bel wordt kleiner naarmate de bel oplost. Hier gaat het uitmaken of a) we een lineair verloop van de straal van de bel in de tijd aannemen zoals uit de berekening hierboven komt, in ieder geval over het grootste deel van het traject (zoals in de experimentele studie hierboven), of b) aanhouden dat $Sh = 2$ (wat ook nog de aanname inhoudt dat de vrije convectie geen rol speelt).

- Als de bel lineair afneemt in straal in de tijd, is de gemiddelde afmeting (doorsnede) niet 100 maar 50 μ , met een oppervlak per bel dat viermaal zo klein is. Voor 30 μ bellen is dit 15 μ .
- Als $Sh = 2$. dan is de oplossnelheid (mol per sec voor 1 bel)= rate = $k (c_{H_2} - c_{H_2}^{oplossing})$ (mol H_2 per sec per m^2) * opp = $(D/r) \cdot \Delta c_{H_2} \cdot 4 \pi r^2 = (1E-9/r) \cdot 0.4 [mol/m^3] \cdot 4 \pi r^2$ (NB hier nemen we meteen de door oppervlakte actieve stoffen vijfmaal verlaagde diffusiecoëfficiënt mee)= $5E-10 \cdot r$ [mol per seconde per bel met straal r].

Maximaal toegestane belgrootte

Conservatief aannemende dat de lineaire oplossnelheid altijd 0.15 μ per seconde bedraagt, zal de beldiameter hoogstens 30 μ mogen zijn willen ze in 100 seconden oplossen. Voor 330 seconden is dit 100 μ .

C. Het genereren van microbellen.

Vereiste bellengeneratiesnelheid

We gaan hier uit van een vereiste oppervlak van 900 m^2 , en een initiele beldiameter (l_{max}) van 100 μ (resp. 30 μ). De bellenvormingssnelheid is B (# bellen per m^3 per seconde).

Bij een constante lineaire oplossnelheid v_{oplos} van 0.15 μ/s neemt de diameter d met 0.3 μ/s af.

In een systeem waarbij geen vloeistof de reactor verlaat, en de waterstofconsumptie door de microorganismen door het oplossen van bellen wordt gecompenseerd (steady state), kan de populatiedichtheid n [m^{-4}] als functie van de beldiameter ($n(d)$; # bellen per m^3 per m), belvormingssnelheid B (# bellen per seconde per m^3 vloeistof), belvormingsafmeting d_{max} en

oplostijd van een bel t ($= l_{max} / (2 \cdot v_{oplos})$), worden beschreven als $n(l) = B \cdot l / l_{max}$,

voor $l \leq l_{max}$

Het totale aantal bellen in stationaire toestand N (nulde moment) is dan

$$N = \int_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \frac{B \cdot \tau}{\ell_{\max}} d\ell = B \square$$

$$A = 900 \text{ m}^2 = \int_{\ell=0}^{\ell_{\max}} 4\pi \left(\frac{\ell}{2}\right)^2 \tau \frac{B}{\ell_{\max}} d\ell = \pi \frac{1}{3} \ell_{\max}^2 \tau B = 3.55 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot B \text{ [voor 100 mu]; } 9.42 \text{E-8 m}^2 \cdot B \text{ [voor 30 mu]}, \text{ dus } B = 2.58 \cdot 10^8 \text{ bellen/s [voor 100 mu]; } B = 9.55 \cdot 10^9 \text{ bellen/s [voor 30 mu]}. \text{ De holdup } h = \text{totaal belvolume} =$$

$$V = \int_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \text{volumebel}(\ell) n(\ell) d\ell = \int_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\ell}{2}\right)^3 \tau B / \ell_{\max} d\ell = \int_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\ell}{2}\right)^3 \frac{\ell_{\max}}{2v_{\text{oplos}} \ell_{\max}} B d\ell$$

$$= (4/3) \cdot \pi \cdot (1/8) \cdot (1/4) \cdot (\ell_{\max})^4 \cdot (1/(2 \cdot 0.15 \text{E-6})) \cdot B \text{ is dan gelijk aan } 4.36 \text{E-11} \cdot B = 11.3 \text{ L [voor 100 mu]}. \text{ Voor 30 mu bellen: } 3.53 \text{E-15} \cdot B = V = 3.37 \text{E-5 m}^3. 4.36 \text{E-7} \cdot B = 1.77 \cdot 10^{-13} B = 1.7 \text{E-3 m}^3 [\text{Normaal m}^3 \text{ H}_2]/\text{m}^3 [\text{voor 30 mu}].$$

(check: Volume van 1 bel met doorsnede 30 mu = 1.4E-14 m³. Per etmaal is nodig 1 kg H₂ = 500 mol = 11 Nm³ = 7.8E14 bellen = 9E9 bellen/s. Matcht.)

Energie

De energiebijdrage van het generen van de bel kan laag zijn doordat de bel bij de electrolyse al op druk is. Dan wordt deze opgebracht door de elektrische energie, vrijwel gelijk aan het thermodynamische minimum. Bij 10 bar is dit voor 1 m³ = integraal p*V = 1.3 MJ, dat is voor de benodigde 10 m³ ca 25 MJ per dag (7 kWh). Dit kan veel lager, het theoretisch minimum volgt uit de oppervlaktespanning.

Bij een oppervlakte spanning van stel 70 mN/m = 70 mJ/m² is dit gelijk aan #bellen per seconde * beginoppervlak per bel van 30 mu = 9E9 * 2.83E-9 = 25 m²/s = 1.78 Watt = 1.54E5 J = 0.43 kWh/dag.

M.a.w. de bellen kunnen theoretisch bij veel lagere druk dan 10 bar worden geproduceerd.

"Fantastic properties of microbubbles", Masayoshi Takahashi beschrijft ook een apparaat om microbellen te genereren.

D. Bijbehorend reactorontwerp.

Het streven is dan naar een reactor waarbij het een paar minuten duurt voordat de vloeistof waarin de waterstof wordt gebracht in contact komt met evt bovenruimte.

Checken of contact met andere microbellen van zuurstof ook een issue is.

De stijgsnelheid van 100 mu bellen is ca 0.5 cm/s. Zonder axiale dispersie is dan een hoogte van 500 cm voldoende om de bellen geheel op te lossen. Een pijp van 20 cm doorsnede, met een flow van 2 L per seconde voldoet hieraan.

Nog te verwerken: voor 3 mu bel is de druk 1 bar hoger (lucht, zal voor waterstof niet veel anders zijn).
massaoverdracht zuurstof koreaans artikel (belgrootte niet genoemd).

references

V.G. Levich, physiochemical hydrodynamics, translation 1962, Prentice Hall., section 81, p. 434-436.: due to surface active compounds, the microbubbles behave exactly like solid spheres, internal gas movement does not contribute.

Bijlage III Analyserapporten SCP



nutrilab

Analyserapport

(Voorrapportage)

Order-nr : 582182

Barentz Animal Nutritional
T.a.v. Dhr. P. Sengers
Postbus 243
7000 AE DOETINCHEM

Omschrijving	: BOTEZUUR PIP CYCLOON 214X	Monsternamedatum	: 30-09-2017
Ontvangstdatum	: 01-11-2017	Monsternummer	: 30-09-2017
Rapportdatum	: 16-11-2017	Monstertemperatuur	: Kamertemperatuur
Monsternummer	:	Monsterconditie	: Monster en verpakking intact
Verpakking	: Plastic zakje		
Verzegeld	: N		

Bepaling	Resultaat
Algemeen	
I 52 Rauw Eiwit (Dumas, N x 6,25)	26,1 %
Eiwitkwaliteit	
I 70 Pepsine verteerbaar eiwit (pepsine/HCl)	18,7 %
Metalen & Mineralen	
I 6011 Natrium (Na) (ICP-OES; A6000)	9.400 mg/kg
I 6012 Magnesium (Mg) (ICP-OES; A6000)	10.300 mg/kg
I 6015 Fosfor (P) (ICP-OES; A6000)	26.000 mg/kg
I 6019 Kalium (K) (ICP-OES; A6000)	1.480 mg/kg
I 6020 Calcium (Ca) (ICP-OES; A6000)	208.000 mg/kg
I 6029 Koper (Cu) (ICP-OES; A6000)	9,2 mg/kg
I 6030 Zink (Zn) (ICP-OES; A6000)	36 mg/kg
E 6033 Arseen (As) (ICP-MS)	0,391 mg/kg
E 6034 Selenium (Se)	
I 6048 Cadmium (Cd) (ICP-OES; A6000)	< 0,15 mg/kg
E 6080 Kwik (Hg) (Hg analyse)	< 0,005 mg/kg
I 6182 Lood (Pb) (ICP-OES; A6000)	< 0,2 mg/kg
Aminozuren	
E 700 Alanine	2,10 %
E 701 Arginine	1,45 %
E 703 Asparaginezuur	2,31 %
E 704 Cystine	0,172 %
E 707 Glutaminezuur	2,38 %
E 709 Glycine	1,44 %
E 710 Histidine	0,425 %
E 711 Isoleucine	1,04 %

Nutrilab bv
Postbus 7, 4284 ZG Rijswijk
Burgstraat 12, 4283 CG Giesdon
t. 0183 44 63 05
f. 0183 44 25 97

info@nutrilab.nl
www.nutrilab.nl
8vK 18114291
BTW NL002007654801

Pag. 1 / 2

De testkosten van de gebruikte reagentia zijn:

Q Analyse met ICP-accréditatie (ISO-17025)
I Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd
E Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd

Rapporteerster (E): verzorgt alle voorgaande verdere



nutrilab

Analyserapport

(Voorrapportage)

Order nr : 582182

E 712	Leucine	1,91	%
E 713	Lysine	1,39	%
E 714	Methionine	0,525	%
E 715	Phenylalanine	1,09	%
E 716	Proline	0,938	%
E 717	Serine	0,888	%
E 718	Threonine	1,11	%
E 719	Tryptophan	0,423	%
E 720	Tyrosine	0,910	%
E 721	Valine	1,51	%
Overig onderzoek			
I 98	Non Protein Nitrogen (NPN)	0,9	%

De analyseresultaten hebben alleen betrekking op het monster. Nucleon informatie over toegepaste methoden is te verkrijgen bij de operationeel manager.

De interpretaties van analyseresultaten verschild op dit rapport raden buiten de scope van de accreditatie.

Met de eenheid % wordt in w/v bedoeld, tenzij anders vermeld.

De certificaat mag zonder schriftelijk toestemming van Nutrilab BV niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.



Operationeel manager : ing. T. Bongaard

Nutrilab bv
Postbus 7, 4284 ZG Rijswijk
Burgstraat 12, 4283 GG Giesse
t. (0183) 44 63 05
f. (0183) 44 25 97

info@nutrilab.nl
www.nutrilab.nl
Rvk 18114291
BTW NL002007654B01

Pag. 2 / 2

De bereik van de getoonde teksten is:

Q Analyse met RvK-accreditatie (ISO/IEC 17025)
I Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd
E Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd

Rapportversie 03: vervangt alle voorgaande versies



nutrilab

Analyserapport

(Voorrapportage)

Order nr : **582187**

Barentz Animal Nutritional
T.a.v. Dhr. P. Sengers
Postbus 243
7000 AE DOETINCHEM

Omschrijving	: PZP+ACCTIC ACID 1/10/2017 19/9/2017	Monsternamedatum	:
Ontvangstdatum	: 01-11-2017	Monstertemperatuur	: Kamertemperatuur
Rapportdatum	: 16-11-2017	Monsterconditie	: Monster en verpakking intact
Monsternummer	:	Monstertansport	: Post/Koerier
Verpakking	: Plastic zakje		
Verzegeld	: N		

Bepaling	Resultaat
Algemeen	
I 52 Ruw Eiwit (Dumas, N x 6,25)	31,3 %
Eiwitkwaliteit	
I 70 Pepsine verteerbaar eiwit (pepsine/HCl)	21,2 %
Metalen & Mineralen	
I 6011 Natrium (Na) (ICP-OES, A6000)	9.400 mg/kg
I 6012 Magnesium (Mg) (ICP-OES, A6000)	11.200 mg/kg
I 6015 Fosfor (P) (ICP-OES, A6000)	29.000 mg/kg
I 6019 Kalium (K) (ICP-OES, A6000)	1.640 mg/kg
I 6020 Calcium (Ca) (ICP-OES, A6000)	149.000 mg/kg
I 6029 Koper (Cu) (ICP-OES, A6000)	
I 6030 Zink (Zn) (ICP-OES, A6000)	
E 6033 Arseen (As) (ICP-MS)	0,345 mg/kg
E 6034 Selenium (Se)	
I 6048 Cadmium (Cd) (ICP-OES, A6000)	< 0,15 mg/kg
E 6080 Kwik (Hg) (Hg-analyser)	< 0,005 mg/kg
I 6182 Lood (Pb) (ICP-OES, A6000)	< 0,2 mg/kg
Aminozuren	
E 700 Alanine	2,77 %
E 701 Arginine	1,70 %
E 703 Asparaginezuur	2,92 %
E 704 Cystine	0,177 %
E 707 Glutaminezuur	3,23 %
E 709 Glycine	1,84 %
E 710 Histidine	0,459 %
E 711 Isoleucine	1,25 %

Nutrilab bv
 Postbus 7, 4284 ZG Rijswijk
 Burgstraat 12, 4283 GG Giesse
 t. (0183) 44 63 05
 f. (0183) 44 25 97

info@nutrilab.nl
www.nutrilab.nl
 Skk 18314291
 BTW NL002007654B01



Pag. 1 / 2

De betekenis van de getoonde tekens is:

Q Analyse met IFAccredite (ISO/IEC 17025)

I Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd

E Analyse door Nutrilab BV uitbesteed

Rapportversie 03: vervangt alle voorgaande versies



nutrilab

Analyserapport

(Voorrapportage)

Order nr : 582187

E 712	Leucine	2,43	%
E 713	Lysine	1,64	%
E 714	Methionine	0,706	%
E 715	Phenylalanine	1,29	%
E 716	Proline	1,22	%
E 717	Serine	1,11	%
E 718	Threonine	1,38	%
E 719	Tryptophan	0,580	%
E 720	Tyrosine	1,02	%
E 721	Valine	1,98	%
Overig onderzoek			
I 98	Non Protein Nitrogen (NPN)	1,1	%

De analyseresultaten hebben alleen betrekking op het monster. Nadere informatie over toegepaste methoden is te verkrijgen bij de operationeel manager.

De interpretatie van analyseresultaten verschild op dit rapport indien buiten de scope van de accreditatie.

Met de eenheid % wordt m/m% bedoeld, tenzij anders vermeld.

De certificaat mag zonder afbreukrijke toestemming van Nutrilab BV niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.



Operationeel manager : ing. T. Boogaard

Nutrilab bv
Postbus 7, 4284 ZG Rijswijk
Boegstraat 12, 4283 GG Giesse
t. (0183) 44 63 03
f. (0183) 44 25 97

info@nutrilab.nl
www.nutrilab.nl
RvK 18114291
BTW NL002807654B01

Pag. 2 / 2

De bijkanten van de geleukte selectie:

Q Analyse met ISO-accreditatie (ISO-IBC 17025)
I Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd
E Analyse door Nutrilab BV uitbesteed

Rapportversie 03: vervangt alle voorgaande versies



nutrilab

Analyserapport

Order-nr : **615390**

Barentz Animal Nutritional
T.a.v. Dhr. P. Sengers
Postbus 243
7000 AE DOETINCHEM

Omschrijving	: SAMPLE: POWER 2 PROTEIN	Monsternamedatum	:
Ontvangstdatum	: 11-04-2018	Monstertemperatuur	: Post/Koerier
Rapportdatum	: 18-05-2018	Monstertemperatuur	: Kamertemperatuur
Monsternummer	:	Monsterconditie	: Monster en verpakking intact
Verpakking	: Plastic pot		
Verzorgd	: N		

Bepaling	Resultaat
Algemeen	
I 52 Raw Eiwit (Dumas, N x 6,25)	Q 48,5 %
Eiwitkwaliteit	
I 68 In vitro omverteerbaar eiwit (Boisen and Fernandez, 1997)	14,9 %
Aminozuren	
E 700 Alanine	3,62 g/100g
E 701 Arginine	1,98 g/100g
E 703 Asparaginezuur	4,17 g/100g
E 704 Cystine	0,188 g/100g
E 707 Glutaminezuur	4,74 g/100g
E 709 Glycine	2,51 g/100g
E 710 Histidine	0,635 g/100g
E 711 Isoleucine	1,64 g/100g
E 712 Leucine	2,94 g/100g
E 713 Lysine	2,10 g/100g
E 714 Methionine	0,728 g/100g
E 715 Phenyl alanine	1,76 g/100g
E 716 Proline	1,46 g/100g
E 717 Serine	1,54 g/100g
E 718 Threonine	1,94 g/100g
E 719 Tryptophan	0,682 g/100g
E 720 Tyrosine	1,52 g/100g
E 721 Valine	2,35 g/100g
Overig onderzoek	
I 98 Non Protein Nitrogen (NPN)	0,5 %

Nutrilab bv
Postbus 7, 4284 ZG Rijswijk
Burgstraat 12, 4283 CG Giesse
t: (0183) 44 63 05
f: (0183) 44 25 97

info@nutrilab.nl
www.nutrilab.nl
KvK 18114291
BTW NL002007654B01



Pag. 1 / 2

De betekenis van de gebruikte letters is:

Q Analyse met Referentie (ISO/IEC 17025)
I Analyse door Nutrilab BV algemeen
E Analyse door Nutrilab BV uitvoerend

Rapportserie 03: vervangt alle voorgaande versies





nutrilab

Analyserapport

Order nr : 615390

Startdatum analyse: 16-04-2018, einddatum: 23-04-2018.

De analyseresultaten hebben alleen betrekking op het monster. Nadere informatie over toegepaste methoden is te verkrijgen bij de operationeel manager.

De interpretaties van analyseresultaten verschild op de rapport vallen buiten de scope van de accreditatie.

Met de eenheid % wordt m/m% bedoeld, tenzij anders vermeld.

De certificaat mag zonder schriftelijke toestemming van Nutrilab BV niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.



Operationeel manager : ing. T. Boogaard

Nutrilab bv
Postbus 7, 4284 ZG Rijswijk
Burgstraat 12, 4283 CG Giesse
t. (0183) 44 63 05
f. (0183) 44 25 97

info@nutrilab.nl
www.nutrilab.nl
RvK 18114291
BTW NL002007654B01



Pag. 2 / 2

De betekenis van de gebruikte tekens is:

- Q - Analyse met RvK-accreditatie (ISO/IEC 17025)
- I - Analyse door Nutrilab BV uitgevoerd
- E - Analyse door Nutrilab BV uitbesteed

Rapportversie 03: vervangt alle voorgaande versies



Bijlage IV Vergelijking SCP met andere SCP en conventionele eiwitten

(part of the output from Internship of Martin Spruijt at KWR, 2018)

Amino acid sequence

From a nutritional perspective, some amino acids are dietary necessities (indispensable amino acids), whereas others are not (dispensable amino acids). The amino acid composition is depicted in table IV.1 for MP/SCP protein obtained from natural gas, soybean meal, fishmeal and SCP/MP from methanol. These values are incorporated in table IV.4 and Figuur 5-4 in the main report. In this figure the comparison is depicted between the amino acid composition of SCP proteins and conventional proteins as well as the FAO/WHO recommendation for proteins. Most papers use the 1981 FAO/WHO recommendation (see table IV.2) [1]. The WHO however updated the amino acid requirements several times, and for the comparison in this research, the values from 2007 are used (see table IV.3) [2]

TABLE VI.1 – AMINO ACID COMPOSITION [3]

Table 2. Amino acid composition of bacterial meal grown on natural gas (BM) compared with soybean meal and fishmeal (from Schøyen 2007), and average data on bacterial protein grown on methanol* [g/16 g N $\pm$ standard deviation of free, hydrated amino acids].

	BM	Soybean meal	Fishmeal	Methanol-grown bacterial protein
Indispensable amino acids				
Arginine	6.3 $\pm$ 0.3	7.4 $\pm$ 0.5	6.2 $\pm$ 0.6	4.6
Histidine	2.2 $\pm$ 0.2	2.7 $\pm$ 0.2	2.5 $\pm$ 0.4	1.9
Isoleucine	4.4 $\pm$ 0.4	4.7 $\pm$ 0.3	4.7 $\pm$ 0.3	4.3
Leucine	7.5 $\pm$ 0.2	7.5 $\pm$ 0.5	7.9 $\pm$ 0.4	7.0
Lysine	5.6 $\pm$ 0.4	6.1 $\pm$ 0.3	8.2 $\pm$ 0.3	6.0
Methionine	2.6 $\pm$ 0.2	1.3 $\pm$ 0.1	3.0 $\pm$ 0.1	2.4
Phenylalanine	4.2 $\pm$ 0.2	5.0 $\pm$ 0.3	4.1 $\pm$ 0.2	4.1
Threonine	4.3 $\pm$ 0.3	3.9 $\pm$ 0.3	4.0 $\pm$ 0.6	4.6
Tryptophan	2.2 $\pm$ 0.8	1.4 [#]	0.9 [#]	0.9
Valine	5.8 $\pm$ 0.3	4.8 $\pm$ 0.4	5.3 $\pm$ 0.1	5.6
Dispensable amino acids				
Alanine	7.1 $\pm$ 0.4	4.2 $\pm$ 0.4	6.1 $\pm$ 0.1	7.1
Aspartic acid	8.5 $\pm$ 0.4	11.2 $\pm$ 0.7	9.9 $\pm$ 1.2	8.8
Cysteine + cystine	0.7 $\pm$ 0.1	1.5 $\pm$ 0.2	0.9 $\pm$ 0.2	0.7
Glutamic acid	10.6 $\pm$ 0.6	18.2 $\pm$ 1.4	12.6 $\pm$ 1.0	10.6
Glycine	4.9 $\pm$ 0.3	4.2 $\pm$ 0.3	6.0 $\pm$ 0.8	5.7
Proline	3.8 $\pm$ 0.3	5.0 $\pm$ 0.3	4.3 $\pm$ 0.6	2.9
Serine	3.6 $\pm$ 0.2	5.2 $\pm$ 0.3	4.1 $\pm$ 0.3	3.3
Tyrosine	3.6 $\pm$ 0.3	3.8 $\pm$ 0.3	3.2 $\pm$ 0.1	3.4

Notes: *Average data on PRUTEEN[®] (*Methylophilus methylotrophus*) from Gow et al. (1974), D'Mello et al. (1976), and Braude et al. (1977); [#]Standard deviation not available.

TABLE IV.2 – AMINO ACID COMPOSITION FAO/WHO IN 1981 [1]

Table 14. PROVISIONAL AMINO ACID SCORING PATTERNS

	FAO/WHO	NRC	INCAP
	mg/gm of protein		
Histidine	-	17	-
Isoleucine	40	42	27
Leucine	70	70	
Lysine	55	51	55
Methionine + cystine	35	26	24
Phenylalanine + tyrosine	60	73	
Threonine	40	35	32
Tryptophan	10	11	12
Valine	50	48	33

TABLE IV.3 – AMINO ACID REQUIREMENTS IN 2007

Summary of the adult indispensable amino acid requirements

Amino acid protein ^b	Present estimates		1985 FAO/WHO/UNU ^a	
	mg/kg per day	mg/g protein ^b	mg/kg per day	mg/g protein ^b
Histidine	10	15	8–12	15
Isoleucine	20	30	10	15
Leucine	39	59	14	21
Lysine	30	45	12	18
Methionine + cysteine	15	22	13	20
<i>Methionine</i>	10	16	–	–
<i>Cysteine</i>	4	6	–	–
Phenylalanine + tyrosine	25	38	14	21
Threonine	15	23	7	11
Tryptophan	4	6	3.5	5
Valine	26	39	10	15
Total indispensable amino acids	184	277	93.5	141

TABLE IV.4 – AMINO ACID COMPOSITION SCP AND CONVENTIONAL PROTEINS

g/100 g DM	Arg	His	Ile	Leu	Lys	Met	Phe	Thr	Trp	Val	Protein Content %
FAO/WHO standard	-	1,5	2	5,9	4,5	1,6	3	2,3	0,6	3,9	100
Methane SCP	6.3	2.2	4.4	7.5	5.6	2.6	4.2	4.3	2.2	5.8	73,4
Soy bean	7.4	2.7	4.7	7.5	6.1	1.3	5.0	3.9	1.4	4.8	100
Fishmeal	6.2	2.5	4.7	7.9	8.2	3.0	4.1	4.0	0.9	5.3	100
Pruteen	4.6	1.9	4.3	7.0	6.0	2.4	4.1	4.6	0.9	5.6	81,3
A. Niger [4]	-	-	3.75	6.8	4.5	0.35	5.7	-	-	4.36	100
Calysta [5]	4.38	1.8	3.36	5.49	4.56	1.98	3.29	3.29	1.57	4.48	70,6
Sulfuricurvum spp. (lab scale PtP) [6]	2.7	1.2	3.1	4.6	4.5	1.8	5.6	3.6	0.8	3.3	71
PtP pilotreactor [7]	1.7	0.459	1.25	2.43	1.64	0.706	1.29	1.38	0.58	1.98	26,1
Algae (Chlorella vulgaris) [8]	3,3	1,02	1,94	4,49	4,28	1,12	2,55	2,45	-	2,81	51
Quorn [9]	-	0,39	0,57	0,95	0,91	0,23	0,54	0,61	0,18	0,60	14,5
Insects (grasshoppers and locusts) [10]	6.0	1.9	4.2	8.7	5.5	1.8	10.3	3.1	0.6	5.1	61

References

- [1] *Amino acid scoring patterns*. **Harper, A.** 1981, Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/MEETING/004/M3013E/M3013E00.HTM>.
- [2] *Protein and amino acid requirements in human nutrition*. **World Health Organization.** 935, s.l. : United nations university, 2007, Vol. WHO technical report series.
- [3] *Evaluation of methane-utilising bacteria products as feed ingredients for monogastric animals*. **Øverland, M., Tauson, A., Shearer, K., Skrede, A.** 2010, Archives of Animal Nutrition, pp. 171-189.

- [4] *Value-added food: Single cell protein*. **Ravindra, A.P.** 459-479, s.l. : Biotechnology advances, 2000, Vol. 18.
- [5] *Single Cell Protein: A sustainable approach to meeting the growing protein demand*. **Inc., Calysta**. 2, s.l. : Aquafeed: advances in processing & formulation, n.d., Vol. 7.
- [6] *Exploring protein production by hydrogen-oxidizing microbiomes*. **Matassa, S.** s.l. : PhD thesis, Ghent University, Belgium, 2016.
- [7] *Analyserapport*. **Nutrilab**. 2017.
- [8] *Micro-algae*. **Becker, E.W.** 207-210, s.l. : Biotechnology Advances, 2007, Vol. 25.
- [9] *Quorn™ and mycoprotein nutrition*. **Ltd, Marlow Foods**. s.l. : http://www.mycoprotein.org/assets/ALFT_V2_2.pdf, 2008.
- [10] *Insect cells for human food*. **Verker, M.C., Tramper, J., van Trijp, J.C.M., Martens, D.E.** 198-202, s.l. : Biotechnology Advances , 2007, Vol. 25.

Bijlage V Uitgangspunten LCA-berekening PtP-concept

Algemeen			
* Gebaseerd op de casus RWZI Hengelo			
* Gebaseerd op resultaten uit het onderzoek met de NAR pilot			
* Gebaseerd op resultaten uit het onderzoek met de Power-to-protein pilot met een aantal uitzonderingen			
AMMONIAKTERUGWINNING			
NAR Nijhuis			
voorverwarmer/CO ₂ -stripper (+ kleine scrubber)/loogdosering/ammoniakstripper/zuurdosering/ammoniakscrubber			
zie schema rechts			
debiet digestaat		m ³ /uur	28,8 businesscasus Hengelo
NH ₄ -N influent concentration		kg N/m ³	1,64 uit pilotonderzoek NAR
NH ₄ -N effluent concentration		kg N/m ³	0,23 uit pilotonderzoek NAR
NH ₄ -N removal efficiency with caustic		%	86% uit pilotonderzoek NAR
Efficiency scrubber		%	100%
recovered N		kg N/uur	40,6 berekend
recovered Ammonium		kg NH ₄ /uur	52,2 berekend
Berekening besparing op energieverbruik in RWZI/ afhankelijk van klassieke nitrificatie/denitrificatie of Anammox			
Energieverbruik voor omzetting door nitrificatie/denitri		MJ/kg NH ₄ -N	45,0 kental Avecom studie 1
Energieverbruik voor omzetting door Anammox		MJ/kg NH ₄ -N	9,0 kental Avecom studie 1
Vermeden energieverbruik nitr/denitr		kWh/uur	507,6 berekend vermeden energieverbruik
Vermeden energieverbruik nitr/denitr		kWh/kg SCP	1,91 berekend vermeden energieverbruik/ zou ik gebruiken in LCA
Vermeden energieverbruik Anammox		kWh/uur	101,5 berekend vermeden energieverbruik
Vermeden energieverbruik Anammox		kWh/kg SCP	0,38 berekend vermeden energieverbruik
CO ₂ influent stripper		kg CO ₂ /m ³	4,843 uit pilotonderzoek NAR
CO ₂ effluent stripper		kg CO ₂ /m ³	1,987 uit pilotonderzoek NAR
CO ₂ emissie vanuit CO ₂ -stripper		kg CO ₂ /uur	82,253 berekend, dit is CO ₂ uit biologisch vergistingsproces (kort cyclisch??)
CO ₂ emissie vanuit CO ₂ -stripper		kg CO ₂ /kg SCP	0,31 berekend
recovered Ammoniasulphate		kg/uur	191,2 berekend
Concentration ammonium sulphate		%	37 uit pilotonderzoek NAR
N concentration in ammonium sulphate		kg/m ³	86 uit pilotonderzoek NAR
Acid consumption	Sulphuric acid 50%	l/m ³ digestaat	2,9 uit pilotonderzoek NAR
		l/uur	83,5 berekend
		l/kg SCP	0,31 berekend
Caustic consumption	NaOH 33%	l/m ³ digestaat	3,3 uit pilotonderzoek NAR
		l/uur	95,0 berekend
		l/kg SCP	0,36 berekend
Energy consumption	overall electricity	kWh/m ³	1,9 uit berekening Nijhuis
		kWh/uur	54,4 berekend
		kWh/kg SCP	0,20 berekend
Heat consumption	With heat recovery NAR	kWh/kg N	19,3 uit berekening Nijhuis
		kWh/kg SCP	2,94 berekend
		kWh/m ³	27,2 berekend
Mw NH ₄ =		18,04	
Mw (NH ₄) ₂ SO ₄		132,14	

EIWITPRODUCTIE			
Power to Protein plant			
Reactor			
recovered ammonium from NAR		kg NH ₄ /uur	52,2 berekend, zie boven
productie eiwit		kg SCP/uur	266 stoichiometrie
waterstof benodigd		kg H ₂ /uur	209 stoichiometrie
zuurstof benodigd		kg O ₂ /uur	779 stoichiometrie
		kg O ₂ /kg N	19 berekend
kooldioxide benodigd uit externe bron		kg CO ₂ /uur	881 stoichiometrie
		kg CO ₂ /kg SCP	3,31 berekend
ruw eiwit gehalte		%	70% metingen Horstermeer
CDW productie		kg CDW/uur	381 berekend
productie	meting Avecom zomer 2017	kg CDW/m ³ /dag	0,7
	doelstelling voor de pilot	kg CDW/m ³ /dag	2 Hiermee is de LCA uitgevoerd/ hoewel niet bereikt in de pilot
	streven voor commercialisatie	kg CDW/m ³ /dag	10
	Kies hier:		
benodigd reactorvolume o.b.v.	doelstelling voor de pilot	m ³	4566 berekend
Recirculatiepomp			
recirculatiepomp	Recirculatie reactor inhoud	X/hr	10
	Capacity pump	m ³ /h	45665,0
	Opvoerhoogte pomp	mwk	1
	vermogen	kW	169,1
	continu in bedrijf	kWh/jaar	1481575
		kWh/kg SCP	0,635
Elektrolyser			
waterstof efficiëntie reactor		%	80,0% uit labopstelling
benodigde productie elektrolysecel		kg H ₂ /uur	261,7 berekend, voldoende voordruk
		kg O ₂ /uur	2077,0 berekend, voldoende voordruk, voldoende beschikbaar
efficiëntie elektrolyse		%	80,0% Avecom info
demiwaterverbruik		kg H ₂ O/uur	2923,4
		kg H ₂ O/kg SCP	11,0
waterstof productie elektrolysecel		Nm ³ H ₂ /uur	3112,0 berekend
specifiek energieverbruik elektrolyser		kWh/Nm ³ H ₂	4,8 Avecom info + koeling/ rapportage fase 1: 142 MJ/kg H₂ = 3,3 kWh/kg H₂
elektriciteitsverbruik elektrolyser		kWh/uur	14937 Uitgangspunt hier is het gebruik van wind of zonne-energie
		kWh/kg SCP	56,1 Hier ook aan vasthouden
Downstream processing			
mechanisch ontwateren met schotelcentrifuge of schroefpers			
sproeidrogen			
van 0,5 % ds via 10 - 15 % ds (na ontwateren) tot 90 % ds (na sproeidrogen)			
slib uit reactor		% droge stof	0,80%
slib na mechanische ontwatering		% droge stof	10,00%
slib na sproeidrogen		% droge stof	90,00%
CDW productie		kg CDW/uur	380,5 zie hierboven
naar mechanisch ontwatering		kg 0,8 % slib/uur	47568
naar sproeidroger		kg 10 % slib/uur	3805
SCP productie		kg 90% slib/uur	423
		kg SCP/kg N	10,4
energieverbruik mechanisch ontwatering		kWh/1000 kg 0,8 % slib	0,125 Avecom info
		kWh/uur	5,95
		kWh/kg SCP	0,02
energieverbruik sproeidrogen		kg stoom/kg water	1,4 kan 1,1 bij sproeidrogers die restwarmte hergebruiken
		kg stoom/uur	4736
		kg stoom/kg SCP	17,8
		kWh/kg stoom	0,75 vuistregel voor lage druk stoom
		kWh/uur	3552
		kWh/kg SCP	13,3

Bijlage VI Uitgangspunten LCA-berekening conventionele eiwitten

Detailinformatie iers rundvlees (uit Agri Footprint (2017))

Table 6-18: Inventory for Irish beef production

Products			
Beef cattle for slaughter, at beef farm/IE	kg	11,700	Total live weight to slaughter per year: 15 x 2-year old calves @647 kg live weight + 3 x cows @665 kg
Resources			
Water, unspecified natural origin/m3	m ³	1,609.38	Water for drinking
Materials/fuels			
Grass, grazed in pasture/IE	kg	618,996.5	
Grass silage, at beef farm/IE	kg	122,137	
Compound feed beef cattle/IE	kg	32,803	
Energy, from diesel burned in machinery/RER	MJ	68,043.7	
Transport, truck >20t, EURO4, 80%LF, default/GLO	tkm	3,280.3	Transport of feed from feed compound plant to farm
Electricity/heat			
Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, < 1kV NL S	kWh	3,555	
Emissions to air			
Methane, biogenic	kg	2,279.68	CH ₄ emissions due to enteric fermentation
Methane, biogenic	kg	642.54	CH ₄ emissions due to manure management in stable
Dinitrogen monoxide	kg	4.25	direct N ₂ O emissions from the stable
Dinitrogen monoxide	kg	5.95	indirect N ₂ O emissions from the stable
Ammonia	kg	459.69	NH ₃ emissions from the stable
Particulates, < 10 um	g	10,200	

Detailinformatie Kip (uit Agri Footprint (2017))

Table 6-25: Key parameters in the system for breeding of laying hens (<17 weeks). a.p. = animal place. Based on (Wageningen UR, 2013).

Parameter	Unit	Value	Comment
Production period	Days	119	-
Empty period	Days	21	-
Period per round	Days	140	-
Animal places per year	Days	2,607	-
Energy use	Electricity	kWh/ laying hen	0.45
	Natural gas	kWh/ laying hen	0.15
Water use	dm ³ / laying hen	80	-
Feed input (Laying hens <17 weeks)	Kg/laying hen	5.25	0.3 kg startfeed (0-2.5 weeks)
			1.35 kg breeding feed1 (2.5-9 weeks)
			3.6 kg breeding feed2 (9-17 weeks)
Production (Laying hens <17 weeks)	animals/a.p./year	2.60	-

Detailinformatie Varken (uit Agri Footprint (2017))

Table 6-20: Key parameters of the sow-piglet system. Values based on 1 sow*year. a.p.s. = average present sow; a.p.p. = average present pig

Parameter	Unit	Value	Source	Comment
Piglets per sow to pig fattening	pigs/year	27.6	(CBS, 2011)	-
Average weight of piglets to fattening	Kg	25.1	(CBS, 2011) (Wageningen UR, 2013)	-
Sow replacement	%	41	(Hoste, 2013)	-
Energy use	Electricity	kWh/ a.p.s./ year	150	(Wageningen UR, 2013)
	Natural gas	m ³ / a.p.s./ year	55.77	(Wageningen UR, 2013)
Water use	m ³ / a.p.s./ year	7.5	(Wageningen UR, 2013)	€30, á €0.2/kWh €29, á €0.52/m ³ , is listed as a fuel and assumed to be natural gas. Since average price of water is 0.79€/m ³ per a.p.s.
Sow weight to slaughter	Live weight	kg/sow	230	(Wageningen UR, 2013)
	Slaughter weight	kg/sow	167	(Wageningen UR, 2013)
Feed input	Sows	kg/ a.p.s.	1,169	(CBS, 2011)
	Piglets	kg/ a.p.s.	783	(CBS, 2011)
Market price	Sows	€/kg live weight	0.95	(Wageningen UR, 2013)
	Piglets	€/pig	40.80	(Wageningen UR, 2013)

Detailinformatie vis (van <http://lcafood.dk/>)

Impact category	Unit	Fresh cod fish	
		Ex harbor	Ex retail
Global warming	g CO ₂ -eq.	1200	1200
Acidification	g SO ₂ -eq.	14	15
Nutrient enrichment	g NO ₃ -eq.	24	25
Photochemical smog	g ethene eq.	1.7	1.8
Land use	m ² year	not relevant	not relevant

Bijlage VII Nadere analyse resultaat LCA-studie

Bij een LCA-analyse wordt van alle processen en stoffen berekend wat de totale impact op het milieu is, door eerst de impact op verschillende “midpoints” te berekenen. Hierbij wordt ook meegenomen wat de impact is van bv. het winnen en transporteren van olie, of, bij windenergie, de impact van alle materialen die nodig zijn voor de bouw van een windmolen. Deze gegevens worden verzameld in een uitgebreide database (EcoInvent), waarin alle beschikbare data over een proces of materiaal zijn verwerkt.

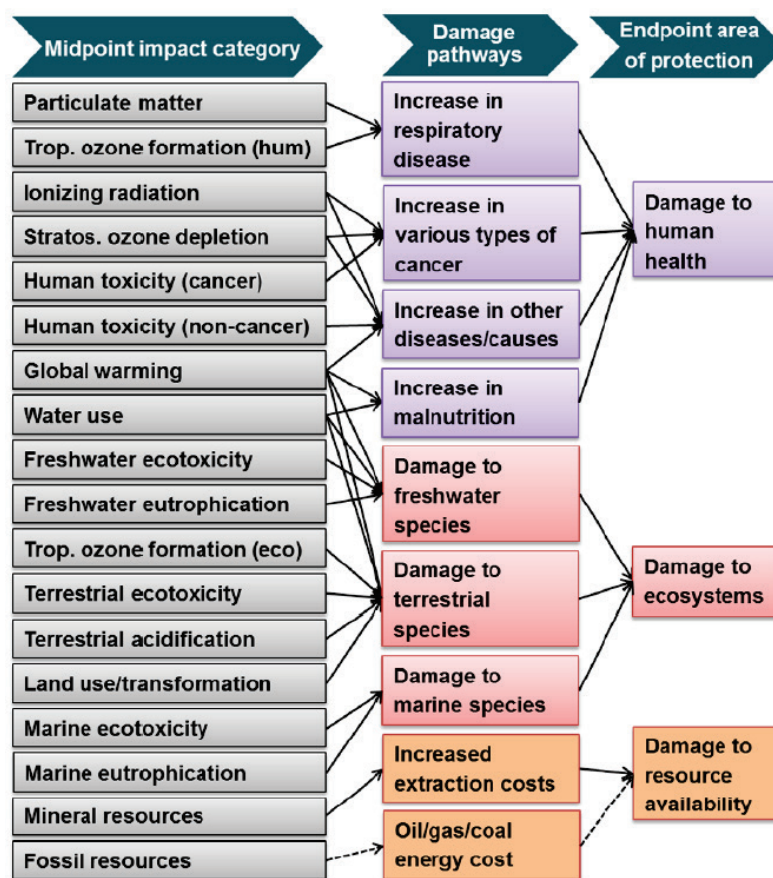
De “midpoints” van een LCA-analyse zijn:

1. Klimaatverandering, volksgezondheid: klimaatverandering kan negatieve effecten hebben op de gezondheid van ecosystemen, mensen en materieel welbehagen. Klimaatverandering is rechtstreeks gerelateerd aan de uitstoot van broeikasgassen.
2. Ozon uitputting: Aangezien de hoeveelheid ozon in de stratosfeer afneemt, zal een groter deel van de UV-B straling het aardoppervlak bereiken. Dit kan invloed hebben op de gezondheid van mensen en dieren, op ecosystemen op land en in water, op biochemische kringlopen en op materialen. Deze parameter is afhankelijk van uitstoot en werkt op wereldwijde schaal.
3. Menselijke toxiciteit: de invloed van toxische stoffen op de menselijke omgeving. Hierin zijn gezondheidsrisico's door werkgerelateerde blootstelling niet meegenomen.
4. Fotochemische oxidatorvorming: de vorming van reactieve stoffen, voornamelijk ozon, die de gezondheid van mensen en ecosystemen schaden en de oogst kunnen beschadigen (“summer smog”).
5. Deeltjesvorming
6. Ioniserende straling
7. Klimaatverandering ecosystemen
8. Verzurend land: verzurende stoffen hebben diverse effecten op de bodem, het grondwater, oppervlaktewater, organismen, ecosystemen en materialen (gebouwen).
9. Zoetwater eutrofiëring: impact als gevolg van excessieve concentraties voedingsstoffen in het milieu, veroorzaakt door uitstoot naar lucht, water en bodem.
10. Land ecotoxiciteit: de impact op ecosystemen op land als gevolg van uitstoot van toxische stoffen naar lucht, water en bodem.
11. Zoetwater ecotoxiciteit: de impact op zoetwater ecosystemen als gevolg van uitstoot van toxische stoffen naar lucht, water en bodem.
12. Zeewater ecotoxiciteit. Idem als voor zoetwater, maar dan voor zeewater.
13. Agrarisch landgebruik
14. Stedelijk landgebruik
15. Natuurlijke landtransformatie
16. Uitputting metalen: gebruik van metalen
17. Uitputting fossiele brandstoffen: gebruik van fossiele brandstoffen.

De parameters 1 t/m 6 worden in de eindpuntanalyse samengevat tot de parameter “volksgezondheid” (uitgedrukt in DALY: disability adjusted life years). De relatie tussen “midpoints”, zoals hierboven weergegeven, en de verschillende eindpunten (volksgezondheid, ecosystemen en gebruik grondstoffen) in een LCA-analyse is weergegeven in figuur 1.

In tabel 1 zijn de waarden van de midpoints, berekend in dit project, weergegeven. De rood gemarkeerde midpoints zijn de midpoints waarop het Power to Protein concept het “slechtste” scoort in vergelijking tot de andere eiwitbronnen: rundvlees, kip, kabeljauw, varken en sojabonen. Dit wil overigens niet zeggen dat het PtP concept dus in absolute zin slecht scoort, alleen dat het op dit midpoint in vergelijking met de andere eiwitbronnen de hoogste impact geeft. De onderlinge verschillen kunnen dan nog steeds klein zijn, en de absolute impact op dit midpoint kan ook klein zijn in vergelijking tot de impact op andere midpoints.

De voornaamste impact van het PtP concept wordt veroorzaakt door het energieverbruik, zoals blijkt uit Figuur 6-5. Voor de berekening van de energie is uitgegaan van off-shore windenergie. De impact van windmolens wordt voor een groot deel veroorzaakt door het gebruik van beton en metalen voor de bouw van de windmolens. Dat verklaart de relatief hoge bijdrage van bijvoorbeeld “uitputting van metalen”. Het produceren van dergelijke metalen legt beslag op stedelijk landgebruik, een midpoint waarop de andere systemen nauwelijks invloed op hebben. Daarentegen zullen PtP en kabeljauw juist geen beslag leggen op landbouwgronden. Windmolens kunnen echter wel een invloed hebben op het milieu in hun omgeving. Zo kunnen windmolens op zee meer invloed hebben op ecosystemen op zee dan het gebruik van fossiele brandstoffen. Dat wil dan niet automatisch zeggen dat off-shore windenergie slechter scoort in het totale plaatje, maar mogelijk wel op dit specifieke midpoint.



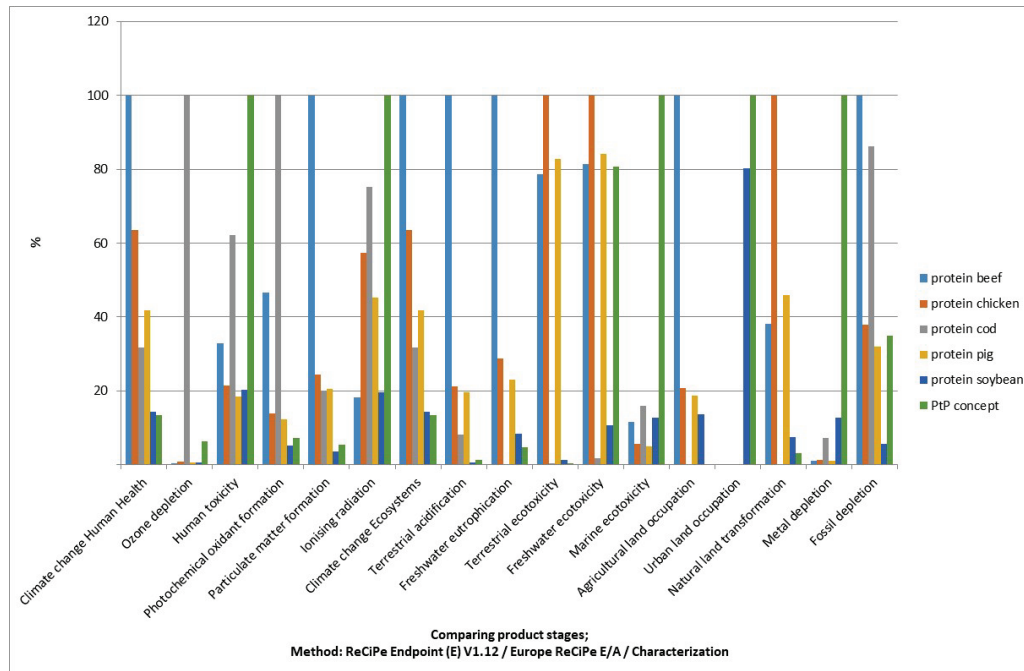
FIGUUR VII.1: RELATIES TUSSEN MIDPOINTS EN EINDPUNTEN IN EEN LCA-ANALYSE ((PRÉ 2018)

TABLE VII.1 BEREKENDE WAARDEN VOOR DE MIDPOINTS VOOR SCP EN VIJF CONVENTIONELE EIWTBRONNEN

Veld	eenheid	rundvlees	kip	kabeljauw	varken	sojabonen	PtP concept
Klimaat-verandering volks- gezondheid	DALY	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$9,61 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$4,34 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$
Ozon uitputting	DALY	$2,53 \cdot 10^{-11}$	$7,92 \cdot 10^{-11}$	$8,88 \cdot 10^{-9}$	$6,21 \cdot 10^{-11}$	$5,38 \cdot 10^{-11}$	$6,54 \cdot 10^{-10}$
Menselijke toxiciteit	DALY	$2,71 \cdot 10^{-6}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$
Foto-chemische oxidator-vorming	DALY	$8,63 \cdot 10^{-10}$	$2,55 \cdot 10^{-10}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	$2,27 \cdot 10^{-10}$	$9,62 \cdot 10^{-11}$	$2,56 \cdot 10^{-10}$
Deeltjes-vorming	DALY	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$3,02 \cdot 10^{-6}$	$2,48 \cdot 10^{-6}$	$2,54 \cdot 10^{-6}$	$4,45 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$
Ioniserende straling	DALY	$2,87 \cdot 10^{-10}$	$9,1 \cdot 10^{-10}$	$1,19 \cdot 10^{-9}$	$7,15 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$2,51 \cdot 10^{-9}$
Klimaat-verandering ecosystemen	soorten• jaar	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	$5,12 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$2,31 \cdot 10^{-8}$	$3,57 \cdot 10^{-8}$
Verzuring land	soorten• jaar	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$1,16 \cdot 10^{-9}$	$4,48 \cdot 10^{-10}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$1,38 \cdot 10^{-10}$
Zoetwater eutrofiëring	soorten• jaar	$2,14 \cdot 10^{-10}$	$6,15 \cdot 10^{-11}$	$2,16 \cdot 10^{-13}$	$4,94 \cdot 10^{-11}$	$1,81 \cdot 10^{-11}$	$3,64 \cdot 10^{-11}$
Land ecotoxiciteit	soorten• jaar	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$7,65 \cdot 10^{-11}$	$1,98 \cdot 10^{-8}$	$3,21 \cdot 10^{-10}$	$3,82 \cdot 10^{-10}$
Zoetwater ecotoxiciteit	soorten• jaar	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$2,36 \cdot 10^{-11}$	$4,19 \cdot 10^{-13}$	$1,99 \cdot 10^{-11}$	$2,53 \cdot 10^{-12}$	$2,26 \cdot 10^{-10}$
Zeewater ecotoxiciteit	soorten• jaar	$2,78 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-10}$	$3,84 \cdot 10^{-10}$	$1,18 \cdot 10^{-10}$	$3,06 \cdot 10^{-10}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$
Agrarisch landgebruik	soorten• jaar	$4,94 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$5,22 \cdot 10^{-10}$	$9,26 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$
Stedelijk landgebruik	soorten• jaar	x	x	x	x	$1,48 \cdot 10^{-10}$	$3,71 \cdot 10^{-10}$
Natuurlijke land-transformatie	soorten• jaar	$9,77 \cdot 10^{-8}$	$2,56 \cdot 10^{-7}$	x	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$1,92 \cdot 10^{-8}$	$1,47 \cdot 10^{-8}$
Uitputting metalen	\$	0,000113	0,000155	0,000811	0,000111	0,0014	0,0551
Uitputting fossiele brandstoffen	\$	0,174	0,0659	0,15	0,0556	0,00999	0,0936

Het programma Simapro geeft bij een vergelijking altijd de relatieve impact weer, waarbij de impact van het systeem dat het hoogste scoort automatisch op 100% wordt gesteld (zie figuur VII.2). Dit wil dus niet zeggen dat de impact dan dus echt erg hoog is, maar dat van alle vergeleken systemen het betreffende systeem relatief het hoogste scoort op dit midpoint. Om een indruk te krijgen van de totale impact van een systeem, zoals PtP, kan beter gekeken worden naar de impact op de verschillende eindpunten, waarbij deze impact is weergegeven in ecopunten. Om deze ecopunten te berekenen worden de scores van de midpoints opgeteld en geschaald. In dit systeem komt de impact van het PtP concept op volksgezondheid (zie figuur 6-4) vrijwel overeen met de impact van rundvlees op dit

eindpunt. Dit is berekend door alle impacts uitgedrukt in DALY's bij elkaar op te tellen, en die vervolgens te schalen naar ecopunten. Op een vergelijkbare manier is de impact op grondstoffen en ecosystemen berekend op basis van de data uit tabel 1.



FIGUUR VII.2: VERGELIJKING VAN MIDPOINTS VOOR RUNDVLEES, KIP, KABELJAUW, VARKEN, SOJABONEN EN SCP.

Bij de vergelijking van gezondheidsrisico's en risico's voor het milieu van de toepassing van windenergie, worden in de literatuur de volgende onderwerpen genoemd:

Wind power plants

Occupational hazards

- Accidents and illnesses connected with production and transportation of materials needed for windmill construction;
- Accidents and illnesses connected with construction of the power plant;
- Accidents and illnesses connected with maintenance of the power plant;
- Hazards connected with energy backup or storage systems (batteries or pumped storage).

Public hazards

- Effects of inhalation of pollutants released during production of materials needed for plant construction;
- Injuries and mortality connected with accidents in material transportation;
- Hazards connected with energy backup or storage systems.

Environmental impacts

- Global warming due to CO₂ released during material production and plant construction;
- Occupancy of land;
- Effects connected with energy backup or storage systems.

Occupational and public hazards and environmental impacts connected with production of energy necessary for material production and plant construction

Other impacts

- Noise;
- TV interference;
- Hazards to birds;
- Stroboscopic effects on human and animal sight.

Bron: IAEA (1999)

Gezondheidsrisico's bij windparken richten zich vooral ook op ongevallen bij de fabricage van de windmolens en bij het onderhoud daarvan in de praktijk. Daarnaast is er sprake van verontreiniging bij de bouw van de onderdelen van de windmolens.

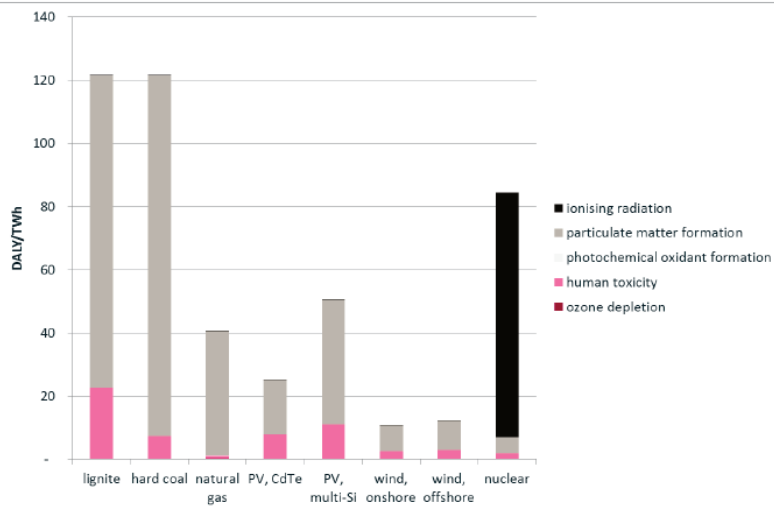
Frischknecht (2017) heeft de impact op de volksgezondheid van de energieproductie nader onderzocht voor de Belgische situatie. Onderstaande sheets uit zijn presentatie geven een idee van de effecten per energiesoort.

Results: environmental impacts ILCD 2011 per kWh electricity



impact category	unit	lignite	hard coal	natural gas	PV, CdTe	PV, multi-Si	wind, onshore	wind, offshore	nuclear
Climate change	g CO2 eq	1'219.22	1'092.27	537.12	28.64	62.37	10.97	14.02	7.68
Ozone depletion	µg CFC-11 eq	1.12	1.85	81.94	1.41	2.28	0.51	0.60	18.67
Human toxicity, cancer effects	nanoCTUh	6.08	1.32	0.59	0.74	1.15	2.37	2.48	0.60
Human toxicity, non-cancer effects	nanoCTUh	53.37	19.68	3.00	9.62	14.75	5.01	5.84	1.56
Particulate matter	mg PM2.5 eq	73.44	81.66	27.89	17.10	78.49	8.10	9.10	5.45
Ionizing radiation	Bq U235 eq	3.36	4.59	0.35	1.75	3.41	0.58	0.69	412.89
Ionizing radiation, accidents	Bq U235 eq								4306.39
Photochemical ozone formation	mg NMVOC eq	838.06	1'125.70	650.66	123.75	259.35	32.10	42.69	39.79
Acidification	molc H+ eq	1.42	1.69	0.61	0.25	0.60	0.06	0.07	0.07
Terrestrial eutrophication	molc N eq	3.38	4.48	1.90	0.44	0.90	0.11	0.14	0.14
Freshwater eutrophication	mg P eq	304.08	36.98	0.43	10.43	13.12	1.58	1.65	0.52
Marine eutrophication	mg N eq	307.55	390.84	173.06	38.45	82.31	11.32	14.90	15.50
Freshwater ecotoxicity	milliCTUe	144.42	46.56	8.39	101.95	122.81	31.03	33.07	26.64
Land use	g C deficit	-8.20	489.67	459.61	51.84	98.38	131.31	18.90	34.24
Water resource depletion	cm3 water eq	421.77	341.19	31.82	11.62	54.50	5.45	6.52	122.12
Mineral, fossil & ren resource depletion	mg Sb eq	0.22	0.26	0.13	19.99	33.28	0.62	0.89	4.69
Cumulative energy demand non renewable	MJ oil eq	12.76	12.68	9.26	0.44	0.83	0.16	0.19	12.64
Cumulative energy demand renewable	MJ oil eq	0.03	0.10	0.01	3.88	3.95	3.88	3.88	0.01
Nuclear waste	mm3 HAA eq	0.07	0.09	0.01	0.04	0.08	0.01	0.01	8.95

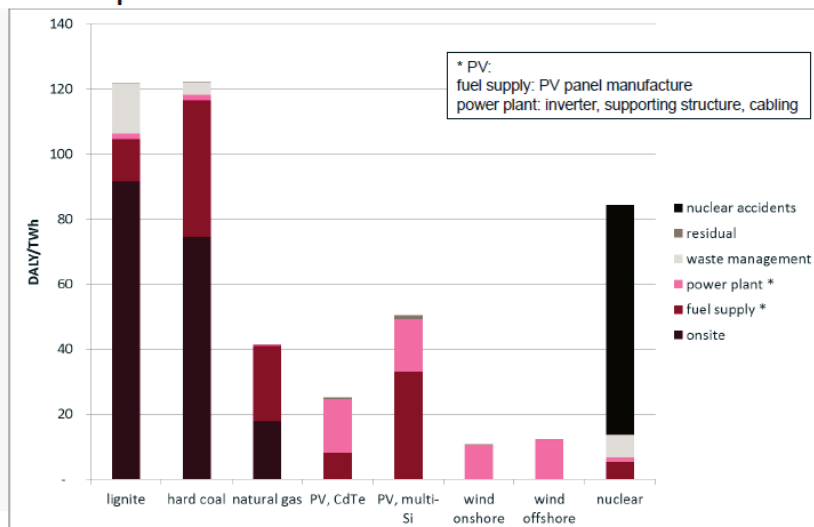
Human health impacts, the five impact sources



31. Mai 2017

18

Human health impacts, main phases



Conclusions



- Factor 10 between highest (hard coal) and lowest (onshore wind) human health impacts
- Power plant operation is most important for fossil fueled power plants
- Fuel supply important for natural gas and hard coal power generation
- Power plant construction/manufacture important for renewable technologies
- Releases from nuclear accidents contribute significantly to total score of nuclear electricity

31. Mai 2017

23

Uit de eerste sheet blijkt dat windenergie op de 8 midpoints die zijn gerelateerd aan volksgezondheid weliswaar lager scoort dan de fossiele energiebronnen maar er is nog steeds sprake van een significante invloed. Op sheets 2 en 3 is dat grafisch gepresenteerd waaruit ook blijkt dat de risico's voor de volksgezondheid bij windenergie vooral gerelateerd zijn aan de energiecentrale zelf, dat wil zeggen de constructie en fabricage van de windmolens. Dat wordt op de laatste sheet bevestigd.

Literatuur

Pré. (2018, February 2018). "SimaPro database manual." Retrieved 12 November, 2018, from <https://www.pre-sustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf>.

Frischknecht, Rolf. (2017). Life Cycle Assessment and human health impacts of Electricity Production. 10.13140/RG.2.2.21610.62404.

IAEA (1999), technical report series 394. Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems: Procedures for Comparative Assessment. Retrieved 30 November 2018 from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS394_scr.pdf

Bijlage VIII Gedetailleerde methodebeschrijving bepaling nucleïnezuurgehalte (DNA/RNA)

De DNA-concentratie is bepaald met behulp van de Qiagen DNeasy PowerBiofilm Kit. Daartoe is rond de 10 mg product afgewogen en vervolgens gecentrifugeerd (13000xg, 1 min). Daarna is achtereenvolgens MBL-oplossing (350 µL) en FB-oplossing (100 µL) toegevoegd, waarop het mengsel is geïncubeerd (65 °C, 5 min). De buisjes zijn hierna gehomogeniseerd met een Powerlyzer 24 Homogenizer (3200 rpm, 30 s) en gecentrifugeerd (13000xg, 1 min). Het supernatant is overgebracht in een 2 mL epje waaraan IRS-oplossing (100 µL) is toegevoegd met neerslag van eiwitten als gevolg. Na incubatie (4 °C, 5 min) en centrifugeren (13000xg, 1 min) op kamertemperatuur is het supernatant overgebracht in een nieuw 2 mL epje. Hieraan is MR-oplossing (900 µL) toegevoegd waarop het supernatant is toegevoegd aan een spinkolom. Na centrifuge (13000xg, 1 min) is de spinkolom gewassen met ethanol (650 µL). De vloeistof met verontreinigingen die door de spinkolom is gestroomd is verwijderd en het epje is nogmaals gecentrifugeerd (13000xg, 1 min). De spinkolom is overgebracht op een nieuw 2 mL epje en het DNA dat is gehecht aan de kolom is opgelost door toevoeging van EB-oplossing.

De RNA-concentratie is bepaald met behulp van de Qiagen RNeasy PowerBiofilm Kit. Daartoe is rond de 10 mg product afgewogen en PM1/ β ME-oplossing (650 µL) toegevoegd, waarop het mengsel is geschud met een vortex en gecentrifugeerd (13000xg, 1 min). Het supernatant is overgebracht in een 2 mL epje waaraan IRS-oplossing (150 µL) is toegevoegd met neerslag van eiwitten als gevolg. Na incubatie (4 °C, 5 min) en centrifugeren (13000xg, 1 min) op kamertemperatuur is het supernatant overgebracht in een nieuw 2 mL epje. Hieraan is PM3-oplossing (650 µL) en PM4-oplossing (650 µL) toegevoegd waarop het supernatant is overgebracht naar een spinkolom. Na centrifuge (13000xg, 1 min) is de vloeistof met verontreinigingen die door de spinkolom is gestroomd verwijderd. Daarna is achtereenvolgens PM5-oplossing (650 µL) en na incubatie (kamertemperatuur, 15 min) PM7-oplossing toegevoegd aan de spinkolom en het epje is nogmaals gecentrifugeerd (13000xg, 1 min). De vloeistof die door de kolom is gestroomd is verwijderd en de procedure is herhaald met PM5-oplossing en PM4-oplossing. De spinkolom is overgebracht op een nieuw 2 mL epje en het RNA dat is gehecht aan de kolom is opgelost door toevoeging van RNase-vrij water.

Bijlage IX Analyse bezoekfrequentie website www.powertoprotein.eu

Periode 1 januari 2016 – 1 augustus 2018

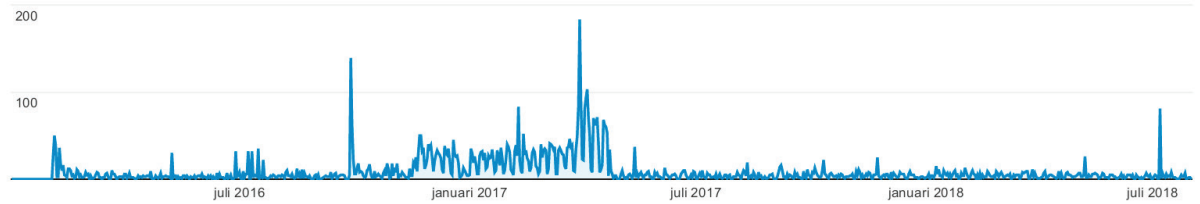
Doelgroepoverzicht


 Alle gebruikers
 100,00% Gebruikers

1 jan. 2016 - 1 aug. 2018

Overzicht

● Gebruikers



Gebruikers

6.552

Nieuwe gebruikers

6.552

Sessies

9.526

Aantal sessies per gebruiker

1,45

Paginaweergaven

27.234

Pagina's/sessie

2,86

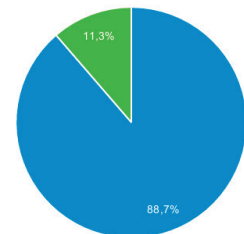
Gem. sessieduur

00:02:41

Bouncepercentage

50,58%

■ New Visitor ■ Returning Visitor



Taal	Gebruikers	% Gebruikers
1. en-us	2.257	37,27%
2. nl-nl	807	13,33%
3. nl	502	8,29%
4. en-gb	490	8,09%
5. (not set)	379	6,26%
6. de	138	2,28%
7. ja-jp	104	1,72%
8. tr	98	1,62%
9. es	93	1,54%
10. zh-cn	90	1,49%

Bijlage X P&ID Power to Protein Pilot

