

RENDEMENTSVERBETERING IN HET DROGEN VAN DIKKE FRACTIE VAN DIGESTAAT

Afstudeerwerkstuk

Mike Oude Vrielink
Agrarisch ondernemerschap dier- en veehouderij
Aeres Hogeschool, Dronten

RENDEMENTSVERBETERING IN HET DROGEN VAN DIKKE FRACTIE VAN DIGESTAAT

Afstudeerwerkstuk

Auteur:

Mike Oude Vrielink

Opdrachtgever:

Aeres Hogeschool
De Drieslag 4
8251 JZ Dronten

Coach:

J. van den Akker

Module:

Afstudeerwerkstuk (AAFW)

Bedrijf:

Gebr. Oude Lenferink
Oldenzaalseweg 134
7666 LH Fleringen

Begeleider:

Roy Kleizen

Datum/Plaats:

14 augustus 2022, Fleringen

DISCLAIMER

Dit rapport is gemaakt door een student van Aeres Hogeschool als onderdeel van zijn/haar opleiding. Het is géén officiële publicatie van Aeres Hogeschool. Dit rapport geeft niet de visie of mening van Aeres Hogeschool weer. Aeres Hogeschool aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade voortvloeiend uit het gebruik van de inhoud van dit rapport.

Voorwoord

Mijn naam is Mike Oude Vrielink. Voor het laatste jaar van mijn opleiding Agrarisch ondernemerschap Dier- en veehouderij aan Aeres Hogeschool Dronten heb ik onderzoek gedaan naar de droging van de dikke fractie van digestaat door middel van restwarmte en hoe dit proces efficiënter gemaakt kan worden.

Er zijn meerdere mensen betrokken geweest bij het uitvoeren van het onderzoek, welke ik hiervoor wil bedanken. Janne van den Akker en Roy Kleizen voor begeleiding bij het onderzoek, gebr. Oude Lenferink voor de mogelijkheid om gebruik te maken van de installaties en het materiaal en Robert, Hendrikus en Xander voor de hulp bij het uitvoeren van de metingen. Ook wil ik Inge-Maartje, Helma en Dinand bedanken voor het leveren van feedback.

Mike Oude Vrielink

14 augustus 2022, Fleringen

Samenvatting

Door vergisting van mest en organische reststromen kan biogas worden geproduceerd. Biogas kan worden omgezet in elektriciteit. Bijproducten van deze processen zijn digestaat en warmte. De dikke fractie van digestaat kan worden gedroogd en verhandeld als meststof.

Een manier om deze dikke fractie te drogen is door middel van drooghallen. Hier wordt de dikke fractie in een laag van 10 tot 20 centimeter dik ingestrooid. Vervolgens wordt buitenlucht verwarmd met de restwarmte van de elektriciteitsproductie en wordt deze warme lucht door een roostervloer de hallen in geblazen. Na een aantal uur wordt het gedroogde digestaat weer uit de hal gehaald. Ook andere landbouwproducten zouden in principe met deze techniek gedroogd kunnen worden.

In dit onderzoek is gekeken hoe de efficiëntie van deze manier van drogen vergroot zou kunnen worden. Hiervoor zijn verschillende metingen gedaan in drooghallen van het bedrijf Biovender. Er is gekeken of er verschil in prestatie is tussen de drooghallen op twee verschillende locaties van het bedrijf op gebied van temperatuur, het bereikte drogestofpercentage en het rendement. Er zijn voor dit doel metingen gedaan naar het verloop van het drogestofpercentage gedurende een droogperiode van 24 uur. Op verschillende plaatsen in de hallen zijn bovendien metingen gedaan naar droogresultaat en temperatuur in de hallen na 24 uur.

Uit het onderzoek blijkt locatie Witteveen tegen verwachting in een beter rendement te hebben dan locatie Beilen. Locatie Beilen is ingericht om warmte vast te houden; dit heeft waarschijnlijk een negatief effect op ventilatie van de vochtige lucht naar buiten. Het verschil in temperatuur binnen de hal daarentegen heeft minder effect op de droging. Bij de metingen gedurende 24 uur komt naar voren dat gedurende deze periode het rendement van het droogproces stijgt.

Aanbevelingen die zijn gedaan zijn om de ventilatie van locatie Beilen aan te passen om meer vochtige lucht af te kunnen voeren. Een mogelijkheid hierbij is om vervolgonderzoek te doen naar het belang van luchtvochtigheid op de droging. Een ander punt wat voor efficiëntie kan zorgen is een droger product voor instrooien door aanpassingen in scheidingsmethode of rantsoen.

Summary

Biogas can be produced by fermentation of manure and organic residuals. Biogas can be used to generate electricity. Residuals of these processes are digestate and heat. The solid fraction of digestate can be dried and sold as fertilizer.

One way to dry this solid fraction is with the use of drying halls. The solid fraction is sprinkled in here, outside air is heated with the residual heat from the installations and blown into the halls through a grid floor.

To investigate how this method of drying can be done more efficiently, various measurements have been made in these drying halls. It was examined whether there is a difference in performance between two separate locations in terms of temperature, dry matter percentage and yield. Measurements were made of the development of the dry matter percentage during 24 hours. At various places in the halls, drying results and temperature were examined in the halls after 24 hours.

Against expectations, the study shows that the Witteveen location has a better efficiency than location Beilen. Location Beilen is designed to keep heat, which probably has a negative effect on ventilation of the moist air to the outside. The difference in temperature within the hall, on the other hand, has less effect on drying. The measurements during 24 hours shows that the drying efficiency increases during the first 24 hours.

Recommendations that are made are to adjust the ventilation of the Beilen location to be able to discharge more humid air. One possibility here is to conduct follow-up research into the effect of humidity on drying. Another point that can increase efficiency is a drier product for bedding through adjustments in separation method or ration.

Inhoud

1. Inleiding.....	7
2. Materiaal en Methode	13
2.1 Materiaal	13
2.1.1 De verschillende locaties.....	13
2.2 Methode	18
2.2.1 Deelvraag 1: Efficiëntie van de verschillende bedrijfslocaties.....	18
2.2.2 Deelvraag 2: Droogtijd en rendement van de drooghallen	18
2.2.3 Deelvraag 3: Plaats in de drooghallen.....	19
2.2.4 Statistiek.....	19
3. Resultaten	21
3.1 Deelvraag 1: Efficiëntie van de verschillende bedrijfslocaties	21
3.2 Deelvraag 2: Droogtijd en rendement van de drooghallen	24
3.3 Deelvraag 3: Plaats in de drooghallen	26
4. Discussie	29
5. Conclusies en aanbevelingen	30
5.1 Conclusie.....	30
5.2 Aanbevelingen	31
6. Bronnen	32
7. Bijlagen	34
Bijlage 1. Protocollen.....	34
Bijlage 2. Dataset 1. 24-uurs meting	37
Bijlage 3. Dataset 2. Meting per plaats	38

1. Inleiding

In de landbouw- en voedselindustrie worden naast voedsel ook veel andere producten geproduceerd. Dit zijn vooral organische reststromen, waar over het algemeen weinig tot geen afzetmarkt voor is. Voorbeelden hiervan zijn mest of graanresten, producten als oud frituurvet of reststromen uit voedselverwerkingen en slagerijen. Deze restproducten zijn veelal biologisch afbreekbare producten die zo efficiënt mogelijk gebruikt worden. In de afvalhiërarchie zijn verschillende manieren om hier mee om te gaan zoals te zien in figuur 1.

Figuur 1 Ladder van Lansink (Recycling Vision, 2021)



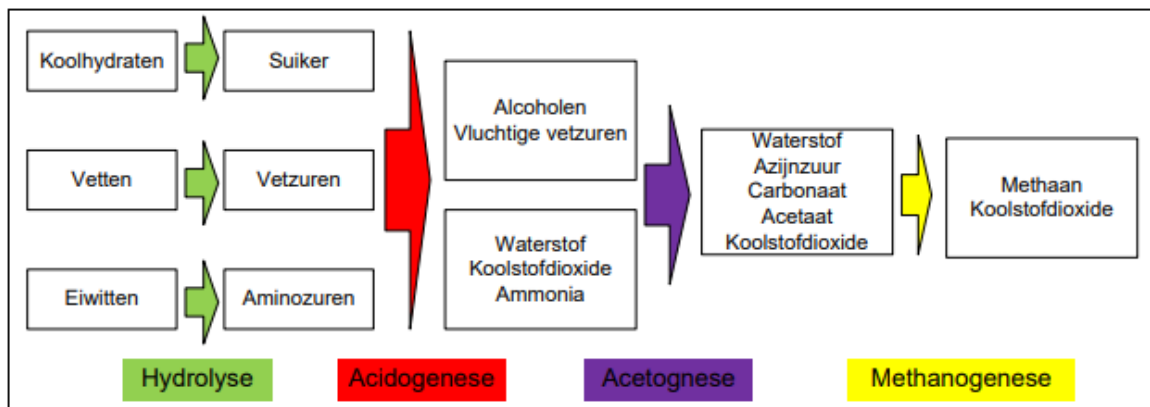
Met preventie wordt bedoeld dat onnodige productie zoveel mogelijk wordt voorkomen. Als dit niet kan, wordt een product zoveel mogelijk hergebruikt voor waarvoor het bedoeld is, zolang het veilig kan. Als dit geen optie is zullen de producten worden gerecycled en als grondstof voor iets gelijks dienen. Wanneer dit geen optie is zal gekeken worden of hier energie uit te halen valt voor het als restproduct beschreven wordt. Deze restproducten zullen in dit geval bijvoorbeeld gefermenteerd worden om er compost van te maken of wanneer dit niet mogelijk is verbrand worden als afval.

Uit de organische producten in de landbouw- en voedselindustrie kan in veel gevallen energie gehaald worden door middel van vergisting (De Mey & Loosvelt, 2015). Bij vergisting worden deze restproducten gebruikt om gas op te wekken dat uiteindelijk omgezet kan worden in elektriciteit of gas voor op het gasnet (VCM vzw, 2020).

De restproducten worden gevoerd aan een vergister. Een vergister is een installatie die lijkt op een mestsilo. Het grootste verschil is dat hierin verwarming en mixers zijn aangebracht. Door constant producten aan de vergister te voeren en het product in de vergister continu te mengen en te verwarmen op 35 tot 40 °C kan vergisting optreden. Vergisting is een biologisch proces. Onder omstandigheden zonder zuurstof worden de organische stoffen door micro-organismen afgebroken en omgezet in onder andere methaan en koolstofdioxide, dit is een anaeroob vergistingsproces.

Het anaerobe vergistingsproces is verdeeld over 4 fases (figuur 2). In deze 4 fases wordt het organisch materiaal door de micro-organismen omgezet in biogas wat vooral bestaat uit CH₄, CO₂, H₂O, H₂S en NH₃. Niet de volledige biomassa wordt omgezet tot biogas, het restant van de massa is digestaat (Bastiaansen, 2011).

Figuur 2 De 4 fases van vergisting (Bastiaansen, 2011)



Dit biogas kan na opwaardering tot groengas geleverd worden aan het gasnet om in huizen of industrie te gebruiken in plaats van aardgas. (Dumont et al., 2010).

Een andere mogelijkheid is van dit biogas groene elektriciteit te maken door het te gebruiken als brandstof voor een warmte-krachtkoppeling (WKK). Hierbij wordt elektriciteit en warmte geproduceerd (Zwart et al., 2006). Deze elektriciteit wordt geleverd aan het elektriciteitsnet. De warmte kan vervolgens gebruikt worden voor andere toepassingen zoals het verwarmen van de installaties en bijbehorende panden, ook kan deze warmte gebruikt worden voor droging.

Naast biogas komt uit deze vergistingsinstallaties digestaat. Dit digestaat kan rechtstreeks teruggeleverd worden aan de landbouw als meststof voor het land, maar er zijn meer mogelijkheden. Zo kan het digestaat gestript worden in een dikke en een dunne fractie. De dikke fractie bevat vooral fosfaat (P) en organische-stikstof (N_{org}), de dunne fractie bevat minerale-stikstof (N_{min}) en kalium (K) (Bamelis, 2016). Door het digestaat te scheiden, zijn er meer mogelijkheden in de afzet van het product. De dikke fractie is in grote mate te vergelijken met compost. Dit bevat namelijk een grote hoeveelheid organische stof en nutriënten. De dunne fractie heeft een snelle werking en is zeer geschikt voor een snelle groei van gewassen, dit product is vergelijkbaar met kunstmeststoffen. Ook kan de dunne fractie gebruikt worden voor verdere verwerking (De Mey & Loosvelt, 2015).

Het scheiden van de digestaat in deze dikke en dunne fractie kan gedaan worden door middel van een decanter. In een decanter kunnen vaste stoffen (dikke fractie) en vloeistoffen (dunne fractie) worden gescheiden door middel van centrifugale krachten, welke vele malen hoger zijn dan zwaartekracht. De vaste stof heeft een hogere dichtheid waardoor deze naar de buitenkant wordt geslingerd. Vervolgens wordt deze vaste stof via een schroef aan de buitenkant van de trommel naar de uitwerp opening getransporteerd. De vloeistof wordt hierbij naar een uitgang aan de andere kant van het apparaat geleid (Hiller GmbH, 2022).

Deze dikke fractie kan vervolgens gedroogd worden. Hier zijn verschillende methoden voor, zoals de banddroger en de drooghal met droogvloer (Turley et al., 2016). Welke methode het meest geschikt is hangt af van de situatie. Een banddroger is geschikt wanneer voldoende restwarmte beschikbaar is van overige installaties, ook moet het te drogen product de goede structuur hebben. Bij de band-droger wordt de dikke fractie op een geperforeerde lopende band gestrooid waar vervolgens hete lucht door wordt geblazen wat voor indroging van het product zal zorgen. Vervolgens wordt het product door de lopende band vervoerd naar de opslagplaats voor het gedroogde product. Dit proces loopt continu door. Op deze manier kan een product met 90% droge stof bereikt worden (Van Ham, 2020). In sommige situaties is de drooghal een optie. In deze situatie vindt hetzelfde proces plaats maar dan batchmatig. De hal wordt ingestrooid waarna het product tijd krijgt om te drogen. Vervolgens wordt de hal gelegeerd, waarna deze opnieuw ingestrooid kan worden. De drooghal beschikt over minder draaiende delen wat het systeem minder gevoelig maakt voor onderhoud en storingen. Het rendement van de warmte ligt over het algemeen op 38 tot 52% (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2015).

In de toekomst zal de landbouw waarschijnlijk verder naar grondgebonden landbouw gaan, hierdoor zal er minder tot geen mest meer verwerkt hoeven te worden. Ook zullen bedrijven met vergisters overstappen naar de levering van groen gas wat een hogere opbrengst heeft dan het leveren van elektriciteit, hierdoor zal bijvoorbeeld alleen de eigen behoefte aan elektriciteit van het bedrijf opgewekt worden, waardoor de geproduceerde warmte lager zal liggen. Hierdoor zal de drooghal steeds minder gebruikt worden voor het drogen van mest. Toch kan deze techniek nog steeds interessant zijn, maar dan voor het drogen van producten uit de akkerbouw of fruitteelt (Mhd Safri et al., 2021), of in de vorm van droogschuren voor hooi (Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit & Agrio, 2020). Droogschuren voor deze producten kunnen volgens dezelfde principes gebouwd worden als de drooghallen voor dikke fractie. Ook bedrijven die in deze vorm drooghallen willen gebruiken zijn gebaat bij een zo hoog mogelijke efficiëntie.

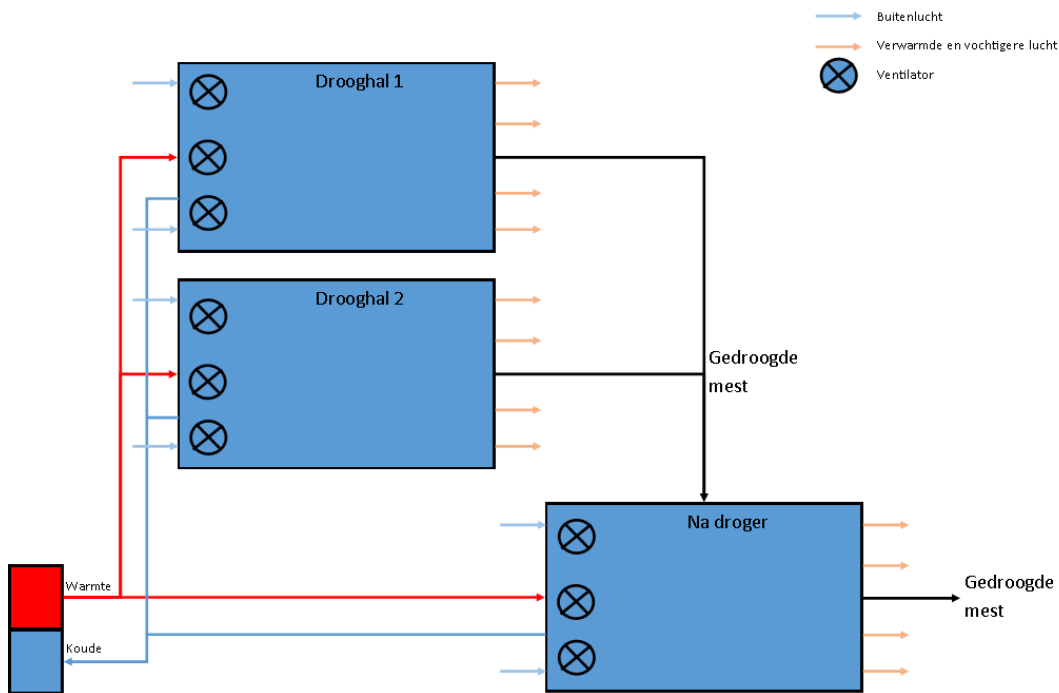
Een bedrijf dat digestaat droogt met drooghallen is het bedrijf Gebr. Oude Lenferink. Dit bedrijf is gespecialiseerd in de distributie, transport en verwerking van meststoffen. Het dochterbedrijf waar de vergisters onder vallen heet Biovender en bestaat uit vier locaties. Op drie van de vier locaties van Biovender zijn drooghallen aanwezig, op de andere locatie wordt de warmte gebruikt voor de verwarming van varkensstallen. In deze drooghallen wordt de dikke fractie afkomstig uit de vergisters verder gedroogd.

In figuur 4 zijn de drooghallen zoals aanwezig op één van de locaties schematisch weergegeven. De warmte van het koelsysteem en het rookgas wordt met behulp van ventilatoren onder de hallen geblazen. Hier kan de lucht via een roostervloer omhoogtrekken, waarbij het door de dikke fractie, welke 10-20 cm dik is uitgestrooid wordt getrokken. Vervolgens kan de lucht aan de voorkant de hal verlaten. Bij dit proces is het de bedoeling om met de beschikbare warmte een zo groot mogelijke hoeveelheid digestaat te drogen.

Figuur 3 Vloerrooster



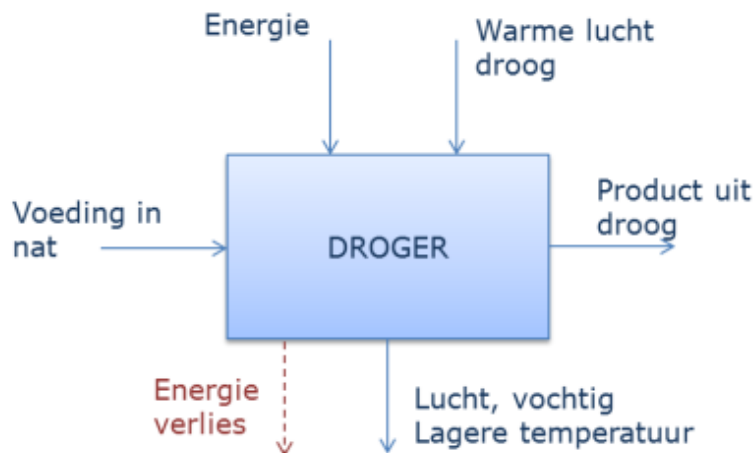
Figuur 4 Drooghallen Schematisch



In figuur 5 zijn de in- en output van de drooghal schematisch weergegeven (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2015). Door het drogen van de dikke fractie wordt het een product met waarde, in plaats van een product waarvoor betaald moet worden om het af te kunnen zetten. Dit kan komen door afzet in speciale sectoren, zoals bodemvoeding voor groenten, fruit en tuin, maar ook doordat met transport meer volume meegenomen kan worden, wat voordelig is bij internationaal transport.

Voor Biovender is het dus van belang zo veel mogelijk van dit digestaat te kunnen verwerken. Zo kan de afzet van het product dat normaal geld kost worden omgezet naar een verdienenmodel.

Figuur 5 Algemeen model droogproces (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2015)



Voor het verdienmodel is het van belang dat het drogen zo efficiënt mogelijk gaat, Volgens de theorie zal er met de ingebrachte warmte een bepaalde hoeveelheid vocht verdampt kunnen worden, hieronder is de formule hiervoor te zien (Sprenger, 1950).

De formule: $Verdamping_{max} = \frac{warmtetoevoer_{totaal}}{verdampingswaarde}$

Voorbeeld: $Verdamping_{max} = \frac{warmtetoevoer_{totaal}}{verdampingswaarde} = \frac{80MJ}{2,256MJ/kg} = 35.460 \text{ kg}$

Bedrijven die op dit moment mest of digestaat drogen in drooghallen doen dat alleen als het voor hen ook financieel voordelig is. Zij zullen geïnteresseerd zijn in verbetering van het droogrendement. Maar ook voor bedrijven die in de toekomst producten zouden kunnen drogen met een dergelijk systeem is onderzoek naar rendementsverbetering interessant.

Punten die van belang zijn bij deze rendementsverbetering, zijn:

- Het huidige rendement van het proces.
- Het verloop van het droogproces over tijd: gaat de droging aan het begin harder of juist aan het eind?
- De verschillen in prestatie van verschillende drooghallen bij verschil van opzet.
- De kenmerken die zorgen voor een goed of juist minder goed droogproces.

Biovender streeft naar een zo efficiënt mogelijk droogproces en heeft opdracht gegeven tot dit onderzoek. De volgende hoofd- en deelvragen zijn hiervoor vastgelegd.

Hoofdvraag

Kan er een efficiëntieverbetering bereikt worden in het drogingsproces van de dikke fractie van digestaat in drooghallen, lettende op droogtijd, productkwaliteit en temperatuur binnen de hallen?

Deelvragen

1. Wat is op dit moment de efficiëntie van de drooghallen van de verschillende locaties van het bedrijf?
2. Welk effect heeft een aanpassing in de droogtijden op het rendement van de drooghallen?
3. In hoeverre heeft de plaats in de drooghal effect op het drogestofgehalte na het drogingsproces?

Doel

Het doel van het onderzoek is de efficiëntie van het drogingsproces te verhogen. Dit kan zijn doordat de kwaliteit beter wordt omdat het drogestofpercentage hoger wordt, maar ook doordat er een groter aandeel aan dikke fractie gedroogd kan worden. Hierbij worden de mogelijkheden in de afzet van de digestaat verbeterd, waardoor financieel voordeel behaald kan worden.

2. Materiaal en Methode

Voor het onderzoek zijn een aantal metingen gedaan. Door middel van deze metingen zijn antwoorden gezocht op de hoofd- en deelvragen. Om de metingen uit te voeren zijn verschillende materialen nodig, deze worden beschreven in paragraaf 2.1 (Materiaal). De metingen zijn uitgevoerd op twee locaties van Biovender. Deze locaties worden beschreven in paragraaf 2.1.1.

Om goed onderzoek te doen is het belangrijk dat de werkwijze en metingen telkens op dezelfde manier worden uitgevoerd. Hiervoor zijn verschillende protocollen opgesteld, zie bijlage 1.

In paragraaf 2.2 (Methode) wordt uitgelegd hoe antwoord is gegeven op de verschillende deelvragen en de statistiek die hierbij gebruikt is.

2.1 Materiaal

Voor de verschillende metingen zijn de volgende materialen gebruikt:

- De **drooghallen** van Biovender op de locaties Beilen en Witteveen.
- De **weegbruggen** om de gewichten te meten voor het instrooien en legen van de drooghallen.
- Een **trekker met meststrooier** waar de drooghallen mee ingestrooid worden.
- Met een **shovel** zijn de drooghallen leeggehaald, ook is hiermee de mestspreider gevuld.
- Door middel van een **drogestofmeter** van het type **Sartorius MA 35** is bepaald hoeveel procent droge stof het product heeft.
- Een digitale **thermometer** van **Precision** is gebruikt om temperatuurverschillen in de drooghallen te meten.
- Een **grondmonsterboor** is gebruikt voor het steken van monsters in de drooghallen.

2.1.1 De verschillende locaties

Op drie van de locaties van het bedrijf is gebruik gemaakt van de drooghallen. De installaties op de verschillende locaties zijn verschillend van opbouw. Op twee van deze drie locaties zijn metingen uitgevoerd. De verschillen tussen deze twee locaties worden hieronder toegelicht. Dit is van belang omdat het onderzoek onder andere ingaat op het eventuele effect van deze verschillen op de efficiëntie van de drooginstallaties.

De belangrijkste eigenschappen van de drooghallen per locatie zijn:

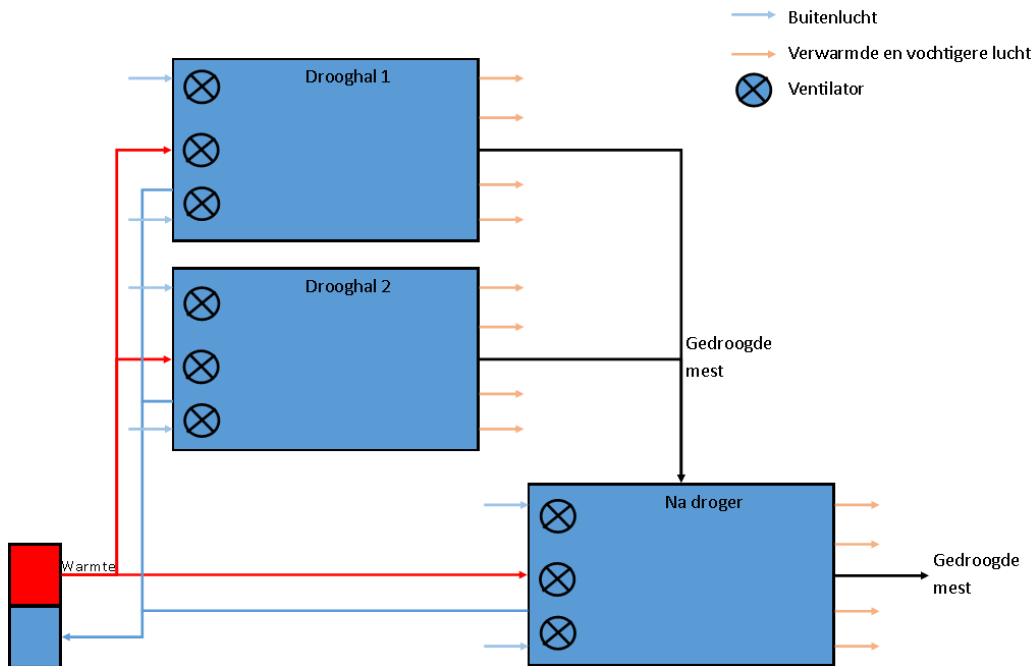
- **Beilen:** drie hallen, roldeuren, rechtstreeks verwarmd.
- **Witteveen:** drie hallen, geen deuren, de derde hal wordt verwarmd vanuit hal 1 en 2.

Groengas Beilen

De drooginstallatie van locatie Beilen bestaat uit:

- Twee drooghallen en één nadrooghal, alle drooghallen zijn voorzien van roldeuren.
- Vijf warmtemeters waarvan één wordt gebruikt voor rookgas, twee meters voor koelwater en twee meters voor de interkoeler van de twee verschillende WKK's.

Figuur 6 Drooghallen schematisch, locatie Beilen



De drooginstallatie uit Beilen bestaat uit 3 drooghallen. Drooghal 1 en 2 worden beide elke ochtend ingestrooid met nat product, waarna de deuren grotendeels gesloten worden. Figuur 7 laat van links naar rechts deuren van hal 1 tot 3 zien. In Hal 1 en 2 wordt een laag van het product ingestrooid, dit wordt gedaan met behulp van de trekker met strooier te zien in figuur 8. Vervolgens kan hier het product worden gedroogd tot het de volgende ochtend wordt overgebracht naar hal 3.

Figuur 7 Drooghallen Beilen



Figuur 8 Trekker + Strooier t.b.v. instrooien Drooghallen Beilen



Op figuur 7 is hal 3 te herkennen aan de hoogste deur. In deze hal heeft het product de mogelijkheid om na te drogen tot het moment van aflevering. Eén keer in de drie dagen wordt de inhoud van hal 3 opgehaald door de afnemer. Wat in figuur 7 opvalt is dat de deuren niet geheel gesloten zijn, de deuren blijven voor ongeveer 50 cm open zodat er voldoende ventilatie van de hal naar buiten is, maar de warmte wel deels vastgehouden wordt in de hallen.

Figuur 9 Warmte-installatie Beilen



Figuur 10 Blower van de drooghallen Beilen



De warmte die gebruikt wordt voor de drooghallen is afkomstig van warmtekrachtkoppelingen (WKK's), dit zijn gasmotoren die gas omzetten in elektriciteit. Van deze WKK's wordt zowel de warmte van het koelwater, als de warmte van de uitlaatgassen teruggewonnen in de installatie te zien in figuur 9. Deze warmte wordt vervolgens door de blowers (figuur 10) de hallen in geblazen.

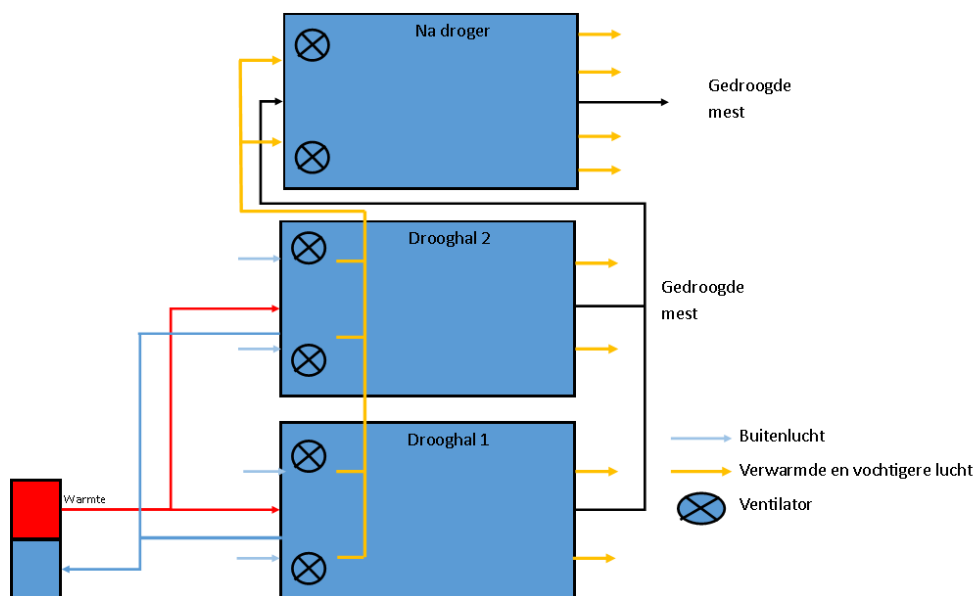
Drenthe Power Witteveen

Een andere locatie waar het onderzoek heeft plaatsgevonden is de locatie Witteveen. Hier zijn net als in Beilen 2 drooghallen en 1 nadrooghal. Het grootste verschil met deze locatie is dat deze drooghallen in tegenstelling tot locatie Beilen niet voorzien zijn van deuren.

De drooginstallatie van locatie Witteveen bestaat uit:

- Twee drooghallen en één nadrooghal, alles zonder deuren
- Eén warmtemeter voor de drooghallen

Figuur 11 Drooghallen schematisch, Locatie Witteveen



Hierna volgen enkele afbeeldingen van de installatie in Witteveen. Figuur 12 en 13 zijn het vooraanzicht van de drooghallen kort na instrooien. Bij hal 1 en 2 wordt lucht naar binnen geblazen via het systeem te zien in figuur 14. Deze lucht wordt verwarmd door middel van de warmte installatie te zien in figuur 15. Vervolgens komt de lucht via een roostervloer in hal 1 en 2 uit. De lucht die in deze hallen naar boven trekt wordt via het plafond afgezogen en naar de roostervloer van hal 3 geleid, waar deze lucht nogmaals naar boven geblazen wordt. De hallen worden ingestrooid met behulp van een trekker met mestspreader (figuur 16). Deze strooier wordt volledig gevuld en leeg gestrooid per drooghal. Dit komt neer op 7500 – 8500 kg dikke fractie digestaat per drooghal per dag.

Figuur 12 Drooghallen Witteveen



Figuur 13 Drooghal Witteveen ingestrooid



Figuur 14 Blowers achter drooghallen Witteveen



Figuur 15 Warmte installatie Witteveen



Figuur 16 Trekker + spreider t.b.v. instrooien van de drooghallen Witteveen



Dagelijks worden drooghal 1 en 2 leeggehaald. Dit product wordt bij Beilen en Witteveen opgeslagen in de nadroger (hal 3). Vervolgens worden drooghal 1 en 2 ingestrooid met een nieuwe lading. De nadroger wordt elke 2 á 3 dagen geleege in containers en afgevoerd door de afnemer.

2.2 Methode

Voor het uitvoeren van de verschillende werkzaamheden zijn protocollen opgesteld, deze zijn opgenomen in bijlage 1. Door de werkzaamheden vast te leggen in protocollen is gezorgd dat deze steeds op eenzelfde vergelijkbare manier uitgevoerd worden. Door middel van deze protocollen zijn antwoorden gezocht op de verschillende deelvragen en hiermee ook op de hoofdvraag. Er zijn protocollen opgesteld voor de volgende werkzaamheden:

- Instrooien
- Droge stof meten
- Mengmonsters nemen
- Plaats specifiek monsters nemen
- Ingebrachte warmte bepalen
- Luchttemperatuur bepalen
- Berekenen van het rendement van de installatie

2.2.1 Deelvraag 1: Efficiëntie van de verschillende bedrijfslocaties

Op verschillende bedrijfslocaties is gemeten hoeveel digestaat in de hallen wordt gestrooid en wat de temperatuur en het drogestofpercentage in de hal was aan het eind van de drogingsperiode. Hierbij is gemeten buiten de hal, voor in de hal, het midden van de hal en achter in de hal zoals weergegeven in het protocol “Luchttemperatuur bepalen” in bijlage 1. Met deze gegevens wordt duidelijk of de verschillen die al bekend waren positief of negatief voor het proces zijn.

2.2.2 Deelvraag 2: Droogtijd en rendement van de drooghallen

Om antwoord te krijgen op deelvraag 2 is gedurende het gehele droogproces het drogestofpercentage gemeten. Door in één periode van instrooien elk uur een monster te nemen (bijlage 1. “Mengmonsters nemen”) en deze te meten op percentage droge stof (bijlage 1. “Droge stof meten”) werd er meer bekend over het verloop van het droogproces. Op deze manier kon waargenomen worden of het product in de eerste uren beter droogt ten opzichte van de laatste uren in de drooghallen of dat deze laatste uren juist van groot belang waren. Door deze meting werd duidelijk of een langere of kortere droogtijd eventueel beter zou zijn.

Voor deze meting is gebruik gemaakt van:

- Het ingestrooid gewicht
- Het drogestofpercentage bij instrooien
- Het drogestofpercentage gedurende de droogperiode
- De ingebrachte warmte geregistreerd door de warmtemeters

Het berekenen van het rendement van het drogingsproces is hierbij van belang. In bijlage 1. “Berekenen van het rendement van de installatie” staat de beschrijving hiervoor.

2.2.3 Deelvraag 3: Plaats in de drooghallen

Mogelijk verloopt het drogingsproces beter voorin of juist achter in de hal, deelvraag 3 gaat hier verder op in. Door aan het einde van het drogingsproces op verschillende plaatsen in de hal drogestofmetingen uit te voeren (bijlage 1. “Plaats specifiek monsters nemen”) is naar antwoord gezocht op deze deelvraag. Aan deze drogestofmetingen is ook de temperatuur op deze plaats toegevoegd (bijlage 1. “Luchttemperatuurbepalen”), waardoor duidelijk wordt of er een relatie bestaat tussen temperatuur en de droging van het product.

2.2.4 Statistiek

Het onderzoek dat uitgevoerd is, valt onder de categorie exploratief onderzoek. Dit houdt in dat er niet alleen gegevens worden beschreven, maar ook geprobeerd wordt om hier een theorie of verband uit af te leiden. In dit geval komt dit neer op de verbanden tussen droogtijd en rendement, ingebrachte warmte en rendement en tussen de verschillende locaties en rendement. Om deze gegevens met elkaar te toetsen is het statistiek programma IBM SPSS Statistics 22 gebruikt.

Deelvraag 1. Wat is op dit moment de efficiëntie van de drooghallen van de verschillende bedrijfslocaties?

Voor deze deelvraag is een dataset gemaakt waarin na een 24-uurs droogperiode meerdere metingen zijn gedaan in alle drooghallen van de verschillende locaties. Op verschillende plekken in de drooghallen zijn gegevens verzameld, te zien in tabel 1. Deze gegevens zijn gekoppeld aan een specifieke plaats in de drooghallen (bijvoorbeeld: midden, 1 meter van achterkant drooghal). Vervolgens is voor deelvraag 1 het verband getest tussen:

- Rendement – Locatie
- Temperatuurverschil – Locatie
- Drogestofpercentage – Locatie

Deze drie verbanden zijn getoetst door middel van de ANOVA toets.

Tabel 1 Variabelen dataset 1

Variabele	Schaal/ Nominaal/ Ordinaal
Locatie	Nominaal
Plaats in de hal	Nominaal
Drogestofpercentage	Schaal
Luchttemperatuur	Schaal
Ingebrachte warmte	Schaal
Maximale verdamping	Schaal
Massa	Schaal
Verdamp gewicht	Schaal
Rendement	Schaal
Verschil temperatuur	Schaal

Deelvraag 2. Welk effect heeft een aanpassing in de droogtijden op het rendement van de drooghallen?

Voor deelvraag 2 is een dataset gemaakt waar de waarden zijn gekoppeld aan een droogtijd van het product op dat moment. Zo is er uit twee batches een 24-uurs verloop in kaart gebracht van het droogproces. Deze dataset bestaat uit de gegevens te zien in tabel 2. Voor deelvraag 2 is het verband getoetst tussen de variabelen:

- Droogtijd – Rendement
- Ingebrachte warmte – Rendement

Voor beide is gebruik gemaakt van een lineaire regressie.

Tabel 2 Variabelen dataset 2

Variabele	Schaal/ Nominaal/ Ordinaal
Droogtijd	Schaal
Ingebrachte warmte	Schaal
Maximale verdamping	Schaal
Massa	Schaal
Verdamp gewicht	Schaal
Drogestofpercentage	Schaal
Rendement	Schaal

Deelvraag 3. In hoeverre heeft de plaats in de drooghal effect op het drogestofgehalte na het drogingsproces?

Voor deze deelvraag is dezelfde dataset gebruikt als voor deelvraag 1, waarin na 24 uur droogperiode metingen gedaan zijn om gegevens te krijgen over de variabelen in tabel 1. Vervolgens is getoetst of verbanden te zien zijn tussen:

- Rendement – Plaats in de hal
- Temperatuurverschil – Plaats in de hal
- Drogestofpercentage – Plaats in de hal

Deze drie verbanden zijn getoetst met een ANOVO-toets.

3. Resultaten

Hieronder staan de resultaten welke naar voren zijn gekomen uit de verschillende metingen. Per deelvraag zijn verschillende metingen gedaan; de resultaten zullen daarom op volgorde van deelvraag weergegeven worden.

3.1 Deelvraag 1: Efficiëntie van de verschillende bedrijfslocaties

De eerste deelvraag luidde “Wat is op dit moment de efficiëntie van de drooghallen van de verschillende locaties van het bedrijf?”

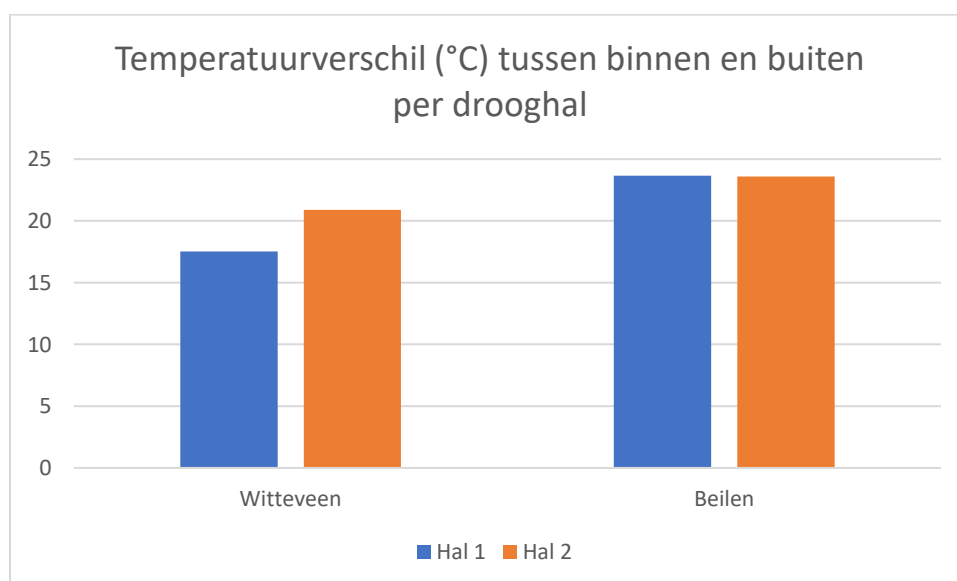
Voor het beantwoorden van deelvraag 1 is gekeken naar de verschillen in prestatie tussen de verschillende locaties. Dit is gedaan door na een droogperiode van 24 uur verschillende metingen in de hallen uit te voeren naar temperaturen en drogestofpercentages en ingebrachte warmte. Vervolgens kon met de behaalde resultaten gegevens berekend worden als het rendement zie bijlage 1.

Hieronder zijn drie grafieken weergegeven waarin per locatie het temperatuurverschil met buiten, het drogestofpercentage en het rendement inzichtelijk is gemaakt.

In de figuur hieronder is weergegeven wat in de hal het gemiddelde verschil met de buitentemperatuur is. In deze grafiek valt op dat de hallen in Beilen 23,6°C en 23,7°C warmer zijn dan de lucht buiten, in Witteveen liggen deze temperaturen lager en verder uit elkaar 17,5°C en 20,9°C.

ANOVA laat zien dat het temperatuurverschil in Beilen significant hoger is dan in Witteveen, $F(1.10) = 5.110$; $p = .047$.

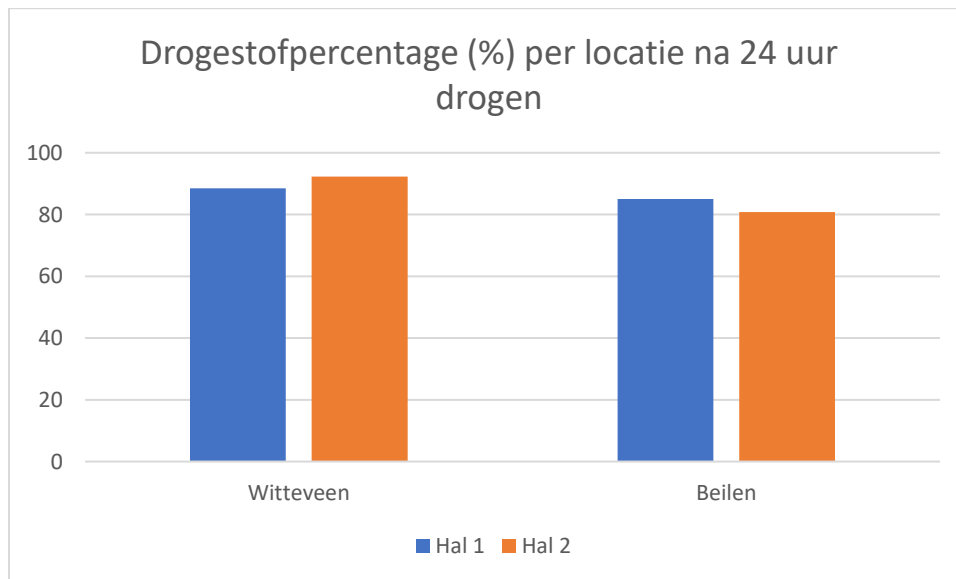
Figuur 17 Temperatuurverschil per locatie



In de onderstaande grafiek zijn de gemiddelde drogestofpercentages van het product in de hallen weergegeven na 24 uur drogen. Hierin is te zien dat na 24 uur het product in Witteveen droger is met 88,5% en 92,3% Droge stof, Beilen scoort hierbij lager met een drogestofpercentage van 85% en 80,8%.

ANOVA laat geen significant verschil zien tussen het drogestofpercentage tussen de locaties Beilen en Witteveen $F(1,10) = 1.080$; $p = .323$.

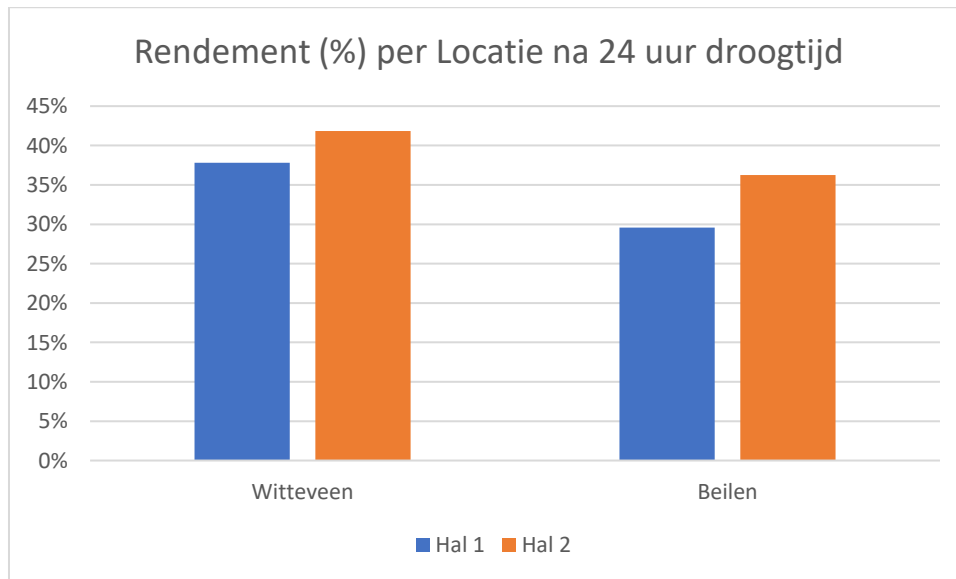
Figuur 18 Drogestofpercentage per locatie



In de onderstaande figuur is het berekende rendement weergegeven waarmee in de drooghallen gedroogd is over een periode van 24 uur. Het valt hierin op dat het rendement in Witteveen hoger ligt met een rendement van 37,78% en 41,8%, ten opzichte van 29,6% en 36,3% in Beilen.

ANOVA laat zien dat het rendement van locatie Witteveen significant hoger is dan dat van Beilen, $F(1,10) = 9.120$; $p = .013$.

Figuur 19 Rendement per locatie na 24 uur droogt



3.2 Deelvraag 2: Droogtijd en rendement van de drooghallen

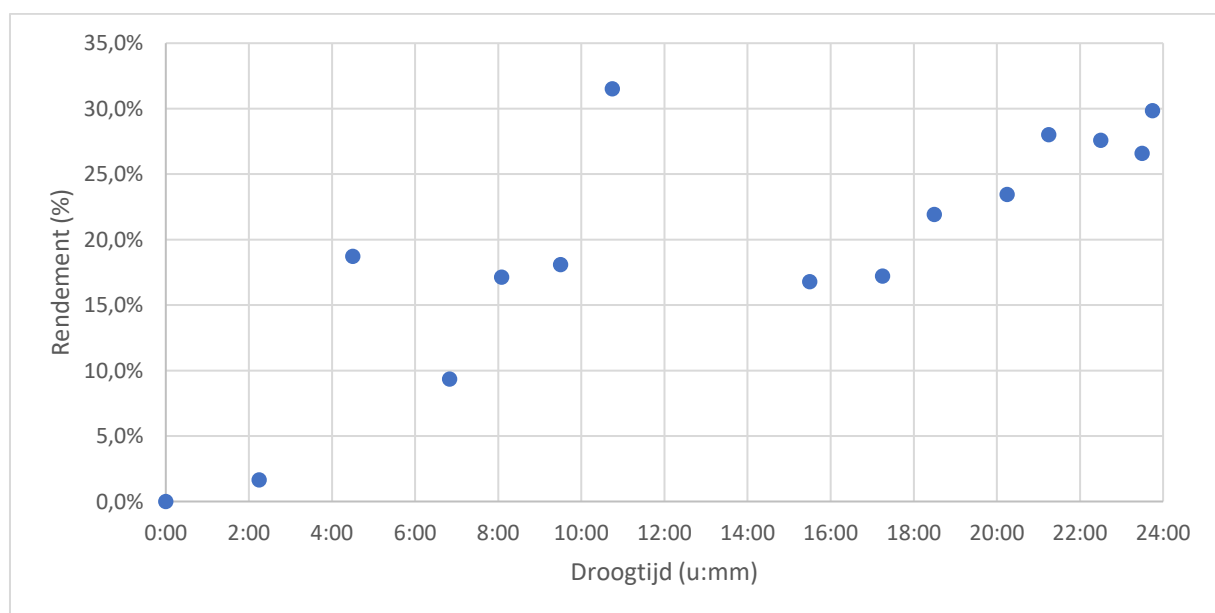
Deelvraag 2 luidde “Welk effect heeft een aanpassing in de droogtijden op het rendement van de drooghallen?”

Op locatie Beilen zijn metingen gedaan naar het verloop van de droging gedurende de eerste 24 uur in de drooghallen. Hierbij zijn gedurende de dag het drogestofpercentage en de ingebrachte warmte gemeten, waarna vervolgens verdampt gewicht, maximaal verdampt gewicht en rendement berekend zijn. Deze metingen zijn vanwege technische redenen gedaan in 2 verschillende batches. Op het bedrijf is niet 24 uur per dag iemand aanwezig daarom is ervoor gekozen om batch 1 's morgens te strooien zodat de eerste 12 uur gemeten kon worden, later is een batch ingestrooid in de avond zodat deze van 12 tot 24 uur droogtijd gemeten kon worden. Tijdens deze batches zijn meerdere keren mengmonsters gestoken in de drooghallen op de tijden die te zien zijn in de onderstaande figuur en bijlage 2. De monsters tot 12 uur droogtijd zijn uit batch 1 genomen, de monsters tussen 12 en 24 uur droogtijd zijn genomen van batch 2.

In onderstaande grafiek is het rendement van de drooghal in relatie tot de droogtijd te zien. In de metingen valt op dat de grafiek laag begint en over het algemeen stijgende is, een ander punt wat opvalt is de variatie tussen de metingen in de eerste 12 uur waar het rendement fors stijgt, plots zakt en vervolgens weer stijgt. Vergeleken met de eerste 12 uur is de tweede 12 uur gelijkmatiger met een stijgende lijn in het rendement.

Een enkelvoudige regressie met het rendement van de warmte als afhankelijke variabele en droogtijd als verklarende variabele is significant, $F(1.12) = 13.730$; $p = .003$. Van de variatie in het rendement kan 53,4% door de droogtijd verklaard worden, met als regressiecoëfficiënt van de droogtijd 0.730.

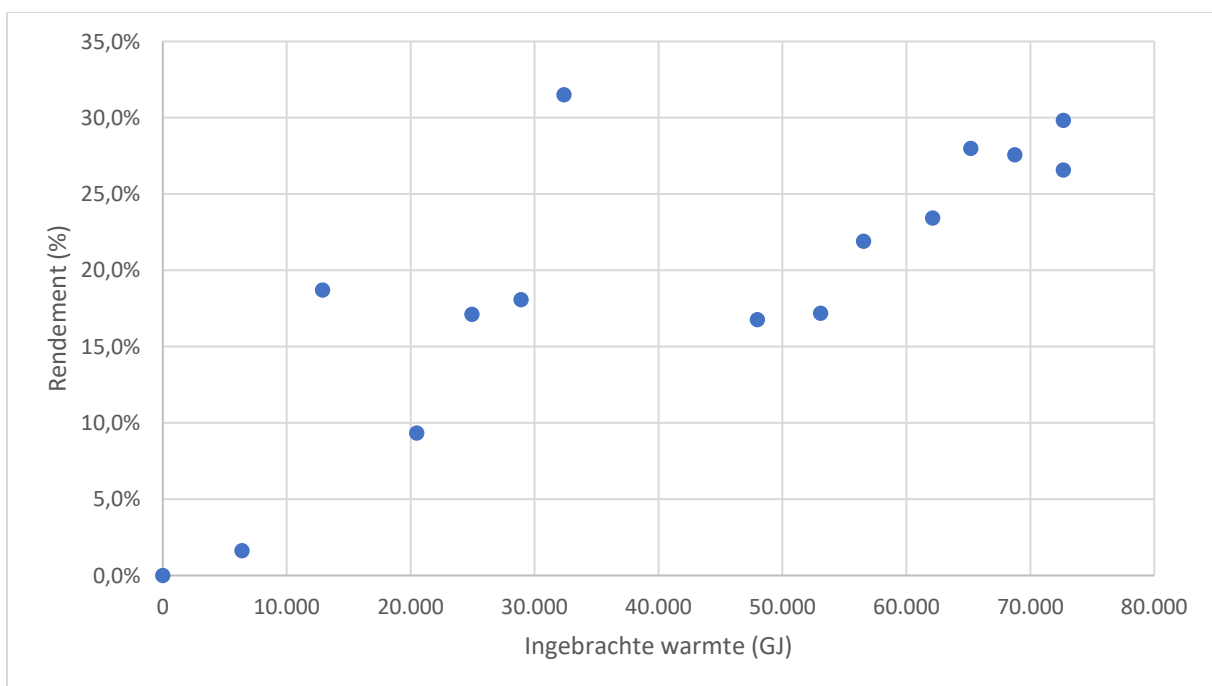
Figuur 20 Droogtijd in relatie met het rendement



In figuur 21 is de relatie te zien tussen de ingebrachte warmte en het rendement. Hierbij valt op dat deze grafiek grotendeels overeenkomt met figuur 20; dit komt doordat de hoeveelheid warmte die per uur ingebracht wordt in de hallen over het algemeen stabiel zal zijn. Wanneer meer gas in elektriciteit wordt omgezet zal meer warmte ontstaan, ook kan meer warmte gevraagd worden van overige installaties (de drooghal krijgt steeds de warmte die over is). Door variatie in de hoeveelheid warmte kunnen verschillen tussen deze twee grafieken ontstaan.

Een enkelvoudige regressie met het rendement van de warmte als afhankelijke variabele en ingebrachte warmte als verklarende variabele is significant, $F(1.12) = 13.352$; $p = .003$. van de variatie in het rendement kan 52,7% door de droogtijd bepaald worden, met als regressiecoëfficiënt van de droogtijd 0.726.

Figuur 21 Ingebrachte warmte in relatie tot het rendement



3.3 Deelvraag 3: Plaats in de drooghallen

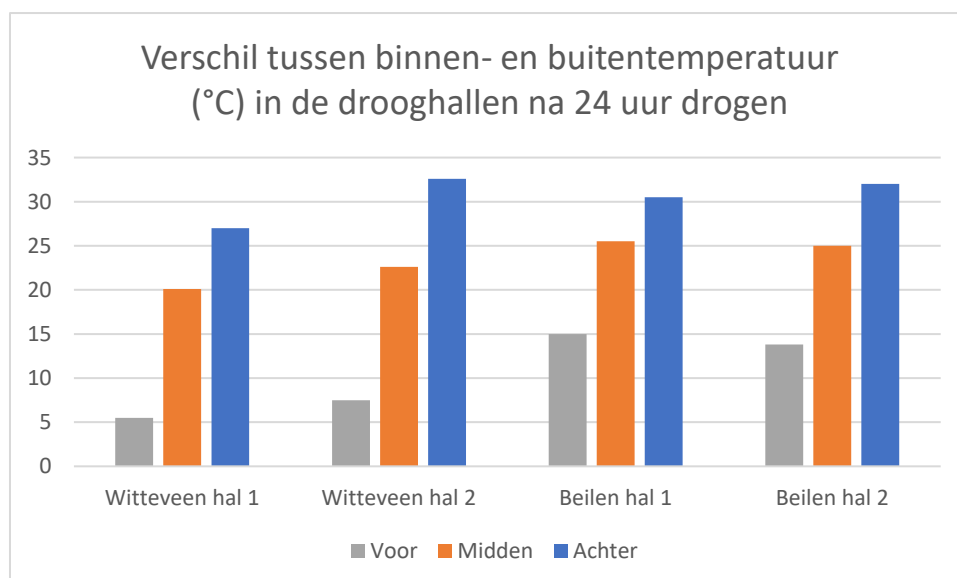
De derde deelvraag was “In hoeverre heeft de plaats in de drooghal effect op het drogestofgehalte na het drogingsproces?”

Naast de metingen per hal en metingen gedurende 24 uur zijn na 24 ook metingen gedaan op verschillende punten in de hal. Het doel van deze metingen is om inzicht te krijgen in het effect van de plaats in de hal op de drogingsprestaties.

In de figuur hieronder wordt duidelijk hoe na een droogtijd van 24 uur het verschil is met de binnen- en buitentemperaturen op verschillende plaatsen in de hallen gemeten in °C op één meter hoogte. In de grafiek wordt duidelijk dat het temperatuurverschil vóór in de hal nog niet heel hoog is, maar hoe verder naar achter hoe hoger de temperaturen worden. In de grafiek wordt ook dit verschil zichtbaar tussen vóór en achter in de hal. In Witteveen is dit 5,5°C vóór in hal 1 tot 27°C achter in de hal, hal 2 is 7,5°C vóór tot 32,6°C achter in de hal. Het verschil bij Witteveen ligt hoger dan bij Beilen met 15°C vóór in hal 1 tot 30,5°C achter in de hal en 13,8°C vóór in hal 2 tot 32°C achter in de hal. Dit komt neer op een verschil van 21,5°C en 25,1°C voor Witteveen tegenover een verschil van 15,5°C en 18,2°C in Beilen. Dit verschil wordt op beide locaties voornamelijk vóór in de hallen gecreëerd.

ANOVA laat zien dat er een significant verband is tussen de plaats in de drooghal en het temperatuurverschil met buiten $F(2,9) = 36,313$; $p < .001$. Hierin is het temperatuurverschil met buiten achter in de hal significant groter dan in het midden van de hal ($p = .035$) en het temperatuurverschil met buiten midden in de hal significant hoger dan vóór in de hal ($p = .001$).

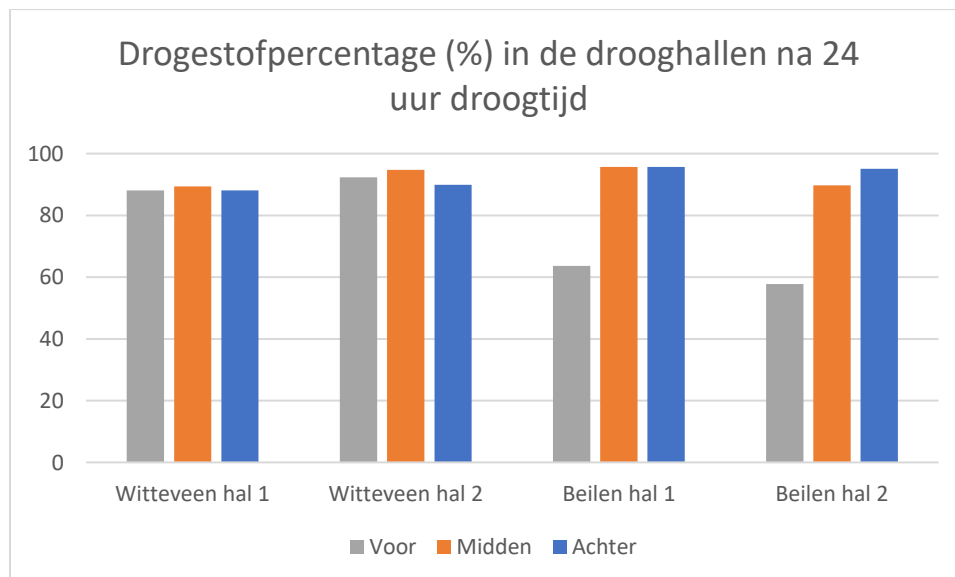
Figuur 22 Temperatuurverschil met buiten op verschillende plaatsen in de hallen



In figuur 24 is het verband gelegd tussen het drogestofpercentage na 24 uur droogtijd en de plaats in de hal. Hierin wordt duidelijk dat het product vóór in de hallen van Beilen minder droog wordt dan de rest, 63,7% en 57,8% droge stof tegenover 88% tot 95,7% droge stof bij de andere metingen, dit is een verschil van 24,3% tot 37,9%. In Witteveen ligt het drogestofpercentage over de gehele hal beter op een lijn met 88,1% tot 94,7% droge stof, dit is een verschil van 6,6%. Wel is te zien dat hal 2 van Witteveen op alle afstanden hogere percentages haalt dan hal 1 van Witteveen.

ANOVA laat zien dat het verband tussen drogestofpercentage en plaats in de hal niet significant is maar wel aanwezig $F(2,9) = 3.496$; $p = .075$. Hierbij zijn achter en in het midden van de hal vrijwel gelijk ($p = 1.000$), de ingang laat al meer verschil zien met achter ($p = 0.111$) en midden ($p = .106$).

Figuur 23 Drogestofpercentage bij de verschillende afstanden

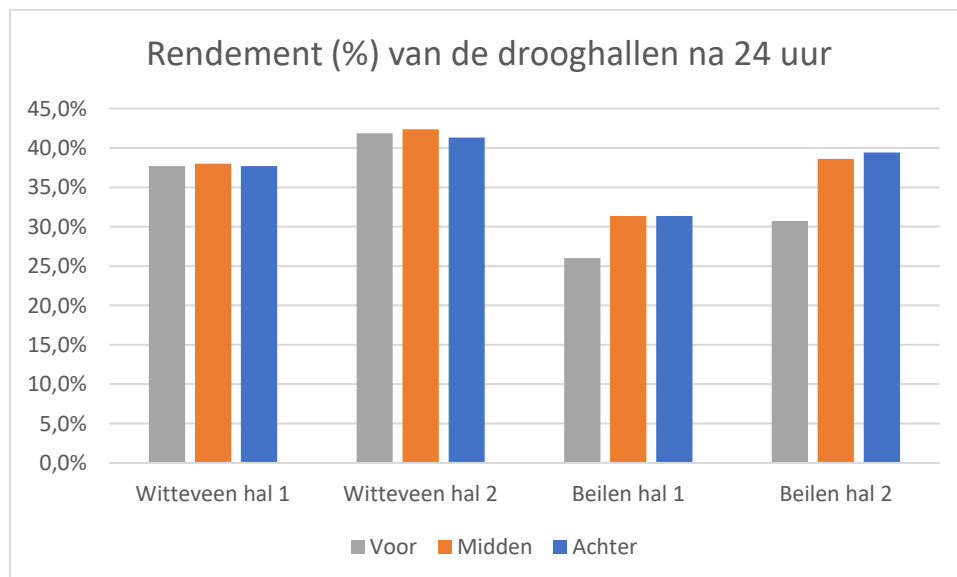


In onderstaande figuur is te zien hoe het rendement van de ingebrachte warmte is na 24 uur drogen, op verschillende afstanden in de verschillende drooghallen. In de figuur valt op dat Witteveen constanter is in rendement dan Beilen. In Beilen is vooral het rendement vóór in de hal lager dan in het midden en achter in de hal. Bij hal 1 is dit 26% vóór tegenover 31,4% midden en achter, in hal 2 is dit 30,7% vóór tegenover 38,6% midden en 39,4% achter. Voor Witteveen is het verschil tussen de afstanden minder, namelijk 37,7% vóór en achter tot 38% midden in hal 1 en 41,3% achter tot 42,4% midden in hal 2.

Bij het instrooien van de hallen viel op dat er damp voor uit de hallen kwam. In Beilen werd deze damp onder de deur langs getrokken dit kan verklaren waarom Beilen vooral vóór slechtere resultaten heeft.

ANOVA laat zien dat er geen significant verband is tussen het rendement en de plaats in de drooghal $F(2.9) = 0.529$; $p = .607$.

Figuur 24 Rendement bij de verschillende afstanden



Details van de metingen zijn terug te vinden in bijlagen 2 en 3.

4. Discussie

In de loop van het onderzoek zijn aspecten van onderzoeksopzet en uitvoering naar voren gekomen die achteraf niet optimaal bleken. Ook zijn er ideeën naar voren gekomen waar extra aandacht aan besteed zou kunnen worden. Dit zijn de volgende punten:

- De beschikbare warmte is gemeten voordat deze warmte verdeeld wordt over de verschillende installaties. Dit betekent dat ook een deel van de warmte gebruikt wordt voor eventuele verwarming van de vergisters en het bedrijfspand en op locatie Beilen is de nadrooghal hier ook op aangesloten. De warmte die hieraan verloren ging is niet bekend en daarom ook niet meegenomen in berekeningen. Het echte rendement van de drooghallen zal waarschijnlijk dus hoger liggen dan uit de metingen lijkt.
- Voor de drooghallen wordt gebruik gemaakt van buitenlucht. Deze lucht wordt na verwarmen de hallen in geblazen; hierdoor zal een ander weertype effect kunnen hebben gehad op de uitgevoerde metingen.
Door weersinvloeden maar ook door verdamping zal de luchtvochtigheid in de drooghallen veranderen. Lucht met een hoge luchtvochtigheid zal minder extra vocht kunnen opnemen waardoor het rendement lager zou kunnen worden; in dit geval zou meer ventilatie wenselijk zijn. Tijdens het de uitvoering van het onderzoek is damp te zien geweest bij de uitgang van de drooghallen in Beilen. Onderzoek naar de relatie tussen luchtvochtigheid en droging van het product is daarom aan te raden.
- Zoals uitgelegd in paragraaf 3.2, bij de 24 uren metingen is gebruik gemaakt van twee verschillende batches. Hierbij is verschil te zien in de eerste en tweede 12-ursperiode. 24 uur uit 1 batch meten zou hierbij beter zijn, maar arbeid is hierbij belemmerend.
- Vrijwel elke co-vergister krijgt een ander rantsoen, het digestaat is hierdoor per vergister anders. Vervolgens wordt het digestaat gescheiden. Mogelijk heeft de samenstelling van het digestaat en de manier van scheiden effect op hoe gemakkelijk de dikke fractie kan drogen. Enkele voorbeelden die het onderzoeken waard zouden kunnen zijn is het vetpercentage in het rantsoen of de ruwe celstof. Ook het verschil tussen decanter of schroefpers zou een optie kunnen zijn om te onderzoeken.

5. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de verkregen resultaten bestudeerd en verder uitgewerkt tot een conclusie. Vervolgens worden aanbevelingen gedaan aan de hand van het onderzoek om droogprocessen te kunnen verbeteren.

5.1 Conclusie

Uit het onderzoek zijn de volgende punten geconcludeerd:

- Wanneer de resultaten van Beilen en Witteveen met elkaar vergeleken worden, blijkt de locatie Witteveen beter te drogen dan Beilen. Ook al is de temperatuur in de hallen in Witteveen lager, toch zijn het rendement en het drogestofpercentage na 24 uur hoger in Witteveen. De drooghallen in Witteveen zijn gebouwd zonder deuren; het zou kunnen dat dit de mogelijkheid tot ventilatie verbetert, waardoor het onttrokken vocht makkelijker afgevoerd kan worden. Deze mogelijkheid tot ventilatie kan mogelijk ook het verschil in temperatuur verklaren: het doorwaaien van de hal zou kunnen zorgen dat de warmte minder goed vastgehouden wordt.
- Uit de 24 uur meting te zien in Bijlage 2 en hoofdstuk 3.2 is zichtbaar dat naarmate de droogtijd langer en de hoeveelheid ingebrachte warmte groter wordt, het rendement van de drooghallen omhooggaat. Deze trend zou nog iets verder door kunnen trekken maar vervolgens zal het product zo ver gedroogd zijn dat de piek is bereikt, dit komt doordat zo goed als al het vocht op dat moment verdampt is. Of dit hogere rendement vooral veroorzaakt wordt door de droogtijd of de ingebrachte warmte is uit de metingen niet af te lezen aangezien de ingebrachte warmte vrijwel constant was.
- Uit de metingen op verschillende afstanden in de hal komt vooral naar voren dat de hallen op locatie Beilen vooral voor in de hal minder goed drogen. Op andere afstanden zijn het rendement en drogestofpercentage na 24 uur vrijwel gelijk. Voor in de hallen van Beilen zal de slechtere droging waarschijnlijk veroorzaakt worden door de roldeuren welke onderaan gedeeltelijk open staan. Hierdoor zal de damp afkomstig van verder achter in de hal langs het te drogen product gaan waardoor het drogen vóór in de hal zal afzwakken. Deze damp was ook te zien kort na instrooien: op dat moment trok een wolk aan damp door de opening van de deuren, deze gegevens zijn niet significant om dit zeker te weten zouden meer metingen gedaan moeten worden.
- Bij de metingen naar de verschillende afstanden in de hallen is ook luchttemperatuur meegenomen. Hierbij was op locatie Witteveen een hoger verschil tussen voor en achter in de hal waar te nemen. Dit is te verklaren door het ontbreken van de deuren, maar dit effect is in prestatie nauwelijks terug te zien.

5.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van de bevindingen gedurende het onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Het grootste verschil in prestaties was te zien (hoewel niet significant) vóór in de hallen van locatie Beilen. Aangezien dit waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de ventilatie van deze hal naar buiten is het raadzaam deze methode van ventilatie aan te passen; voorbeelden hiervoor zijn meer ventilatie of ventilatie boven in de hal. Verder onderzoek is hierbij raadzaam aangezien deze resultaten niet significant waren.
- Uit de literatuur blijkt dat er verschillende methoden zijn om de digestaat te scheiden in dikke en dunne fractie. Door bij het scheiden het drogestofpercentage te verhogen zal dit aanzienlijk verschil kunnen maken in de hoeveelheid vocht die vervolgens nog in de hallen verdampt moet worden.
- Een punt wat in het onderzoek niet is onderzocht maar wel van belang zou kunnen zijn is de luchtvochtigheid in de drooghallen. Wanneer de luchtvochtigheid hoog is zal deze lucht minder extra vocht kunnen opnemen, wat effect heeft op de droging. Onderzoek hiernaar zou raadzaam zijn en hier zou eventueel ook de ventilatie op aangepast kunnen worden. Een voorbeeld hiervan zou kunnen zijn om de ventilatie aan te sturen op basis van luchtvochtigheid.
- Een ander punt waar onderzoek naar gedaan kan worden is het soort product wat gedroogd wordt. Afhankelijk van kenmerken als bijvoorbeeld structuur zou het drogen beter of slechter kunnen gaan.
- Aangezien met de in de toekomst verwachte nieuwe mestwetgeving het nadrogen van digestaat wellicht minder winstgevend zou kunnen worden zou ook onderzoek gedaan kunnen worden naar de geschiktheid van het onderzochte type drooghal voor het drogen van andere agrarische producten.

6. Bronnen

- Bamelis, L. (2016, oktober). *Digestaat op maat: Inventarisatie beschikbare technieken*. United Experts cvda.
<https://www.vlaco.be/sites/default/files/generated/files/page/zo-16101800001-rap-lba-10-11-2016.pdf>
- Bastiaansen, B. (2011, april). *Anaerobe (droge) vergisting*. Energie Conversie Parken.
https://ecp-biomass.eu/sites/ecp-biomass.eu/files/books/HP_review_droge%20vergisting_BB_0.pdf
- De Mey, J., & Loosvelt, L. (2015). *De agro-voedingsindustrie, leverancier van biogas*. Stefaan Matton. https://www.biogas-e.be/sites/default/files/2017-08/BiogasVoedingsindustrie_DIG%20BROCHURE_definitief_1.pdf
- Dumont, M. H. M., Regie Orgaan Energie Transitie, & Platform Nieuw Gas. (2010, februari). *Opwaarderen tot aardgaskwaliteit: Van biogas naar groen gas*. Platform Nieuw Gas.
<https://refman.energytransitionmodel.com/publications/98/download>
- Gebr. Oude Lenferink. (2018, 26 april). *Mestverwerking & vergisting*. Geraadpleegd op 15 september 2021, van <https://gebroudelenferink.nl/mestverwerking-vergisting/>
- Geraarts, B., & Meulenkamp, R. (2013). *Marktconsultatie slibdroging- en slibontwatering* (Nr. 2013-W-03). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Hiller GmbH. (2022). *Werkingsprincipe van een decanter centrifuge*. Hiller. Geraadpleegd op 13 juni 2022, van [https://www.hillerzentri.de/de/werkingsprincipe.html#:~:text=Een%20decanter%20centrifuge%20is%20een,stoffen%20van%20vloeistoffen%20te%20scheiden.&text=Door%20dit%20hoge%20trommeltoerental%20worden,vloeistoffen%20\(geringere%20dichtheid\)%20gescheiden.](https://www.hillerzentri.de/de/werkingsprincipe.html#:~:text=Een%20decanter%20centrifuge%20is%20een,stoffen%20van%20vloeistoffen%20te%20scheiden.&text=Door%20dit%20hoge%20trommeltoerental%20worden,vloeistoffen%20(geringere%20dichtheid)%20gescheiden.)
- Maurer, C., & Müller, J. (2019, april). *Drying Characteristics of Biogas Digestate in a Hybrid Waste-Heat/Solar Dryer*. MDPI. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/7/1294>
- Melse, R. W., De Buissonjé, F. E., Verdoes, N., & Willers, H. C. (2004, november). *Quick scan van be- en verwerkingstechnieken voor dierlijke mest*. Animal Sciences Group / Praktijkonderzoek. <https://edepot.wur.nl/24640>
- Mhd Safri, N. A., Zainuddin, Z., Mohd Azmi, M. S., Zulkifle, I., Fudholi, A., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2021). Current status of solar-assisted greenhouse drying systems for drying industry (food materials and agricultural crops). *Trends in Food Science & Technology*, 114, 633–657. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.035>

- Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit & Agrio. (2020, 9 juni). *Met volledig hooi voeren kringlopen sluiten*. Initiatief en inspiratie | Groeien naar Morgen. Geraadpleegd op 14 juni 2022, van <https://www.groeiennaarmorgen.nl/initiatieven-en-inspiratie/hooidrooginstallatie>
- Recycling Vision. (2021, 12 juli). *Afvalhiërarchie*. Recycling.com. Geraadpleegd op 25 mei 2022, van <https://www.recycling.com/nl/ladder-van-lansink/>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2015, oktober). *Best Practice Droogprocessen*. RVO.
- Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2020). *Drogen van mest*. Kenniscentrum InfoMil. Geraadpleegd op 5 juli 2021, van <https://www.infomil.nl/onderwerpen/landbouw/mest/handleiding-bewerken/technieken/drogen-mest/>
- Sprenger, J. J. I. (1950). *Theorie over het drogen van landbouwproducten*. Centraal Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek.
- Timmerman, M., & Rulkens, W. (2009). *Korte inventarisatie naar het perspectief van het drogen van digestaat bij biogasinstallaties* (Nr. 289). Wageningen UR Livestock Research.
- Timmerman, M., & Rulkens, W. (2010, september). *Informatieblad Mest van bedreiging naar kans*. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/154753>
- Turley, D., Hopwood, L., Burns, C., & Di Maio, D. (2016, maart). *Assessment of digestate drying as an eligible heat use in the Renewable Heat Incentive*. NNFCC. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/577039/Annex_D_-_Report_on_digestate_drying.pdf
- Van Ham, K. (2020, 15 juni). *Doelgericht mest raffineren - Mest Nieuws*. DLV Advies. Geraadpleegd op 27 juni 2022, van <https://www.dlvadvies.nl/mest/nieuws/doelgericht-mest-raffineren/1291>
- VCM vzw. (2020). *Vergisting - VCM vzw*. VCM. Geraadpleegd op 11 mei 2022, van <https://www.vcm-mestverwerking.be/nl/kenniscentrum/4708/vergisting>
- Zwart, K. B., Oudendag, D. A., Ehlert, P. A. I., & Kuikman, P. J. (2006). *Duurzaamheid co-vergisting van dierlijke mest* (Nr. 1437). Alterra.

7. Bijlagen

Bijlage 1. Protocollen

Instrooien

Het instrooien van de drooghallen wordt gedaan door middel van een trekker met meststrooier. Deze meststrooier wordt volledig gevuld (ongeveer 14 m³) met dikke fractie van digestaat. Als de combinatie gevuld is zal deze over de weegbrug rijden om te wegen. Hierna wordt per drooghal één strooier geleegd. Hierbij is het belangrijk dat de gestrooide laag gelijkmatig is verdeeld en dat er geen open plekken zijn. Ook mag niet over het natte product gereden worden om dichtslijpen van de roostervloer te voorkomen. De trekker met strooier wordt achterwaarts de drooghal in gereden. Achter in de hal staat een markering op de muur. Wanneer de achteras van de trekker gelijk staat met deze markering en op het midden van de roostervloer staat, staat de combinatie goed. Vervolgens kan het leegdraaien beginnen. Om dit goed te doen wordt in een vaste versnelling gereden (versnelling: 2 – CR – Schildpad), met een constant toerental van 1000 toeren per minuut op de aftakas naar de strooier en hydrauliekhendel 1 naar voren gedrukt voor de bodemketting. De combinatie kan nu blijven lopen tot deze helemaal de drooghal uit is, vervolgens kan de hydrauliek en aftakas uitgeschakeld worden. Hierna zal de combinatie nogmaals op de weegbrug gewogen worden om het ledig gewicht te kunnen bepalen (vol gewicht minus ledig gewicht is de ingestrooide hoeveelheid). Per locatie zijn 2 drooghallen die met dikke fractie worden ingestrooid, dit komt neer op 2 strooiers vol per locatie per dag.

Mengmonsters nemen

Voor de drogestofmetingen zullen mengmonsters genomen worden over de gehele drooghal. Dit wordt gedaan door middel van een grondmonsterboor. Deze grondmonsterboor kan in het product gestoken worden dat uitgestrooid ligt in de drooghal waarbij over de gehele diepte een gat van 1 cm doorsnee gepakt wordt. Bij het nemen van het monster zal zigzaggend door de hal gelopen worden, bij elke 2 stappen wordt een monster gestoken.

De gestoken monsters worden verzameld in een emmer waarna deze gemengd worden. Het mengen wordt gedaan door een draaiende beweging te maken met de emmer.

Plaats specifiek monsters nemen

Voor het plaats specifiek meten van de droge stof, zal een monster gestoken worden op deze bepaalde plaats. Dit wordt gedaan door met de grondmonsterboor één monster te steken op deze specifieke plaats, waarbij over de gehele diepte een gat van 1 cm doorsnee gepakt wordt.

De gestoken monsters worden verzameld in een emmer waarna deze gemengd worden. Het mengen wordt gedaan door een draaiende beweging te maken met de emmer.

Droge stof meten

Het percentage droge stof wordt gemeten door middel van de drogestofmeter (Sartorius MA 35). Open de deksel van de drogestofmeter en leg een nieuw schaaltje op het meetinstrument. Druk op enter en bedek het schaaltje gelijkmatig met digestaat zodat er een dun laagje op het schaaltje ligt (10 – 20 gram). Wanneer de deksel van de drogestofmeter wordt gesloten zal het meten van het drogestofgehalte beginnen. Afhankelijk van het percentage droge stof en de hoeveelheid product zal dit 45 – 90 minuten duren. De drogestofmeter gaat te werk door een begingewicht vast te stellen, hierna zal het te meten product verwarmd worden (in dit geval tot 100°C), tussentijds wordt het gewicht gemeten. Deze meting gaat door tot het gewicht niet verder afneemt waarna het drogestofgehalte berekend wordt.

Ingebrachte warmte bepalen

Op de installaties zijn meters aangesloten welke de ingebrachte warmte kunnen waarnemen, de ingebrachte warmte van instrooien tot leeghalen van de drooghal kan hieruit worden afgelezen via een online tool van Fudura. Indien nodig kunnen ook gegevens uit een andere meetperioden afgelezen worden. Naast de online tool kan ook gebruik gemaakt worden van meterstanden die op de meters worden weer gegeven. Bij het begin van de meting zal de meterstand worden afgelezen en aan het eind van de meetperiode (eindstand minus beginstand is de ingebrachte warmte). Let op: het is mogelijk dat er meerdere warmtemeters aanwezig zijn zoals op locatie Beilen het geval is, in dat geval moet de ingebrachte warmte van alle warmtemeters bij elkaar opgeteld worden.

Luchttemperatuur bepalen

Naast het meten van de gewichten van het product en de ingebrachte warmte is het ook mogelijk een verschil in luchtkwaliteit waar te nemen in de hallen. Dit wordt gedaan met behulp van een thermometer waarmee de temperatuur op verschillende afstanden in de hal wordt gemeten. De afstanden die hiervoor genomen worden zijn 1 meter vanaf de achterkant van de hal, halverwege de hal en 1 meter vanaf de ingang van de hal. Dit wordt gedaan op 100 cm boven het 24 uur gedroogde digestaat. Hierna zal deze meting in de buitenlucht herhaald worden om het verschil waar te nemen tussen het begin en het eind van de lucht in het droogproces.

Berekenen van het rendement van de installatie

Voor de berekening van het rendement van het warmtegebruik wordt gekeken naar de hoeveelheid gewicht dat verdampt wordt, te zien in berekening 1. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van de maximale verdamping, dit is het maximale gewicht aan vocht dat met een bepaalde hoeveelheid warmte verdampt zou kunnen worden, deze berekening is weergegeven als berekening 2. Vervolgens kan met de uitkomsten uit berekening 1 en 2 het rendement berekend worden, ofwel het percentage aan gewicht dat daadwerkelijk verdampt is van de maximale verdamping. Dit is weergegeven als berekening 3.

Berekening 1.

Verdampt gewicht (kg):

Ingebracht product (kg) – afgevoerd product (kg)

Berekening 2.

Maximale verdamping (kg):

Totale warmte (MJ) / verdampingswaarde (MJ/kg)

Berekening 3.

Rendement (%):

Verdampt gewicht (kg) / Maximale verdamping (kg)

Bijlage 2. Dataset 1. 24-uurs meting

Tijd	Tijd in drooghal (u:mm:ss)	Drogestof (%)	Massa (kg)	Drogestof (kg)	Vocht (kg)	Massa verdampt vanaf instrooien (kg)	Verdampt per uur	Ingebrachte warmte vanaf instrooien (GJ)	Maximale verdamping vanaf instrooien (kg)	Rendement van de warmte (%)	Warmtemeter 1 (GJ)	Warmtemeter 2 (GJ)	Warmtemeter 3 (GJ)	Warmtemeter 4 (GJ)	Warmtemeter 5 (GJ)
09:15:00	0:00:01	23,25%	21.640	5.031	16.609	-	-	0	-	#####	62483	59641	868,22	837,47	20620,50
11:30:00	2:15:00	23,30%	21.594	5.031	16.562	46	21	6.393	2.834	1,6%	62483	59643	868,22	837,90	20624,46
13:45:00	4:30:00	24,46%	20.570	5.031	15.538	1.070	238	12.907	5.721	18,7%	62483	59645	868,22	838,45	20628,43
16:05:00	6:50:00	24,20%	20.790	5.031	15.759	850	124	20.498	9.086	9,3%	62483	59648	868,22	838,99	20632,48
17:20:00	8:05:00	25,48%	19.746	5.031	14.715	1.894	234	24.952	11.060	17,1%	62483	59650	868,22	839,33	20634,59
18:45:00	9:30:00	26,04%	19.321	5.031	14.290	2.319	244	28.914	12.817	18,1%	62483	59651	868,22	839,65	20637,23
20:00:00	10:45:00	29,39%	17.119	5.031	12.088	4.521	421	32.376	14.351	31,5%	62483	59652	868,22	839,91	20639,44
08:15:00	15:30:00	27,85%	18.032	5.022	13.010	3.568	230	47980	21.268	16,8%	62487	59691	868,94	847,72	20648,08
10:00:00	17:15:00	28,61%	17.553	5.022	12.531	4.047	235	53080	23.528	17,2%	62487	59693	868,94	848,05	20650,85
11:15:00	18:30:00	31,18%	16.106	5.022	11.084	5.494	297	56560	25.071	21,9%	62487	59694	868,94	848,32	20653,06
13:00:00	20:15:00	33,16%	15.145	5.022	10.123	6.455	319	62130	27.540	23,4%	62487	59696	868,94	848,71	20656,24
14:00:00	21:15:00	37,18%	13.507	5.022	8.485	8.093	381	65210	28.905	28,0%	62487	59697	868,94	848,95	20658,08
15:15:00	22:30:00	38,06%	13.195	5.022	8.173	8.405	374	68770	30.483	27,6%	62487	59698	868,94	849,24	20660,35
16:15:00	23:30:00	38,51%	13.041	5.022	8.019	8.559	364	72670	32.212	26,6%	62487	59700	868,94	849,46	20662,03
16:30:00	23:45:00	41,88%	11.991	5.022	6.969	9.609	405	72670	32.212	29,8%	62487	59700	868,94	849,46	20662,03
	Meting														
	Berekening														

Bijlage 3. Dataset 2. Meting per plaats

Plaats in hal	Locatie	Hal	Afstand	Massa gestrooid (kg)	Drogestofpercentage (%)	Massa na drogen (kg)	Verdampt gewicht (kg)	Ingebrachte warmte per hal (MJ)	Maximale verdamping per hal (kg)	Rendement (%)	Luchttemperatuur (°C)	Verschil temperatuur (°C)	Datum (dd/mm/jjjj)
W1A	Witteveen		1 Achter	7.620	88,066	2.606	5.014	30.000	13.297	37,7%	41,9	27	16-9-2021
W1M	Witteveen		1 Midden	7.620	89,413	2.566	5.054	30.000	13.297	38,0%	35	20,1	16-9-2021
W1I	Witteveen		1 Ingang	7.620	88,066	2.606	5.014	30.000	13.297	37,7%	20,4	5,5	16-9-2021
W2A	Witteveen		2 Achter	8.260	89,904	2.767	5.493	30.000	13.297	41,3%	47,5	32,6	16-9-2021
W2M	Witteveen		2 Midden	8.260	94,737	2.626	5.634	30.000	13.297	42,4%	37,5	22,6	16-9-2021
W2I	Witteveen		2 Ingang	8.260	92,348	2.694	5.566	30.000	13.297	41,9%	22,4	7,5	16-9-2021
Buiten	Witteveen	Buiten	Buiten	7.620+8.260	30,114						14,9		16-9-2021
B1A	Beilen		1 Achter	8.000	95,71	2.023	5.977	43.000	19.060	31,4%	40,5	30,5	8-11-2021
B1M	Beilen		1 Midden	8.000	95,71	2.023	5.977	43.000	19.060	31,4%	35,5	25,5	8-11-2021
B1I	Beilen		1 Ingang	8.000	63,67	3.041	4.959	43.000	19.060	26,0%	25	15	8-11-2021
B2A	Beilen		2 Achter	10.080	95,05	2.566	7.514	43.000	19.060	39,4%	42	32	8-11-2021
B2M	Beilen		2 Midden	10.080	89,7	2.719	7.361	43.000	19.060	38,6%	35	25	8-11-2021
B2I	Beilen		2 Ingang	10.080	57,76	4.223	5.857	43.000	19.060	30,7%	23,8	13,8	8-11-2021
Buiten	Beilen	Buiten	Buiten	8.000+10.080	24,2						10		8-11-2021
	Meting												
	Berekening												