



Balansen voor substraat in de champignonteelt

Metingen per laag en in de tijd

C. Blok¹, A. Elings¹, A. Sonnenberg², J. Amsing³, E. Nederhoff¹, R. Khodabaks¹

¹ Wageningen UR Glastuinbouw

² Plant Research International

³ Bas van Buuren Substrates



Referaat

Een groot aantal metingen uit de glastuinbouw zijn toegepast in combinatie met in de champignonteelt bekende metingen. Dit is gerealiseerd in een experiment in een teeltcel van Unifarm te Wageningen. De dataset leverde informatie over de opzet van de metingen, teeltbalansen en de benutting van organische voedingsstoffen.

Uit de compost komt per vierkante meter 2.5 kg.m^{-2} koolstof vrij en er wordt 2.7 kg.m^{-2} koolstof afgevoerd als respectievelijk koolzuurgas (1.5 kg.m^{-2}) en geogoste champignon (1.2 kg.m^{-2}). De aanvoer van water uit de compost bedraagt 53 l.m^{-2} en de afvoer via ventilatie en champignons is 53 l.m^{-2} . De aanvoer is opgebouwd uit watergift, vochtverlies compost en verbrandingswater (respectievelijk 37, 12 en 4 l.m^{-2}). De afvoer is onderverdeeld in ventilatie-afvoer en afvoer in de champignons (respectievelijk 23 en 30 l.m^{-2}). De energiebalans laat zien dat uit de compost 77 MJ.m^{-2} vrijkomt en dat 60 MJ.m^{-2} wordt afgevoerd in waterdamp. De minerale voedingsbalans toont een levering uit compost van 16 mol.m^{-2} en een afvoer in champignon van 12 mol.m^{-2} .

De benutting van de organische stof wordt niet meer zoals gebruikelijk uitgedrukt op (de veranderlijke) hoeveelheid droge stof, maar in absolute hoeveelheid per vierkante meter teeltbed. Zo blijkt dat de benutting van hemicellulose praktisch 100% is en de benutting van cellulose 40%. Dit betekent dat de benutting van compost alleen verbeterd kan worden door de te verteren fracties te verhogen, niet door de compost zonder meer te hergebruiken.

Abstract

Many measurements from horticulture and mushroom growing were combined in an experiment at Unifarm in Wageningen. The data gave much information on appropriate measurements, on mass and energy balances and on the efficiency of using the various organic fractions.

Compost delivers 2.5 kg.m^{-2} of carbon and releases 2.7 kg.m^{-2} carbon in the form of carbon dioxide (1.5 kg.m^{-2}) and harvested mushrooms (1.2 kg.m^{-2}). Water released from the substrate is 53 l.m^{-2} while the amount ventilated and found in mushrooms is 53 l.m^{-2} . The supply is split into water supplied, loss from compost and digestive water (respectively 37, 12 and 4 l.m^{-2}). The output is ventilation and water in fresh mushrooms (respectively 23 and 30 l.m^{-2}). The energy balance shows a combustion energy of 77 MJ.m^{-2} for compost digested and 60 MJ.m^{-2} trapped in water vapour. 16 mol.m^{-2} of minerals disappear from the compost of which 12 mol.m^{-2} are found back in the mushrooms.

The fractions in the organic nutrition are no longer expressed as a fraction of the dry matter as dry matter is changing over time by digestion. Instead data are reported in absolute quantities per square meter of bed. Thus it is shown the amount of hemicellulose is almost totally digested whereas just 40% of the cellulose is digested. Thus the efficiency of compost use can be increased by adding digestible fractions but not by re use without additions.

2010 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO).

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
: Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317 - 48 56 06
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5		
	1.1	Achtergrond	5	
	1.2	Doelstelling van het project	5	
	1.3	Aanpak	6	
	1.4	Organisatie	6	
2	Methode	7		
	2.1	Klimaat van de cel	7	
	2.2	Het teeltsysteem	7	
	2.3	Metingen	9	
	2.4	Plaatsing sensoren	12	
	2.5	Balans berekeningen	13	
		2.5.1	Koolstofbalans	13
		2.5.2	Waterbalans	14
		2.5.3	Energiebalans	15
		2.5.4	Minerale voedingsbalans	15
		2.5.5	Een eerste model	15
3	Resultaten	17		
	3.1	Koolstofbalans	18	
	3.2	Waterbalans	20	
	3.3	Energiebalans	22	
	3.4	Balans voor minerale voeding	22	
	3.5	Organische voedingsanalyse van de Compost	24	
	3.6	Mycelium	31	
	3.7	Zuurstofmetingen	32	
	3.8	pH-metingen	33	
	3.9	Laagdikte, droge bulk dichtheid, OM en as	34	
	3.10	Het model	34	
4	Discussie	35		
	4.1	Organische voeding	35	
	4.2	Minerale voeding	36	
	4.3	Vochtmetingen	37	
	4.4	De balansen voor koolstof, water, energie en minerale voeding	38	
5	Conclusies	39		
	5.1	Conclusies	39	
	5.2	Lessen uit losse metingen	39	
	5.3	Aanbevolen meetplan	40	
	5.4	Verdere proeftechnische aanbevelingen	40	
	5.5	Aanbevelingen voor vervolg	40	
6	Literatuur	41		

Bijlage I	Metingen	43
Bijlage II	Ventilatiesnelheid	45
Bijlage III	Details van de balans berekeningen	49
Bijlage IV	Watergehalte metingen	51
Bijlage V	Opname van organische voeding	53
Bijlage VI	Een rekenmodel voor champignons	55

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Nederlandse champignontelers hebben collectief het terugdringen van het gebruik van compost als belangrijkste strategische doel voor 2010-2012 gesteld. Een belangrijke reden is dat compost tot veertig procent aan hun productiekosten bijdraagt. Ook streven de champignontelers naar een betere marktpositie door een kennis intensiever teeltsysteem.

Het efficiënter gebruik van compost is daarnaast maatschappelijk van belang. Vooral het veen in de dekaarde speelt hierbij een rol. Veen is een niet hernieuwbare grondstof en daardoor een bron van koolzuurgas emissie. In Nederland werd in 2009 ca 230.000 ton champignons geproduceerd (volumestromen in deze paragraaf mondeling door A. Sonnenberg). Hiervoor is 622.000 ton fase III compost gebruikt en 336.000 ton dekaarde. Bij een teeltoppervlak van 756.000 m² is dit een gebruik van ca 825 kg compost.m² en 444 kg dekaarde.m² per jaar. Een reststroom van 775.000 ton champost wordt op grote schaal in de akkerbouw gebruikt als grondverbeteraar maar moet concurreren met dierlijke mest en is nu een kostenpost voor de telers. Het volume champost is ca 1.500.000 m³ waarvan 20-30% veen is.

Het teeltsysteem voor champignons is gebaseerd op omzetting van organische stof uit compost naar onder ander biomassa in champignons. De organische stof is de primaire voeding voor de champignon, dit ter onderscheid van de minerale voeding. De omzettingprocessen zijn complex en hebben een aantal beperkingen, zoals:

- een zéér onvolledige omzetting van de totale compost
- een ongelijk gebruik van compost over de bed hoogte
- onvoorspelbare effecten van compost kwaliteit op paddenstoelen kwaliteit en kwantiteit.

In de afgelopen 75 jaar is kennis over champignonteelt gegeneerd op diverse plekken in de wereld (overzicht door Baars en Sonnenberg, 2009). Toch is de kennis over groei en organische en minerale voedingsbehoefte van champignons nog minder samenhangend dan nodig om compost efficiënter te gebruiken.

In de teelt van glastuinbouwgewassen is ervaring opgedaan met samenhangende metingen verricht aan productiesystemen, bovengronds en ondergronds, en zijn balansen opgesteld die de basis hebben gelegd voor innovaties. De meetmethoden en de daarbij behorende sensoren lijken ook te kunnen worden gebruikt in de champignonteelt. In dit verslag wordt beschreven hoe met glastuinbouw technieken balansen voor koolstof, water en minerale voeding kunnen worden opgesteld. De gevonden waarden worden besproken en gebruikt om een nieuw theoretisch kader op te zetten.

1.2 Doelstelling van het project

- Het on line meten van de wateraanvoer, watergehalten, wateropname en waterafvoer in een teeltbed.
- Het on line meten van de minerale voedingsaanvoer, minerale voedingstoestand, minerale voedingsopname en minerale voedingsafvoer in een teeltbed.
- Het opstellen van balansen voor koolstof, water en minerale voeding.

Hierbij is voor het LNV beleid nog het volgende van belang:

- Een verlaagd gebruik van veen (als bron van koolzuurgas emissie i.e. veen is een niet hernieuwbare grondstof).
- Een verlaagde kostprijs voor champignonteelt door het meer efficiënt gebruik van compost, en eventueel in de toekomst het gebruik van een alternatieve (vloeibare) organische en minerale voeding.
- Een betere positie van de Nederlandse champignontelers door een kennisintensiever teeltsysteem.

1.3 Aanpak

Technieken en kennis uit de glastuinbouw worden ingezet voor het opstellen van balansen die de basis zijn voor het beter beschrijven en vernieuwen van teeltsystemen. Er wordt in een champignonteeltcel aan verschillende kisten een serie metingen uitgevoerd. Eén kist wordt opgehangen aan load cells die het gewicht registreren. Continu vocht / EC / temperatuurmeters worden ingezet in verschillende lagen (hoogten) in de compost. Hiernaast worden minerale voedingsmonsters genomen van de compost zodat naast het globale minerale voedingsverloop ook een indruk ontstaat van het verloop per element. Flankerend worden labanalyses gemaakt van de compost en de afbraaksnelheid van de doorgroeide compost. Tenslotte worden balansen opgesteld voor koolstof, water en minerale voedingszouten.

In een samenwerking van WUR-Glastuinbouw en de WUR-Plant Breeding zijn de metingen verricht bij een champignonteelt bij Unifarm in Wageningen tussen 15 juni en 16 juli 2010 (Input/Output experiment).

1.4 Organisatie

De BegeleidingsCommissie Onderzoek, BCO, omvatte vertegenwoordigers van de telers (Niek Franzmann), composteerders (John Ebben; CNC), certificeerders (Hans Verhagen; RHP), bijvoeding (Bart de Leeuw; MC-Substradd) en de teeltvoorzichting (Jan Gielen; DLV).

2 Methode

2.1 Klimaat van de cel

Er is gebruik gemaakt van een champignoncel in het complex van Unifarm in Wageningen tussen 15 juni en 16 juli 2010.

De ruimtetemperatuur wordt tijdens de myceliumgroei tot afventileren tussen de 21 – 23 °C gehouden. De luchttemperatuur wordt gebruikt om de temperatuur van dekaarde en compost tot afventileren tussen de 22 – 23 °C te houden om vroegtijdige knopvorming te voorkomen. Bij afventileren start een geleidelijke afbouw met 0,0750 °C.uur⁻¹ tot 18 °C luchttemperatuur. Deze wordt aangehouden tot het einde van de teelt.

De composttemperatuur is van belang voor de myceliumgroei en heeft een scherp optimum bij 24 °C (Baars en Sonnenberg, 2009). De composttemperatuur is niet direct instelbaar en is een resultante van de warmteproductie in het compost en de afvoer van warmte. De afvoer van warmte gebeurt hoofdzakelijk door verdamping van water. De afvoersnelheid hangt af van het celklimaat, verversing en vochtgehalte en laagdikte van de compost.

In de cel wordt tot afventileren een RV van 95% aangehouden met CO₂ > 3000 ppm. Er is geen ventilatie zolang dit niet vereist is voor de koeling. Na afventileren wordt de RV ingesteld op 90 – 92% en wordt het CO₂ gehalte op 1000-1200 ppm gehouden.

2.2 Het teeltsysteem

Een champignonbed is opgebouwd in twee lagen (Figuur 1.). De bovenlaag, de dekaarde bestaat uit een mengsel van zwartveen, bolsterveen en schuimaarde. De tweede laag is de compost die bestaat uit stro, strorijke paardenmest, kippenmest en gips.

De dekaarde heeft een typerende laagdikte van 6 cm, met een dichtheid van 600 kg.m⁻³ (droge dichtheid 150-200 kg.m⁻³). De functie van de laag is het initiëren van de knopvorming van de champignons en het leveren van water voor de uitgroei van de champignons. De knopvorming wordt waarschijnlijk geïnitieerd door het wegvangen van een knopvorming onderdrukkende stof (Noble et al., 2003). De vochtberging is bij aanvang ongeveer 75% v/v. Het vochtbergend vermogen neemt af in de tijd tot 40-50% v/v omdat de met mycelium doorgroeide dekaarde vocht afstotend wordt. Let wel in de champignonteelt wordt dit vochtgehalte soms in % w/w gerapporteerd. Dit verhuut de rol van luchtgevulde ruimte. Uitleg; als de dichtheid van de compost hoog is wordt een lager vochtgehalte w/w opgegeven terwijl het mycelium een hoger vochtgehalte v/v en lager luchtgehalte v/v ervaart. Bij een compost met enig zand zou 40% vocht w/w te nat kunnen zijn!

De compost heeft een typerende laagdikte van 20 cm met een dichtheid van 425 kg.m⁻³ (droge dichtheid 150-200 kg.m⁻³). De functie van de compost is het reguleren van de temperatuur, het aanbieden van vocht en het aanbieden van minerale voeding en koolstof uit de afbraak van organisch materiaal. De temperatuur is een resultante van de door vertering opgewekte warmte en de warmteafgifte aan de omgeving. De afvoer van de gegenereerde warmte gebeurt door verdamping, evaporatie en convectie. De laagdikte heeft een sterke invloed op de convectie zodat bij een dikkere laag al snel hogere temperaturen optreden die funest zijn voor de groei van de champignons (Baars en Sonnenberg, 2009). Een dunnere laag leidt tot te lage temperaturen die de knopvorming sterk vertragen (Baars en Sonnenberg, 2009). Om de optimum temperatuur te behouden kan worden gedacht aan warmtetoever bij geringere laagdikte / warmteafvoer bij grotere laagdikte.

Een teeltcel heeft meestal 6 teeltlagen in stellingen met bedden van 1.2 x 3.0 m (breedte x hoogte) en midden- en zijpaden van 0.8 m. Hiermee heeft een champignonbedrijf 3 m² bed per m² cel oppervlakte. Met 18 cm compost van 350 kg.m⁻³ en 6 cm dekaarde van 200 kg.m⁻³ betekent dit bij 8 teelten per jaar een verbruik van 1600 kg dekaarde en compost per vierkante meter cel per jaar. Voor het teeltoppervlakte cel van 200 ha in Nederland in 1995 betekent dit een jaarlijkse uitstoot van 500.000 ton champost (1.2 Mio m³ compost en 0.5 Mio m³ veen). De champost wordt op grote schaal in de akkerbouw gebruikt als grondverbeteraar (Pardo et al., 2004; Wever et al., 2005).

In de teeltcel van dit experiment zijn stellingen met vijf teeltlagen gebruikt waarin 80 kisten stonden van ongeveer 60 x 40 x 25 cm. In elke kist is de compost laag verdeeld in drie deellagen van 6 cm dikte, te weten boven (B), midden (M) en onder (O). De laag dekaarde en de drie compostlagen zijn van elkaar gescheiden door plastic gaas met een maasbreedte van 3 mm. Dit gaas is bekend als scheiding in voorgaande experimenten en stoorde toen de myceliumgroei niet. Door het gebruik van het gaas is het mogelijk laagdikte en gewicht per laag met voldoende nauwkeurigheid in de tijd te volgen.

De meest metingen in het hier beschreven experiment zijn verricht aan drie lagen in de compost. Dit omdat verschillen in temperatuur, water en koolzuurgas per laag leiden tot verschillen in vertering en minerale voedingsopname (Gerrits, 1969). Het vermoeden bestaat dat de bovenlaag door een teelt wordt uitgeput terwijl de onderlaag nog bruikbaar voor een vervolgteelt blijft. Het opnieuw mengen van de compost na een eerste vlucht door Royse, 2010, werkte inderdaad opbrengst verhogend en een additionele bijvoeding met compost bleek de opbrengst in een tweede vlucht te verdubbelen (Royse, 2010). Als bekend wordt wat in het bovenste deel van de compost uitgeput raakt, kan het productiesysteem gericht worden aangepast.

Tabel 1. De metingen.

Metingen	Onderwerp	Meetmethode	Nr	Frequentie
Kistgewicht	compost + dek	Load cels	4	5-15 minuten
Watergehalte	Compost	FD-meter	4	5 minuten
EC	compost	FD-meter	4	5 minuten
Temperatuur	compost	FD-meter	4	5 minuten
pH	compost	pH electrode	3	5 minuten
Zuurstof	compost	Fiber optics	3	3
Hoofd en sporen elementen	compost	1:1,5 extract	3	7 momenten
Hoofd en sporen elementen	compost	Totaal analyse	3	7 momenten
Watergehalte	compost	Wegen na oven	3	7 momenten
Gehalte OM	compost	Wegen na oven		7 momenten
As	compost	Wegen na oven		7 momenten
Compost Fracties OM	compost	NIR NDF/ADF/ADL etc.)	1	7 momenten
Compost mycelium	compost	Ergosterol HPLC	2	7 momenten
Compost Fysisch	compost	Bulk Dichtheid, OM, as	1	7 momenten
Compost Fysisch	compost	Wegen na oven		7 momenten
Dekaarde	dekaarde	Wegen na oven		7 momenten
Dekaarde	dekaarde	Ergosterol HPLC		7 momenten
RV in	cel	RH meter Vaisala	1	5 minuten
RV out	cel	RH meter Vaisala	1	5 minuten
CO ₂ in	cel	NIR koolzuurmeter	1	5 minuten
CO ₂ out	cel	NIR koolzuurmeter	1	5 minuten

Metingen	Onderwerp	Meetmethode	Nr	Frequentie
volume in	cel	flow meter	1	5 minuten
volume out	cel	flow meter	1	5 minuten
T cel	cel	Pt 100	1	5 minuten
RV ruimte	cel	RH meter Vaisala	1	5 minuten
Wateraanvoer	cel	Flowmeter	1	5 minuten
Gewicht	champignon	Wegen na oven	1	5
Droge stof	champignon	Wegen na oven	1	5
Totaal analyse	champignon	Totaal analyse	1	5
Gewicht	champignon voetjes	Wegen na oven	1	5
Droge stof	champignon voetjes	Wegen na oven	1	5
Laagdikte	compost	Rolmaat	3	7
Afbreekbaarheid	compost	OUR	3	7

2.3 Metingen

In Tabel 1. staan de uitgevoerde metingen (uitgebreidere tabel in Bijlage 1).

Het volumegewicht compost. Het droge volumegewicht van de compost is een bijzonder moeilijke waarde om te meten. Tijdens de teelt verandert de droge dichtheid doordat materie verdwijnt en wordt omgezet volgens de formule:



Het grootste gedeelte van de organische stof die verdwijnt, is koolstof uit suikers in polysachariden. De koolstof verdwijnt als koolzuurgas door vertering en een ander deel wordt omgezet in mycelium. Daarom is de dichtheid op verschillende manieren gemeten; met vooraf ingebrachte ringen, als laagdikte en laaggewicht, en in los gestoken monsters.

Het koolstofgehalte. Zowel conversies van compost organische stof als van champignons zijn berekend op aangenomen koolstofgehalten. Voor compost organische stof is verondersteld dat $C_6H_{12}O_6$ is verteerd (dat is natte verbranding). Het C-gehalte is geschat op 50% vanuit de ervaring dat het organische stof gehalte in stabiel hout 58% is. Omdat stro hiermee overeenkomt is een schatting van 50% gemaakt. Dit bleek in metingen achteraf inderdaad 50% te zijn. Voor champignon is ook met een geschatte waarde van 50% gewerkt. Dit bleek in metingen achteraf 48% te zijn.

De laagdikte. De laagdikte in de loop van de tijd is gemeten als een maat voor de vertering. Omdat het mycelium de laagdikte enigszins fixeert, was de verwachting dat de laagdikte in de loop van de tijd minder af zou nemen dan de dichtheid.

Asgehalte. In een oven wordt een monster van bekend volume en gewicht gedroogd (24 uur, 80 graden). Dit levert het vochtgehalte in het oorspronkelijke monster. Dan wordt het monster verast (24 uur, 500 graden). De verloren massa levert het organische stof gehalte van het oorspronkelijke monster en de overgebleven massa is het asgehalte, i.e. de minerale delen in het oorspronkelijke monster. As kan bestaan uit zand en kleidelen en uit minerale zouten als kaliumsulfaat en calciumfosfaat.

NIR gerelateerde metingen (NDF, ADF, RF). Dit zijn oorspronkelijk klassieke natchemische bepalingen uit de veevoederindustrie bedoelt om de verteerbaarheid van veevoer voor vee te testen, met name de vertering van gras in de pens van runderen. NDF staat voor dat deel van de organische stof dat achterblijft na spoelen met een neutrale oplossing, voornamelijk cellulose, hemicellulose en lignine. Het deel dat verdwijnt door spoelen met neutrale oplossing zijn de zouten en de kleine organische moleculen waaronder pectine, glucanen en oplosbare eiwitten. ADF staat voor dat deel van de organische stof dat vervolgens achterblijft na spoelen met een zure oplossing en bevat voornamelijk cellulose en lignine. Het hemicellulose gehalte wordt benaderd als NDF-ADF. ADL is de ligninefractie. De cellulosefractie tenslotte is te berekenen als ADF-ADL. De fractie RF staat voor Raw Fibre en is een volkomen andere fractionerings methode uit het veevoederonderzoek die voor de champignonteelt minder van belang lijkt. De bepalingen worden nu uitgevoerd in een oplossing die met near infra rood (NIR) spectroscopy wordt doorgemeten. De NIR methode is geïkht voor de te onderzoeken compost op basis van de klassieke nat chemische bepalingen.

Minerale voedingsanalyse, EC en pH. Dit zijn chemische bepalingen uit de tuinbouw. Het gaat hier om een extract volgens de 1:1,5 methode. Hierbij wordt aan 100 ml volume van het monster 150 ml water toegevoegd. In dit geval betekent het dat het om een losgemaakt monster gaat dat door het laboratorium op een standaard manier weer is verdicht. Als het monster bij aanvang 50-70% vocht bevat is de verdunning 3.5 tot 4 keer. De berekening is $(150+70)/70=3.5$ en $(150+50)/50=4$ (alle vocht gedeeld door vocht bij aanvang). Omdat het mycelium van de champignon direct in contact staat met de bodemoplossing ervaart het mycelium concentraties die 3,5-4 keer zo hoog zijn als het laboratorium meet. Voor de champignonteelt zou het persvocht uit het substraat waarschijnlijk een beter beeld geven.

Totaal minerale voedingsanalyse. Ook dit is een chemische bepaling uit de land- en tuinbouw. Hierbij wordt het gehele monster in koningswater opgelost en worden in de ontstane vloeistof de gehalten van alle mineralen gemeten. Het gehalte aan stikstof wordt aan hetzelfde monster op een andere manier gemeten. Hierdoor ontstaat een indruk van de hoeveelheid minerale voedingszouten die op elk moment aanwezig is, zij het dan dat niet alle elementen die zo gemeten worden ook opneembaar zijn voor de champignon (daar dient de minerale voedingsanalyse in het 1:1,5 extract voor).

Koolzuurgas ammonium en pH. De pH in de compostlagen is gemeten met een continu pH meter. De aansluiting van de glas electrode met het substraat is gerealiseerd door een kousje van polypropyleenvezel over de sensortip te schuiven.

De pH wordt in het geval van verterende compost bijna voor 100% bepaald door de concentratie koolzuurgas rond de sensor volgens de reactie:



Omdat de concentratie koolzuurgas zo hoog is (1000-100.000 ppm), blijft de pH tijdens de teelt tussen de 5.3 en 5.8 hangen (Figuur 23). Zodra de compost droog wordt, wordt het geproduceerde koolzuurgas afgevoerd naar de buitenlucht. De pH zal dan snel oplopen naar ongewenste waarden. Het is ook daarom van belang de compost goed nat te houden.

De pH van compost moet tijdens de teelt laag blijven om de vorming van ammonia uit ammonium te voorkomen volgens de reactie:



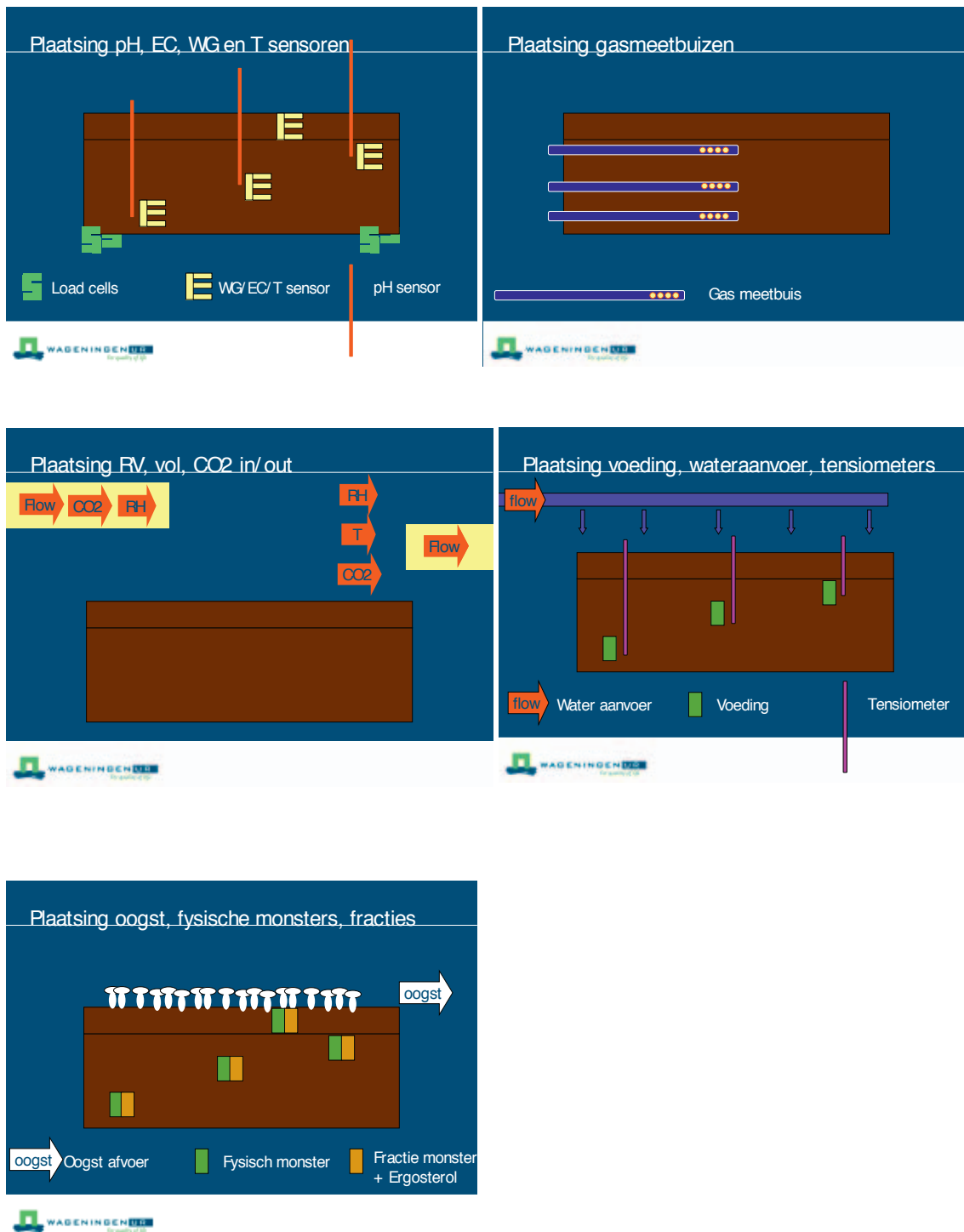
Ammonia is sterk toxisch voor de champignon. Een andere reden om de omzetting van ammonium naar ammonia te vermijden is dat ammonia als gas de compost zal verlaten. Hoge ammoniumgehalten zijn nodig omdat de champignon stikstof alleen als ammonium en niet als nitraat kan opnemen.

Vochtgehalte, EC temperatuur. Deze zijn op verschillende manieren gemeten; gewicht door weging met loadcellen onder één kist en door on line FD metingen (Frequency Domain). On line FD meet vochtgehalte, EC en temperatuur tegelijk en levert in beginsel de meeste informatie. Vocht is van belang voor het reguleren van de temperatuur van de compost, het oplossen van minerale voeding en het vasthouden van koolzuurgas in de compost. De temperatuur wordt bijna helemaal gereguleerd door verdamping aan de oppervlakte van de compost. De minerale voedingsconcentratie bij het mycelium neemt toe als het vochtgehalte daalt. De pH loopt op bij dalend vochtgehalte door verloop van het koolzuurgas evenwicht in formule 2.

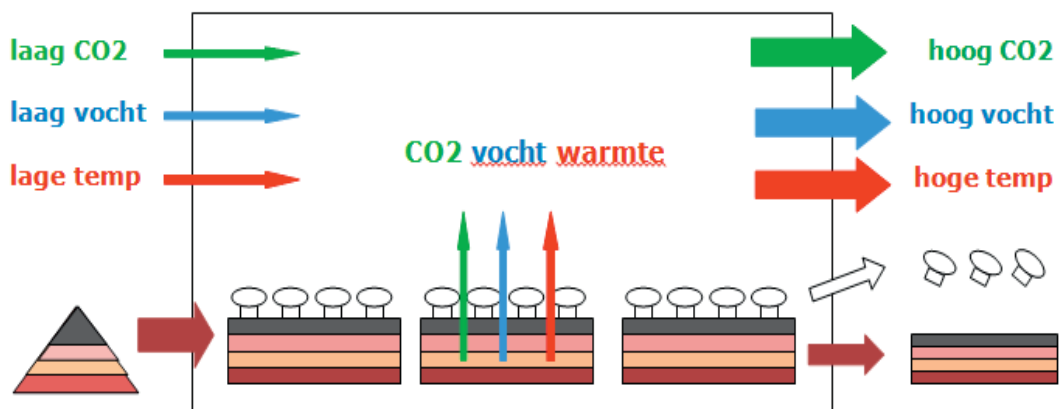
Ergosterolgehalte. Ergosterol is een vitamine D precursor en komt voor in de celwand van schimmeldraden maar niet in planten- of dierencellen. Ergosterol wordt in de voedselveiligheid vaak gebruikt als maat voor de hoeveelheid schimmeldraad in voedingsmiddelen. De methode moet nog worden geoptimaliseerd voor compost. De meting levert mg ergosterol per g droge compost. Bij een aangenomen ergosterolgehalte van 7.5% (mondeling A. Sonneveld) kan zo worden geschat hoeveel mycelium in de compost aanwezig is. De hoeveel koolstof en water in het mycelium zijn niet meer beschikbaar voor vertering respectievelijk wateropname.

2.4 Plaatsing sensoren

Figuur 1. toont waar de verschillende sensoren zijn geplaatst en waar monsters zijn genomen.



Figuur 1a-e. Plaatsing van de sensoren in de kisten en in de cel.



Figuur 2. Schematische voorstelling van koolstofbalans, vochtbalans en warmtebalans.

2.5.1 Koolstofbalans

Voor deze studie wordt de cel als systeem genomen en worden de volgende koolstof stromen onderscheiden: koolstof die binnengebracht wordt met de compost en dekaarde; koolstof die binnenkomt met de ventilatielucht; koolstof die wordt ingebouwd in de champignons en gedeeltelijk wordt afgevoerd via geogst product (waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen verkoopbaar product en de voetjes); koolstof die wordt afgevoerd als CO₂ gas via ventilatie, en koolstof die op het einde wordt afgevoerd in de overblijvende compost en dekaarde. De balans moet sluitend zijn. In het kort:

Koolstof balans : koolstof aanvoer = koolstof afvoer

Koolstof aanvoer = in ingebrachte compost & dekaarde + CO₂ in ventilatie

Koolstof afvoer = in geogste champignons + CO₂ in ventilatie + rest compost & dekaarde

Het is moeilijk om de snelheden van de koolstofstromen direct te meten. Daarom worden de snelheden berekend uit waarnemingen aan de hoeveelheden (integralen) van de compost (aan- en afvoer), geogste champignons en ventilatiemetingen. Aan de compost zijn veel waarnemingen gedaan waaronder metingen van de dichtheid (kg.m⁻³), de afname van de laaghoogte (mm), watergehalte (v/v %), gehalten aan water en organische stof (% g/g) en aan organische stof en as (% g/g). Een nadeel van de vele verschillende metingen is dat het veel rekenwerk kost alles weer in één eenheid uit te drukken.

De compostdata zijn apart bepaald voor drie lagen compost. Voor de balansstudie zijn de data van die drie lagen gemiddeld. Het zou onoverzichtelijk zijn om de informatie per laag en per datum te laten zien en draagt niet bij aan het totaaloverzicht. Om een gedetailleerd inzicht te krijgen in processen in de compost is deze informatie wel nuttig.

Een deel van de koolstof die was vrijgekomen uit de compost was opgenomen door de paddenstoelen, en hiervan werd een groot deel uit de cel afgevoerd bij de oogst. Een ander deel van de opgenomen koolstof zat in het mycelium, en werd aan het eind van de proef afgevoerd met de compost. De koolstof in het mycelium is later gekwantificeerd via het ergosterolgehalte van de compost maar niet in de balansberekening meegenomen. Dat is ook niet nodig omdat de biomassa gevormd door het mycelium in de organische stof meting is meegenomen. Voor het begrijpen van het functioneren van het systeem is dit weer wel belangrijk. De koolstof in de oogst werd als volgt berekend:

$$\text{koolstof afvoer} = \text{ge oogste champignons gewicht} \times \text{droge stof percentage} \times \text{koolstofgehalte}$$

De koolstof die vrijkwam uit de compost werd voor een deel afgevoerd als CO₂ gas via ventilatie. Doordat de compost steeds CO₂ afgeeft, is de CO₂ concentratie in de cel meestal hoger dan buiten. Ventilatie is luchtuitwisseling, waarbij CO₂-rijke binnenlucht wordt vervangen door CO₂-arme buitenlucht. Dit veroorzaakt een netto CO₂-afvoer. De CO₂-afvoer hangt af van het verschil in CO₂-concentratie tussen binnen en buiten, en van de ventilatiesnelheid, als volgt:

$$\text{koolstof afvoer} = \text{ventilatiesnelheid} \times (\text{CO}_2 \text{ gehalte binnen} - \text{CO}_2 \text{ gehalte buiten})$$

De ventilatiesnelheid werd berekend uit twee luchtstromen (namelijk aanvoersnelheid minus recirculatiesnelheid), die beide waren gemeten via de AEM computer. De verwerking van de recirculatieflow is overgenomen van AEM zonder sluitend theoretisch kader. Een andere plaatsing van de sensoren zou hier veel moeite en onzekerheid opheffen.

2.5.2 Waterbalans

De waterbalans kan berekend worden op een vergelijkbare wijze als de koolstof balans. Er zijn geen gegevens van luchtbevochtiging door water op de celvloer en luchtontvochtiging door condensatie opgenomen. De balans bestaat dan uit de volgende stromen:

$$\begin{aligned} \text{water balans teeltcel:} & \text{aanvoer water in cel} = \text{afvoer water uit cel} \\ \text{aanvoer} & = \text{in compost \& dekaarde} + \text{sproeien} + \text{uit verbranding} \\ \text{afvoer} & = \text{via ventilatie} + \text{in oogst} + \text{in restant compost \& dekaarde} + \text{condensatie} \end{aligned}$$

Het watergehalte (% v/v) van compost is bepaald bij analyse van enkele kisten maar volgt ook uit de gegevens over dichtheid (kg.m⁻³) en gehalten aan water (% g/g) en laagdikte (mm). Sproeien is geregistreerd als liter.m⁻², waarbij is aangenomen dat 5% naast de kisten terecht komt, en dat een kist gelijk is aan 0.2 m². De verandering van vochtgehalte in de compost is een goede maat voor het vochtverlies maar omdat het volume compost in de tijd afneemt moet daarvoor gecompenseerd worden. De vertering van de verdwenen compost is een verbrandingsproces waarbij per eenheid CO₂ ook steeds een eenheid H₂O vrijkomt.

Het watergehalte van geoogste champignons bleek 92.5%. Vochtafvoer via ventilatie is vergelijkbaar met CO₂ uitwisseling via ventilatie, en wordt als volgt berekend:

$$\text{Netto vochtafvoer} = \text{ventilatiesnelheid} \times (\text{vochtgehalte binnen} - \text{vochtgehalte buiten})$$

Een andere manier om de waterbalans op te stellen is om van de kisten uit te gaan volgens:

$$\begin{aligned} \text{water balans kisten:} & \text{water aanvoer kisten} = \text{water afvoer kisten} \\ \text{water aanvoer} & = \text{water in compost bij start} + \text{sproeien (irrigeren)} + \text{condensatie op dekaarde} \\ \text{water afvoer} & = \text{water in compost einde} + \text{water in champignons bij de oogst} + \text{verdamping} \end{aligned}$$

2.5.3 Energiebalans

De energiebalans kan berekend worden uit enerzijds de verbrandingswarmte van de verteerde compost en anderzijds de energie onttrekking door verdamping. De verbrandingswaarde van de compost is onbekend maar is voorlopig gesteld op de verbrandingswaarde van droog hout, 15 MJ.kg^{-1} . Deze energie moet worden afgevoerd om de temperatuur van compost en cel in de hand te houden. Dat gebeurt voornamelijk in de vorm van verdamping. De verdamping van water vraagt ongeveer 2500 kJ.L^{-1} . De balans bestaat dan uit de volgende stromen:

$$\begin{aligned} \text{energie balans kist: } & \text{verbranding compost} = \text{verdampingswaarde water} \\ \text{aanvoer} & = \text{gewichtsverlies compost} \times \text{verbrandingswaarde} \\ \text{afvoer} & = \text{verdampmt water} \times \text{verdampingswaarde} \end{aligned}$$

2.5.4 Minerale voedingsbalans

De minerale voedingsbalans is berekend uit de afname van minerale voeding in de totaalanalyse van de compost. Deze bestaat uit twee stappen namelijk de meting van de totaalanalyse die gegevens levert per kilogram droge stof, en de vermenigvuldiging met de resterende kilogrammen droge stof. Let hierbij op dat het gaat om de kilogrammen droge stof en niet om de kilogrammen droge organische stof! De hoeveelheid minerale voeding kan worden uitgedrukt in vele eenheden zoals kilogrammen of molen per volume, per gewicht en per oppervlakte. Om eenheid met de overige balansen te krijgen en om inzicht in de behoefte van een teeltlaag champignons te hebben, wordt hier gewerkt met oppervlakte.

$$\begin{aligned} \text{minerale voedingsbalans kist: } & \text{minerale voeding bij aanvang} - \text{minerale voeding bij einde} \\ \text{aanvoer} & = \text{mol per kilogram DS} \times \text{kilogram DS.m}^2 \text{ (bij aanvang teelt)} \\ \text{afvoer} & = \text{mol per kilogram DS} \times \text{kilogram DS.m}^2 \text{ (bij einde teelt)} \end{aligned}$$

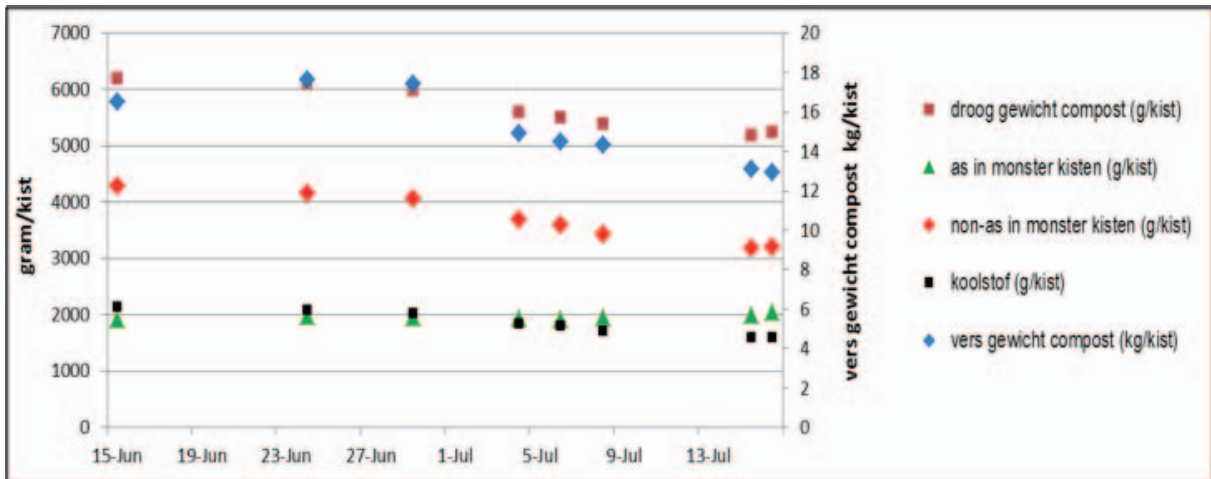
2.5.5 Een eerste model

De gegevens die in het input-output project zijn verzameld zijn gebruikt om een rekenmodel voor de teelt van champignons te maken. Het rekenmodel houdt nauwkeurig bij wat de verschillende bronnen en bestemmingen van C en H_2O zijn, en wat de diverse gewichten zijn. Een rekenmodel is een nuttig middel om goed in beeld te krijgen wat er zich precies afspeelt tijdens de teelt van champignons. Omdat het model is gebaseerd op de metingen van de input-output proef, komen de figuren overeen met wat eerder in dit rapport is gepresenteerd.

Een rekenmodel kan worden gebruikt om te verkennen wat de gevolgen zijn van een ander vulgewicht, meer ventilatie, etc. Op dit moment wordt volstaan met een relatief eenvoudige presentatie van het rekenmodel, waarbij het voornaamste doel is om de gedachten te ordenen.

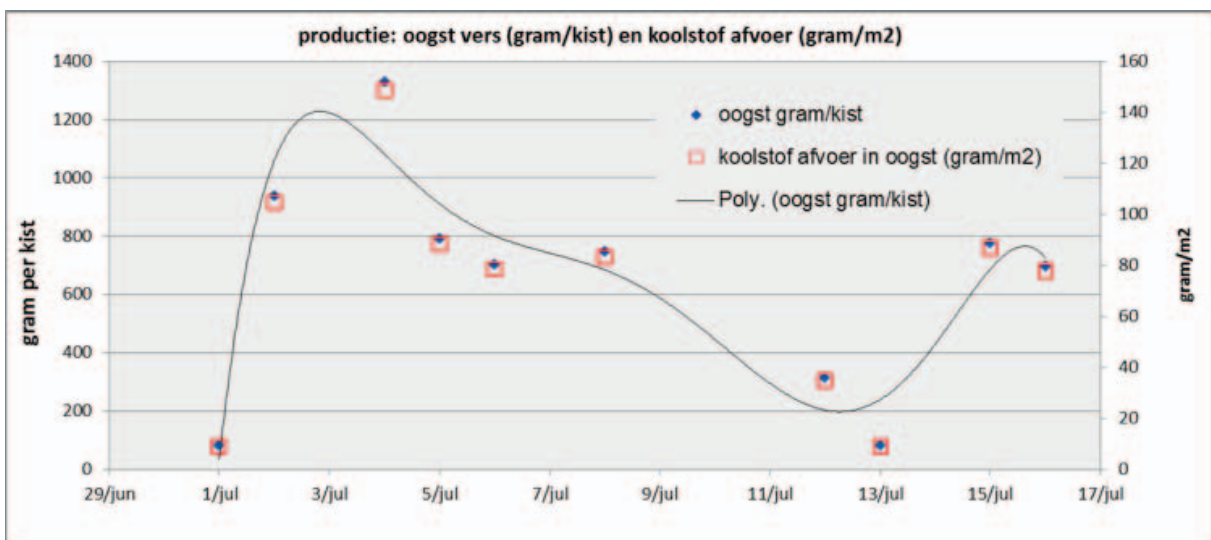
3 Resultaten

Uit de waarnemingen werd berekend dat er over alle kisten gemiddeld 538 gram koolstof per kist was verdwenen over de periode 15 juni tot 16 juli (Figuur 3.). De piek lag in de vijf dagen voor de eerste oogst en vier dagen erna rond 40 gram koolstof per kist per dag (deels in Figuur 4.).



Figuur 3. Compostgegevens, bepaald per monsterkisten. Op de rechteras het versgewicht compost in kg.kist-1, op de linker as drooggewichten van compost, niet-as, as en totaal gewicht compost in gram.kist-1.

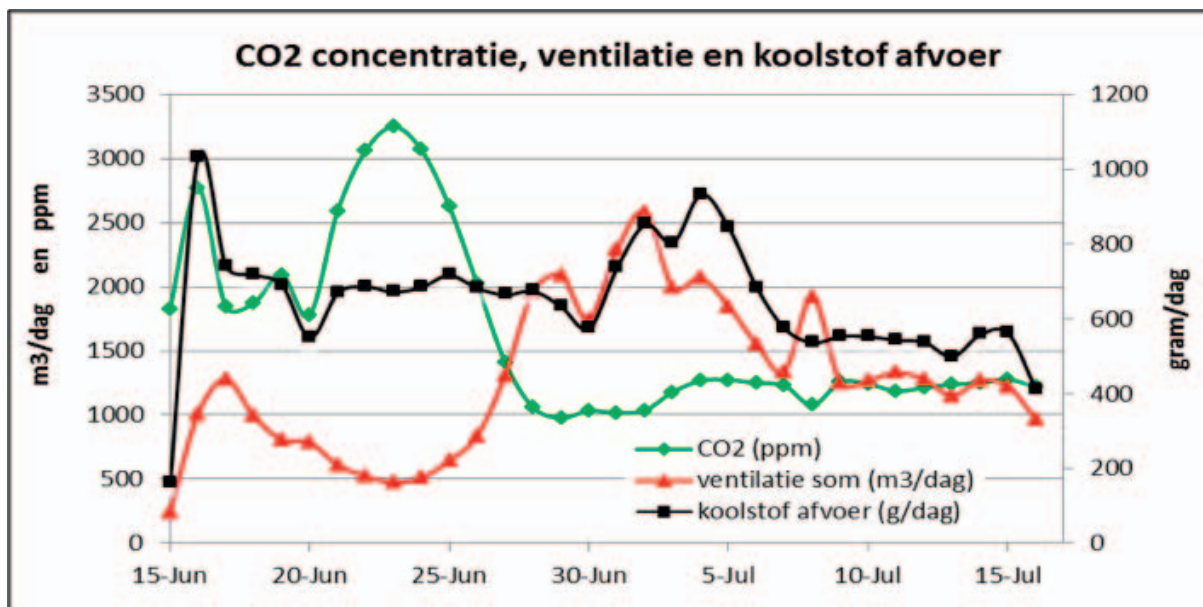
De totale oogst was 395 kg verse champignons in de hele cel over de hele periode (kg.cel-1 vers).



Figuur 4. Productie (gram.kist-1) en koolstofafvoer via de oogst (gram.m²) in de hele cel. Koolstofgehalte van de champignons is hier aangenomen op 50%.

Het gewicht van de voetjes was 20.4 kg.cel-1 (vers + schoon). De berekende hoeveelheid koolstof die in het geogoste product werd afgevoerd hangt af van de het aangenomen koolstofgehalte. Bij 50% koolstof was de afvoer 14.7 kg.cel-1.

Figuur 5. toont de berekende afvoer van CO₂ uit de teeltcel, en ook de wisselwerking tussen CO₂ concentratie, ventilatie en koolstofafvoer. Bijvoorbeeld op dag 2 steeg de CO₂ concentratie door CO₂ afgifte uit de compost. Daarom werd de ventilatie verhoogd, waardoor de afvoer van CO₂ (en dus van koolstof) toenam. Bij toenemende ventilatie neemt de CO₂ concentratie af. De totale afvoer van koolstof door ventilatie uit de teeltcel was 20.8 kg over de hele periode.



Figuur 5. Gemeten CO₂ concentratie (in ppm), berekende ventilatiesnelheid (in m³.dag⁻¹) en berekende koolstof afvoer (g.dag⁻¹) voor heel cel 3. CO₂ concentratie buiten is 370 ppm verondersteld.

3.1 Koolstofbalans

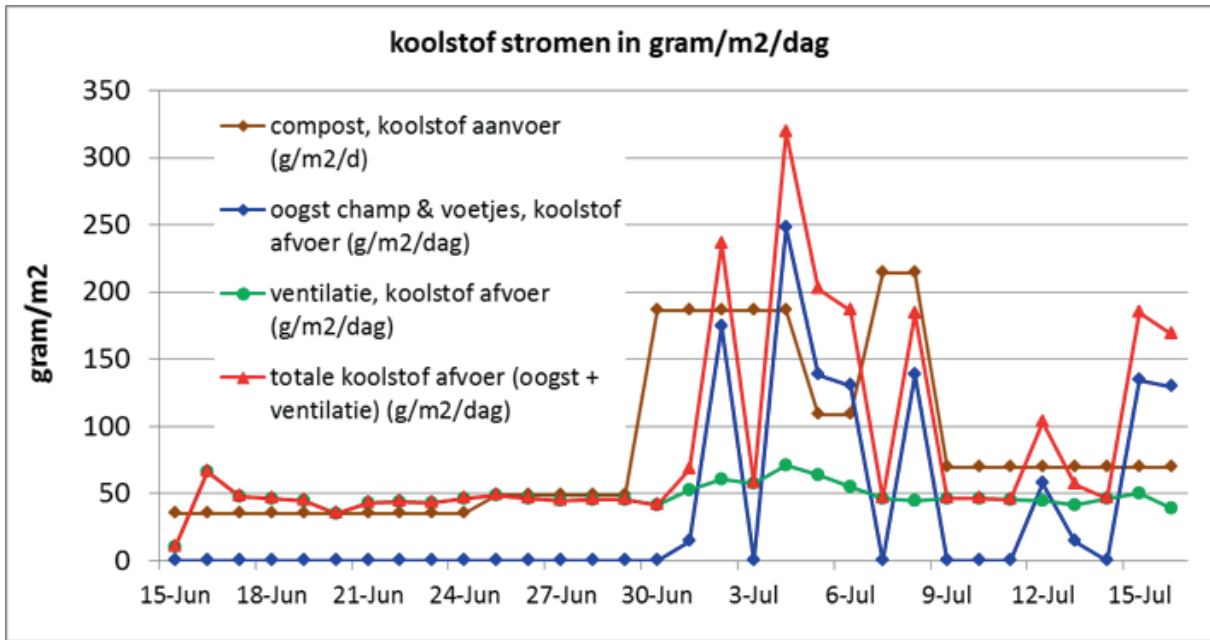
Tabel 2. toont het koolstofgehalte van compost vóór en na de teelt en het koolstofgehalte van champignons. Het koolstofgehalte in de organische stof ligt steeds dicht bij 50%. Deze meting is pas laat in het proces gemaakt en bevestigde dat de aanname waarmee in dit verslag is gerekend. Afwijkende waarden voor deze aannamen zouden verstrekende gevolgen gehad hebben.

Tabel 2. De bepaling van het koolstofgehalte in het organische deel van de droge stof.

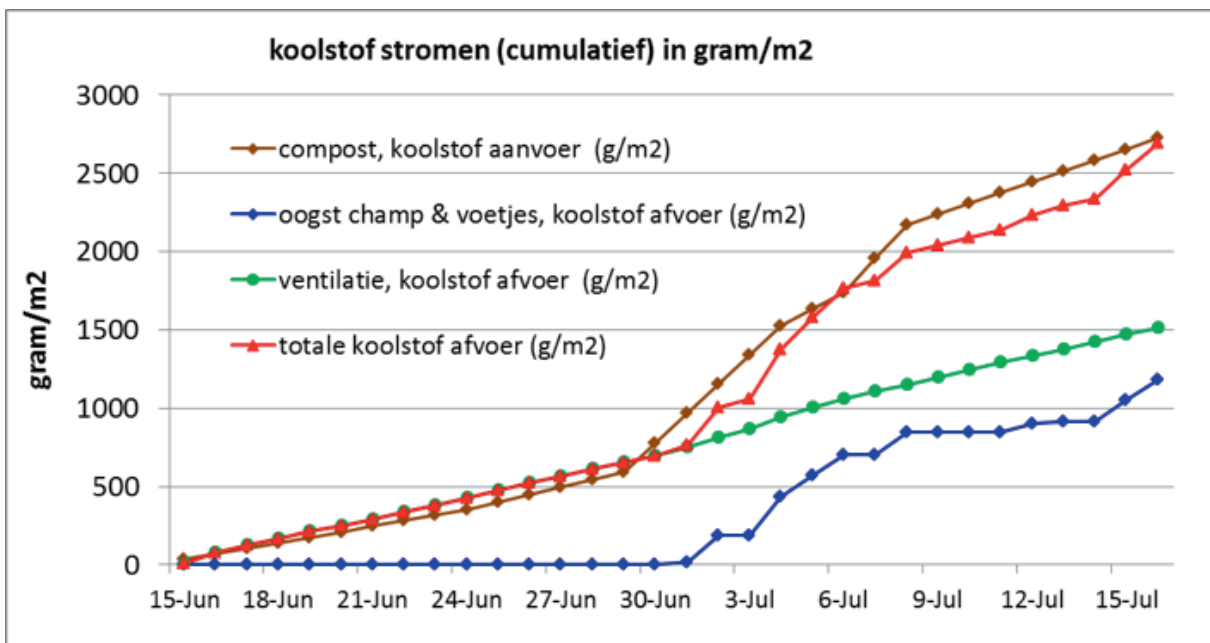
Monster-omschrijving	C g/kg DM	OM g/kg DM	C % g/g OM
Einde teelt - compost	290	576.0	50%
Doorgroeïende - compost	330	672.0	49%
Champignons	427	895.0	48%

De omrekening naar $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ was lastig omdat het beteeld oppervlakte tijdens de teelt veranderde van 78 naar 55 kisten doordat kisten zijn opgeofferd voor metingen (iedere kist met een teeltoppervlak van 0.2 m^2). Gemiddeld was er circa 13.2 m^2 beteeld oppervlak, dus getallen in de grafieken zijn daardoor een factor c.a. 13.2 lager dan in de tabel.

Figuur 6. toont de koolstofaanvoer en -afvoer, en Figuur 7. toont de cumulatieve waarden. De tweede grafiek maakt zichtbaar dat de koolstofaanvoer (uit compost) gelijk is aan de totale koolstofafvoer (in oogst + ventilatie) bij deze aannames.



Figuur 6. Berekende koolstof stromen in de teeltcel onder de aanname dat het koolstofgehalte van compost en van champignons 50% was. Koolstofstromen in $\text{gram}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dag}^{-1}$.

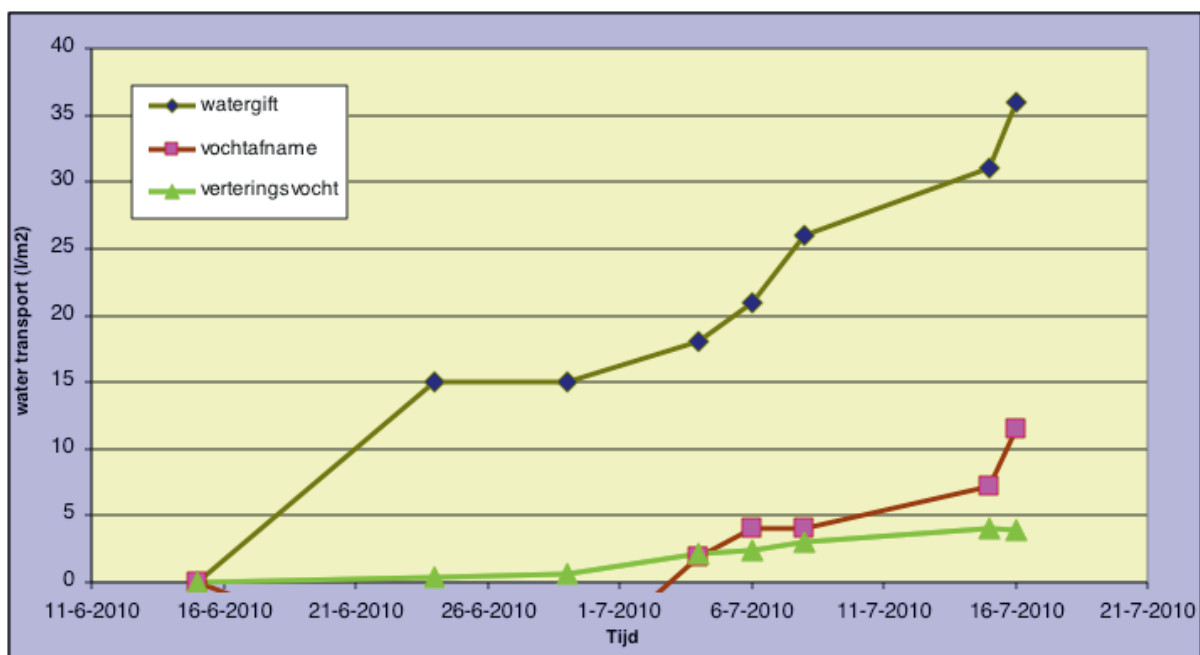


Figuur 7. Berekende koolstof stromen in de teeltcel onder de aanname dat het koolstofgehalte van compost en van champignons 50% was. Cumulatieve koolstofstromen in $\text{gram}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dag}^{-1}$.

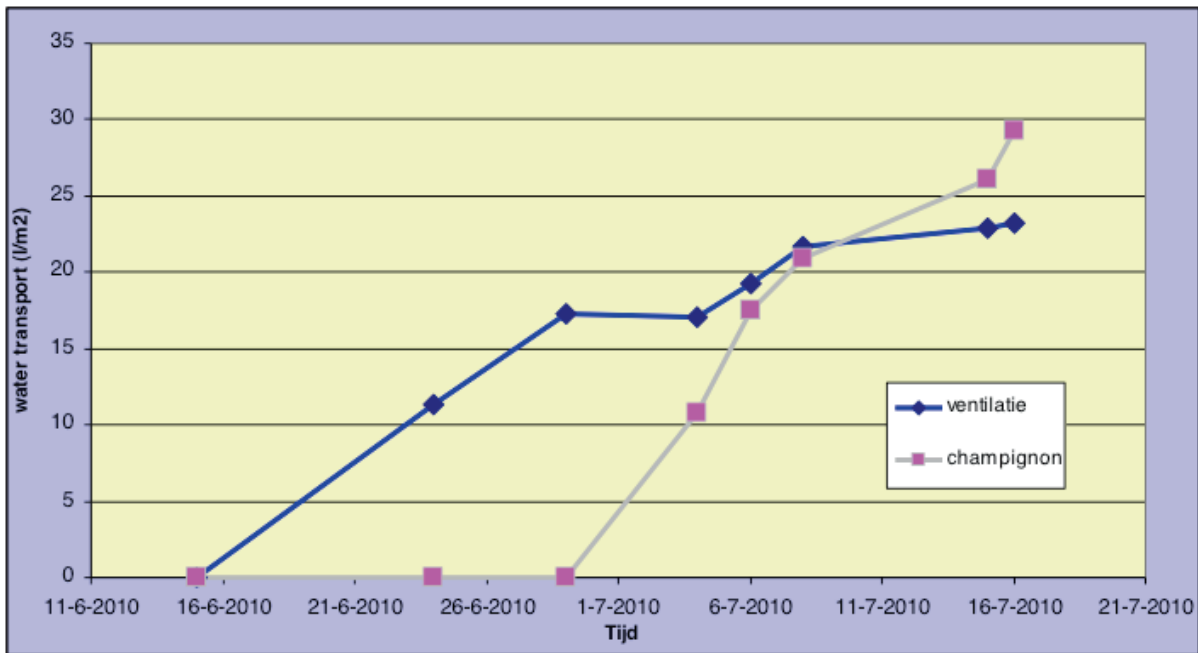
De koolstofafvoer in geoogst product vertoont sterke pieken, omdat op bepaalde dagen is geoogst (1, 2, 4, 5, 6, 8, 12, 13, 15, 16 juli). De koolstofafvoer in luchtuitwisseling (ventilatie) is relatief laag en heeft een relatief vlak verloop. De totale koolstofafvoer (in oogst + ventilatie) vertoont weer de pieken van de oogstdagen. De koolstofaanvoer uit compost piekt vlak voor het begin van vlucht 1 en direct na vlucht 1. Daarna is de koolstofaanvoer uit de compost laag. De koolstofaanvoer uit compost is alleen bekend uit analyse van kisten die op bepaalde dagen zijn bemonsterd (15, 24 en 29 juni, en 4, 6, 8, 15 juli). Uit de afname tussen twee dagen kon worden berekend hoeveel de gemiddelde afname was in de voorgaande dagen sinds de laatste waarneming. Dit geeft dus een berekend verloop weer en de werkelijke waarden zullen iets anders liggen. Dat kan alleen berekend worden als er veel meer meetpunten worden genomen. Dat is moeilijk te realiseren bij deze grootte en hoeveelheid kisten.

3.2 Waterbalans

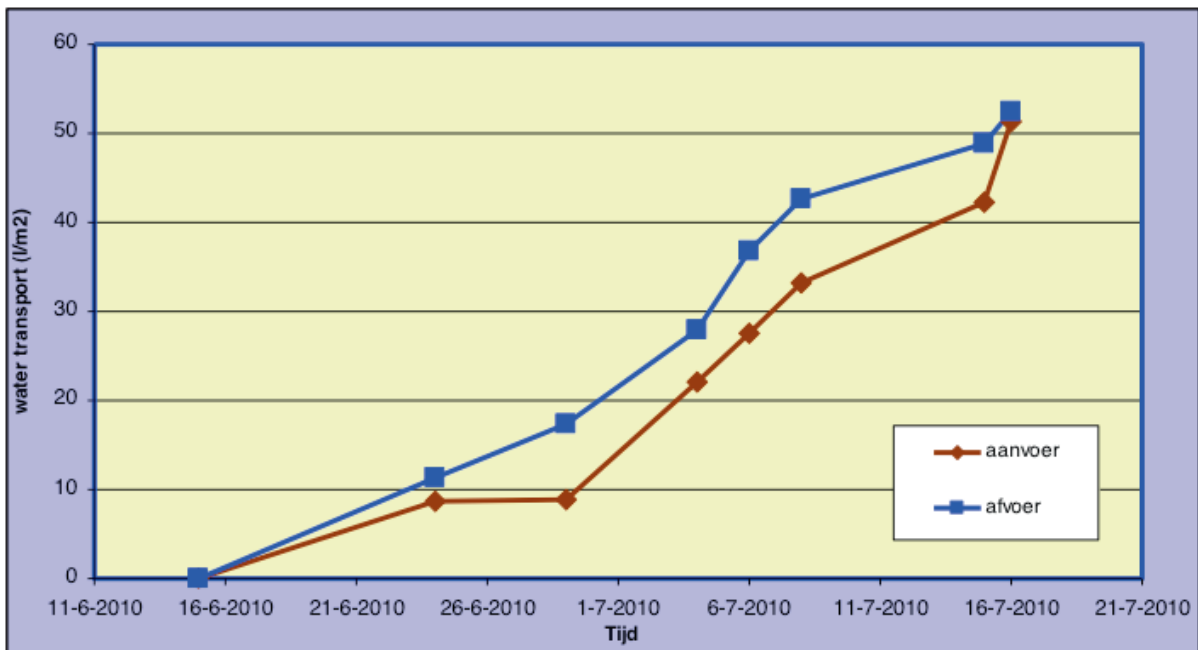
In de Figuren 8-10 staan de afzonderlijke componenten van de aan en afvoer.



Figuur 8. Cumulatieve water aanvoerstromen per m² in de tijd. De aanvoer bestaat uit de watergift, de afname van het watergehalte in de compost en door vertering gegenereerd metabolisch water.

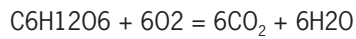


Figuur 9. Cummulative water afvoerstromen per m^2 in de tijd. De afvoer bestaat uit de netto afvoer van waterdamp door de lucht (dampafvoer- dampaanvoer) en de afvoer van vocht in de geogoste champignons (champignon + voetjes).



Figuur 10. Cummulative water aan- en afvoerverstromen per m^2 in de tijd.

Het verlies aan vocht uit de compost kent drie posten; watergift, vochtafname en verteringsvocht. De watergift is de hoeveelheid aan het compost toegevoegd water in l/m^2 waarbij wordt verondersteld dat er geen directe uitlekverliezen zijn. Vochtafname is gebaseerd op de afname in watergehalte in %-v/v van de vochtmeting en het berekende volume van de compost laag. De laatste post is de hoeveelheid water die vrij komt bij het verteren van de compost volgens de reactie;

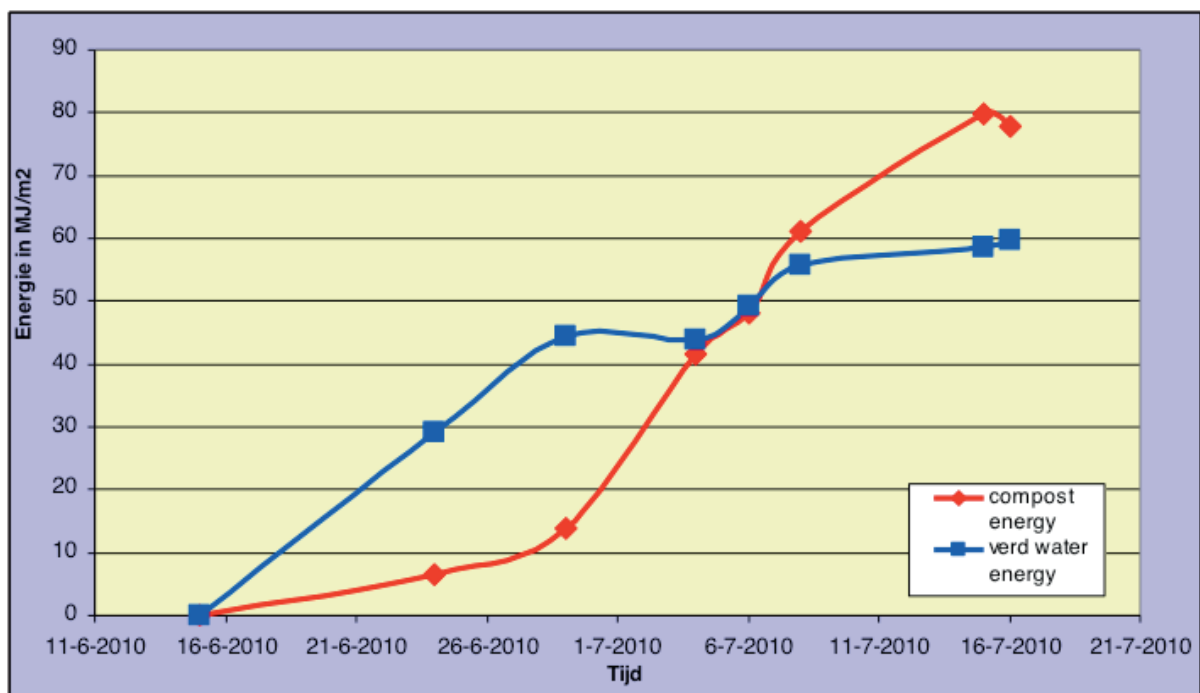


(1)

Voor elke mol koolzuurgas die vrij komt, zal ook een mol water gevormd worden. Dit blijkt toch nog 4 kilo per vierkante meter te zijn. De afvoer bestaat uit twee posten, afvoer via de cellucht volgens de aannames die ook voor koolzuurgas afvoer zijn gebruikt en afvoer door opname in de geogoste delen. De balans kan overigens op verschillende manieren berekend worden waarbij elektronische vochtgehaltemetingen minder betrouwbaar zijn dan op gewicht gebaseerde metingen. Dit omdat de vochtmeting gestoord wordt door de te hoge EC's.

3.3 Energiebalans

De energiebalans omvat maar twee termen, de energie in de afgevoerde waterdamp (opwarmingsenergie en verdampingsenergie) en de energie die vrijkomt bij de vertering van compost. De verdamping van water is gerekend als 2.6 MJ.kg-1 water (inclusief 0.3 MJ.kg-1 voor opwarmen) en de verteringsenergie is gerekend als de verbrandingsenergie van hout op 15 MJ.kg-1 droge organische stof. Omdat het gewicht aan verdampt water en het verlies aan droge compost bekend zijn, volgt een energiebalans zoals in Figuur 11. getoond wordt.



Figuur 11. Berekende cumulatieve energie productie en afvoerverstromen per m² in de tijd.

3.4 Balans voor minerale voeding

De opname van minerale voeding in het geogoste product volgt uit de totaal analyse van de champignons. Die getallen in mol.kg-1 droge stof zijn omgerekend naar mol per vierkante meter door vermenigvuldigen met het aantal kg geogost per vierkante meter.

Deze opname moet overeenkomen met een ongeveer gelijke afname of afgifte in het compost. De afgifte uit het compost wordt berekend uit de totaal analyse van de hoeveelheid minerale voeding bij aanvang minus de totaal analyse van de hoeveelheid minerale voeding bij het einde van de teelt. Ook deze metingen worden gerapporteerd als mol per kilogram droge stof. Daarom worden de getallen vermenigvuldigd met het aantal kilogram droge stof dat op elk tijdstip per vierkante meter aanwezig was. Zo wordt ook hier het aantal mol.m² gevonden.

Tabel 3. Absolute hoeveelheden voeding in compost (A), vrijgekomen uit compost (B) en in champignons (D).

	A	B	C (B/A)	D	E (D/B)	F	G (F/D)
	M.m ²			M.m ²	M.m ²		
N-tot.	53.7	10.1	19%	7.5	75%	1.8	23%
K	15.7	2.9	18%	2.6	90%	9.2	350%
Na	2.6	0.2	7%	0.1	51%	1.5	1722%
Ca	20.7	3.8	18%	0.6	15%	1.7	298%
Mg	3.8	0.2	5%	0.2	81%	1.1	679%
S	13.3	3.9	29%	0.3	7%	5.8	2197%
P	4.5	0.9	21%	0.8	88%	0.6	77%

mMol.m ²	mM.m ²			mM.m ²	mM.m ²		
Fe	577.3	52.1	9%	12.7	24%	4.3	34%
Mn	96.2	6.9	7%	0.8	11%	7.2	918%
Zn	55.2	6.6	12%	2.8	43%	1.9	69%
B	38.3	8.5	22%	1.2	14%	4.2	363%
Cu	11.5	1.8	15%	1.3	71%	1.3	105%
Mo	0.7	0.1	18%	0.0	15%	0.1	315%

Kolom A: Voedingshoeveelheid in de compost bij de start.
Kolom B: Voedingshoeveelheid verdwenen uit compost (start – eind).
Kolom C: De verdwenen hoeveelheid voeding in % (Kolom B / A).
Kolom D: Voedingshoeveelheid opgenomen in champignons+voetjes.
Kolom E: Opgenomen voeding als % van verdwenen (Kolom D/ B).
Kolom F: Voeding gemiddeld in oplossing.
Kolom G: Voeding in oplossing als % van de opname (Kolom F / D).

Tabel 3. toont als eerste de totale hoeveelheid voeding aanwezig in de compost bij aanvang van de teelt (Kolom A). Verder volgt uit de metingen hoeveel voeding op het einde van de teelt uit de compostlaag is verdwenen en hoeveel teruggevonden wordt in de geoogste champignons en voetjes (respectievelijk Kolom B en Kolom D). De afgifte en opname van minerale voeding blijken in dezelfde orde van grootte liggen (Kolom B en D). Er valt op dat er 5-10 x zoveel calcium sulfaat en ijzer en mangaan verdwijnen uit het compost dan teruggevonden wordt in de champignons. Verder is te zien dat maar 10-20% van de totaal aanwezige minerale voedingszouten verdwijnen uit de compostlaag (Kolom C). Van de voeding die vrij komt wordt voor de hoofdelementen 80% ook in de champignons teruggevonden, behalve voor calcium en sulfaat (Kolom E). Het is mogelijk dat calcium en sulfaat als gips in de dekaarde neerslaan. Van de uit de compost verdwenen sporenelementen word veel minder in de champignons terug gevonden: 70% voor koper, 40% voor zink en 10-20% voor de overig sporenelementen (Kolom E). Het is mogelijk dat ook de sporenelementen in de dekaarde zijn neergeslagen. De hoeveelheid minerale voeding in de oplossing (Kolom F) is op elk moment voor alle elementen behalve stikstof, fosfor, ijzer en zink ruim voldoende om de behoefte van de champignons te dekken (Kolom G). Let op; de 1:1,5 analyse geeft getallen na verdunning. De werkelijke hoeveelheden kunnen hoger liggen. Het is bijvoorbeeld aannemelijk dat natrium en kalium vrijwel de hele tijd volledig opgelost zijn.

Tabel 4. In oplossing aanwezige hoeveelheden voeding in compost op begin en eind datum en weergegeven per laag.

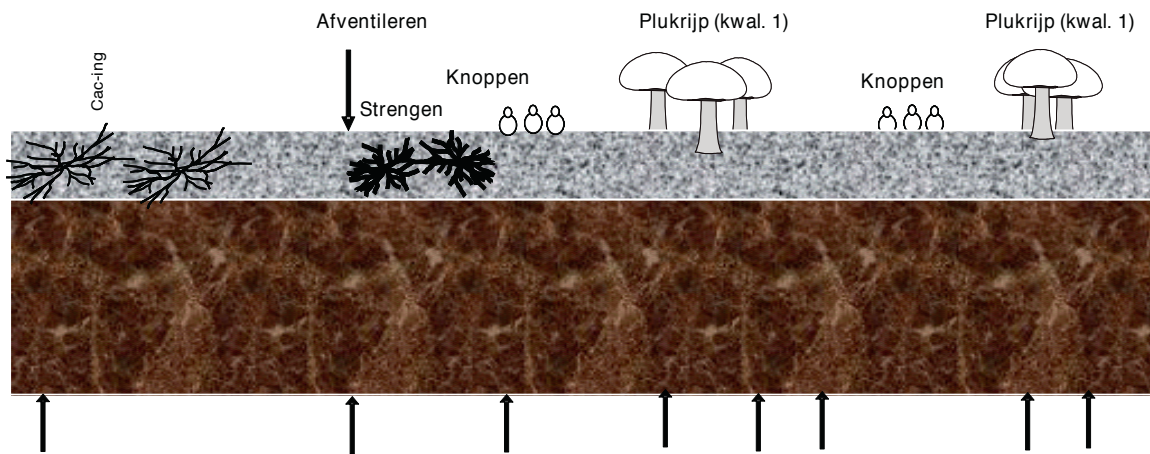
	eenheid	17-6 (start)			16-7 (einde)		
		B	M	O	B	M	O
EC	dS.m ⁻¹	8.2	7.4	9.4	9.9	12.6	12.8
pH	pH	6.4	6.0	6.0	6.0	6.0	5.8
NH ₄	mMol.L-1	8.9	7.0	6.1	6.2	9.5	7.6
K	mMol.L-1	42.7	36.7	49.7	55.2	70.0	76.3
Na	mMol.L-1	8.0	6.6	9.4	11.5	12.8	13.9
Ca	mMol.L-1	7.9	8.3	9.8	14.4	14.5	17.5
Mg	mMol.L-1	4.5	4.0	5.9	8.9	9.6	10.0
NO ₃	mMol.L-1	0.3	0.3	2.3	0.4	0.1	0.1
Cl	mMol.L-1	17.4	14.0	19.8	22.7	39.2	37.9
SO ₄	mMol.L-1	28.3	26.3	32.3	37.1	42.7	45.9
HCO ₃	mMol.L-1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4
P	mMol.L-1	2.7	2.6	4.0	3.1	4.3	3.0
Si	mMol.L-1	0.4	0.3	0.4	0.8	0.8	1.1
Fe	μMol.L-1	11.0	5.3	8.3	25.0	36.0	36.0
Mn	μMol.L-1	22.0	28.0	43.0	55.5	63.5	50.5
Zn	μMol.L-1	4.6	4.7	11.0	15.5	17.5	15.5
B	μMol.L-1	17.0	16.0	26.0	33.5	33.0	24.0
Cu	μMol.L-1	5.3	3.3	5.7	14.9	11.7	14.0
Mo	μMol.L-1	0.2	0.3	0.2	0.8	0.7	0.7

B, M, O staat voor respectievelijk Boven, Midden en Onder in de meetkist.

Tabel 4. toont dat het minerale voedingsgehalte in de oplossing gemeten met een 1:1,5 extract erg stabiel is. Ondanks grote fluctuaties in groei, vertering en volume in tijd en per vierkante meter blijven alle elementen ruim aanwezig. Tabel 4. toont dat alle elementen in de loop van de tijd goed en vaak zelfs beter beschikbaar in oplossing aanwezig blijven. De lagere gehalten in de bovenlaag zijn vanaf het begin aanwezig.

3.5 Organische voedingsanalyse van de Compost

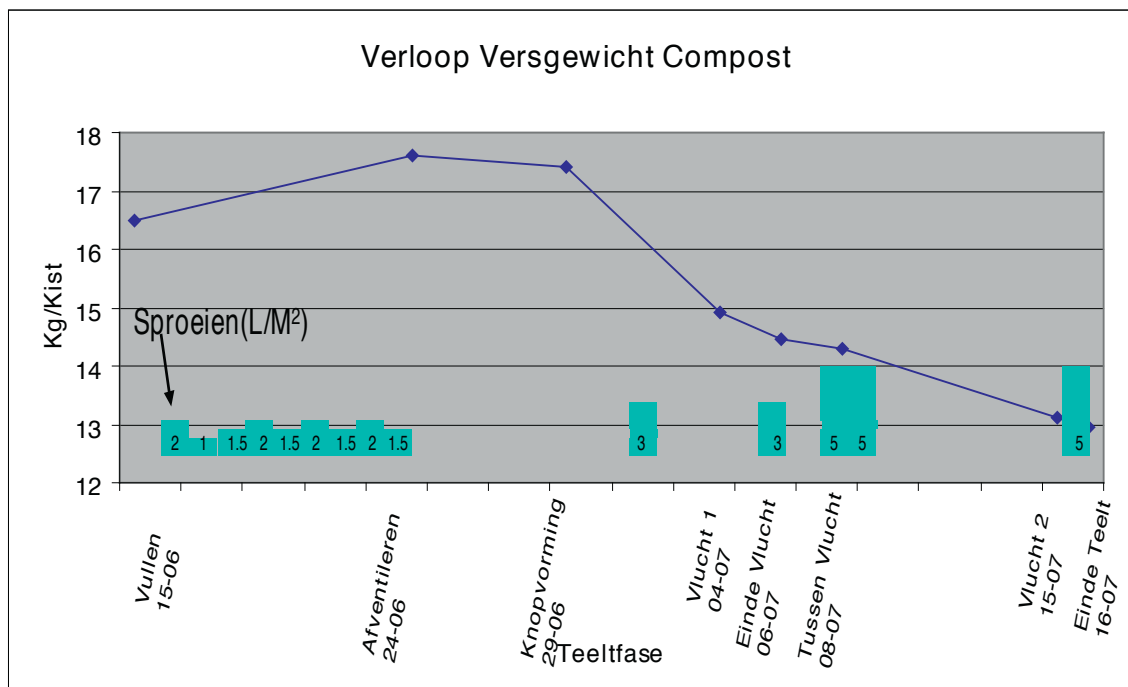
Bij het vullen van de kisten (16.5 kg) zijn er op drie hoogten netten geplaatst: tussen de dekaarde en de compost en op twee hoogten in de compost. De laatste netten zijn zodanig geplaatst dat de compost precies in drie lagen met hetzelfde gewicht is verdeeld (5.5 kg.laag⁻¹). Op de in Figuur 12. aangegeven tijden zijn kisten opgeofferd en zijn de lagen uit elkaar gehaald en de compost gebruikt voor een aantal analyses: gewicht, vochtgehalte, as, NDF, ADF en LDF.



Figuur 12. Op de aangegeven tijden (pijlen) in de teelt zijn kisten opgevoerd voor de bemesting van de compost in drie lagen. Hiervoor zijn netten geplaatst tussen compost en dekaarde, en op twee hoogten in de compost zodat deze precies in 3 gelijke lagen is verdeeld. Boven in de figuur is het tijdstip en hoeveelheid watergift wergegeven.

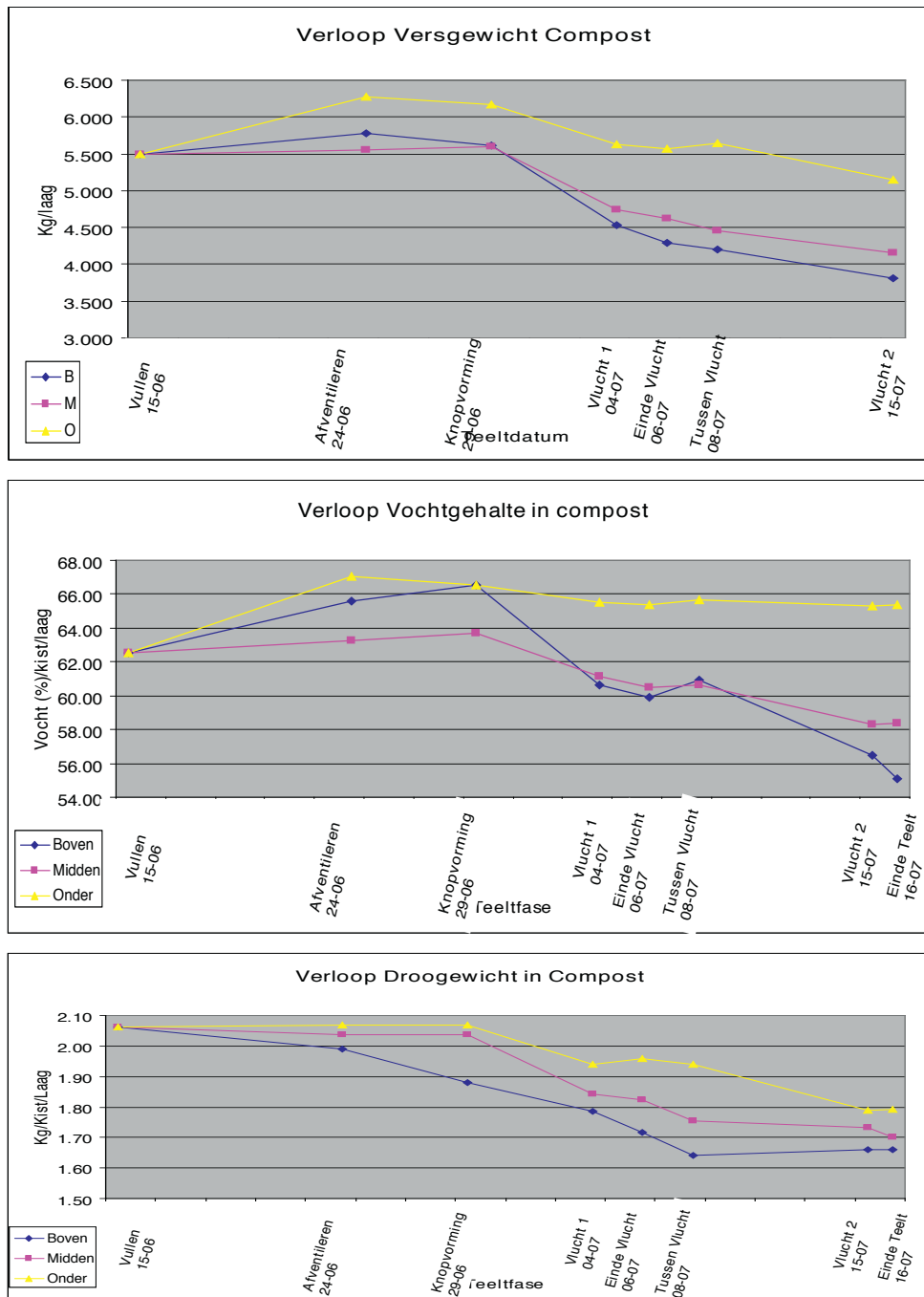
Gewichtsverloop en droge stofgehalten

De analyses weergegeven in deze paragraaf zijn gebaseerd op gewichtsbepalingen aan materiaal uit de tussentijds destructief gemeten kisten. Het gewicht van de alle lagen samen neemt tussen vullen en afventileren toe door de watergift (Figuur 13). Na het afventileren verdwijnt vocht door verdamping. Een sterke afname is te zien bij de uitgroei van de eerste vlucht. Deze is enigszins gecompenseerd door watergift vlak voor de vlucht. Het droge stof gehalte neemt gestadig af gedurende de hele teelt waarbij de sterkste daling is te zien bij uitgroei van de eerste vlucht (Figuur 3.). De gemiddelde opbrengst bedroeg 30 kg.m² en c.a. 9 kg hiervan is in de tweede vlucht geproduceerd. De afname door een tweede vlucht heeft dus ook een veel geringer effect op afname in droge stof.



Figuur 13. Verloop versgewicht compost (alle lagen). De blauwe kolommen geven aan wanneer en hoeveel water gegeven is.

Het verloop van het versgewicht in de drie lagen is duidelijk verschillend (Figuur 14A). Een geringe toename tussen vullen en afventileren in de bovenste laag, bijna geen gewichtsverandering in de middelste laag en een duidelijke toename in de onderste laag. Dit verloop is een resultante van de verandering in drooggewicht en het vochtgehalte. Het vochtgehalte in de compost neemt af in de bovenste en middelste laag en blijft vrijwel constant in de onderste laag (Figuur 14B). Verandering in drooggewicht staat voor afbraak organische stof. Deze afbraak lijkt in fasen te verlopen: afbraak vanaf het vullen in de bovenste laag en een latere afbraak in de middelste en onderste laag waarbij de onderste laag het meest achterblijft (Figuur 14C). Opvallend is dat vanaf vullen tot afventileren vrijwel alleen droge stof afbraak plaatsvindt in de bovenste laag (Figuur 14C).

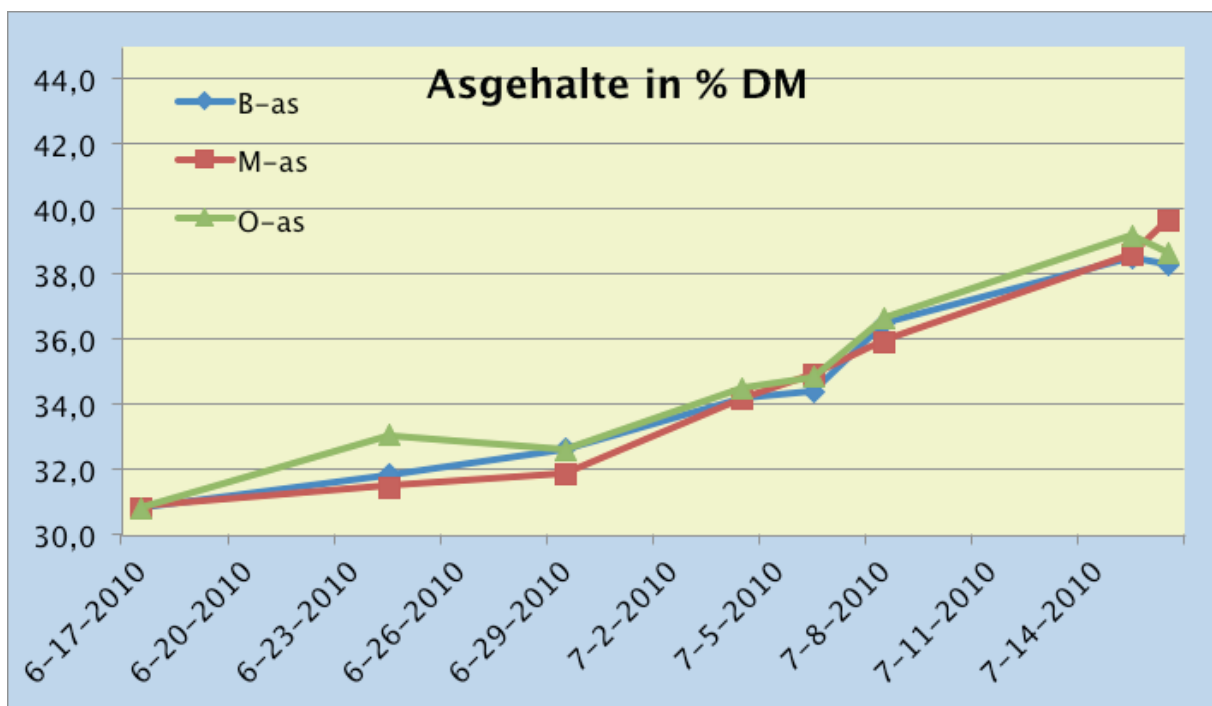


Figuur 14. A-C. Verloop versgewicht, vochtgehalte en drooggewicht in de compost per laag. Steeds is gemeten in drie lagen, respectievelijk Boven, Midden en Onder.

Afbraak Organische componenten

De analyses weergegeven in deze paragraaf zijn uitgevoerd met NIR. NIR is een zéér reproduceerbare methode maar er zijn onzekerheden over de absolute waarden. Het bepalen van de as-gehalten is bijvoorbeeld een probleem. In absolute hoeveelheden zal de hoeveelheid as per oppervlakte eenheid gedurende de teelt constant blijven (as wordt niet geconsumeerd, noch gegenereerd) maar uit de metingen blijkt dat vaak niet te kloppen (mondeling A. Sonnenberg). Omdat NIR wel erg reproduceerbaar en snel is toe te passen is de methode geschikt om trends aan te geven. Gezien de veel stabielere lijnen (Figuur 15) lijkt de NIR-as bepaling beter bruikbaar dan de WUR laboratorium asbepalingen. Dit wellicht omdat de NIR monsters direct ingevroren zijn.

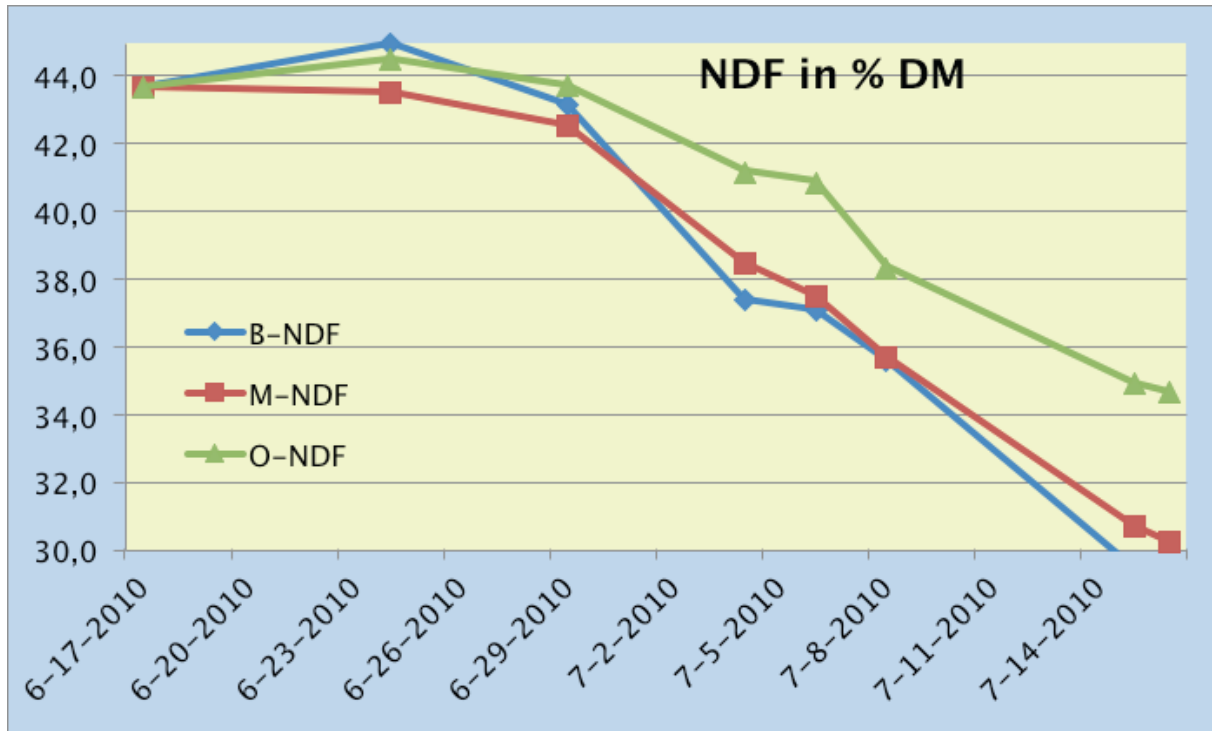
In het onderstaande zijn zoals gebruikelijk de componenten van de voeding weergegeven als percentage van de droge stof. De hoeveelheid droge stof neemt echter zelf af in de tijd! Voor een goed begrip van de beschikbaarheid en de veranderingen die de champignon ervaart, verdient het daarom aanbeveling de gehalten voortaan uit te drukken als absolute hoeveelheid per oppervlakte eenheid (zie discussie).



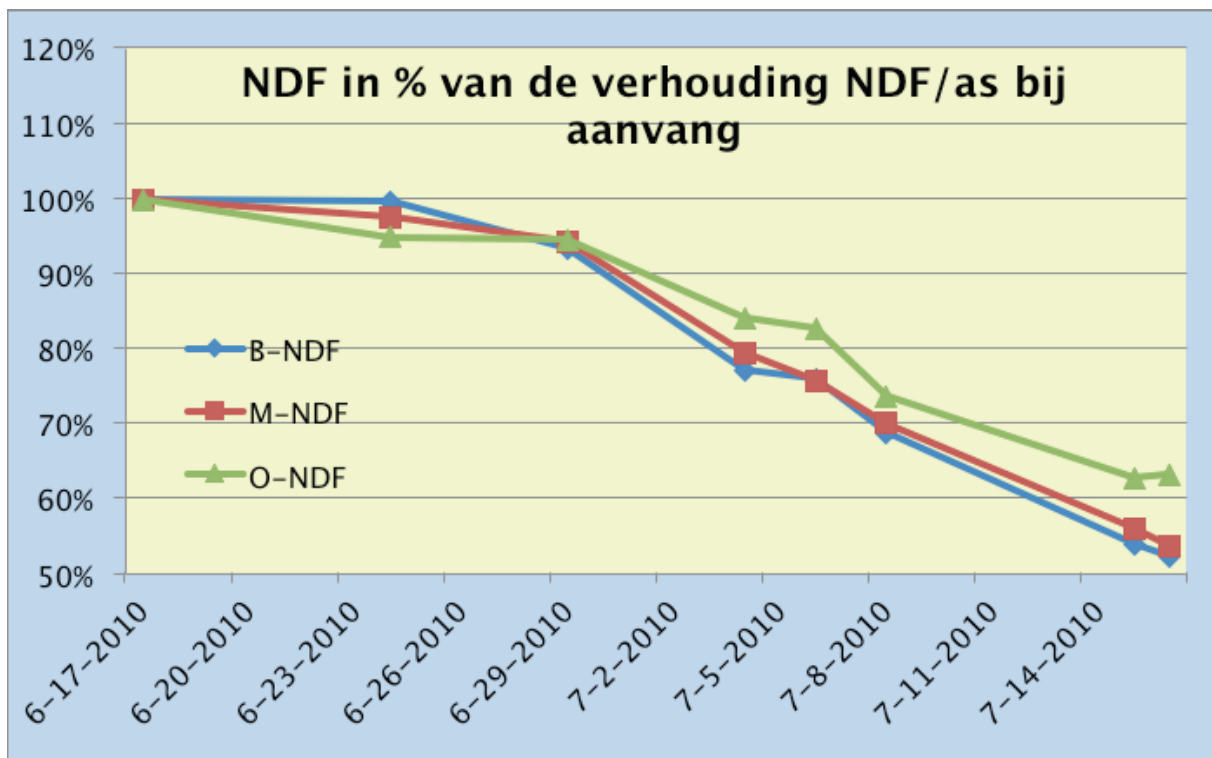
Figuur 15. Toename van het gehalte as per eenheid droge stof op basis van NIR.

Met de NIR methode is gekeken welke componenten worden afgebroken tijdens de afname van het droge stof gehalte (Figuur 14C). In eerste instantie is NDF bepaald (Figuur 16). De NDF fractie representeert de onoplosbare celwandfractie (voornamelijk cellulose, hemicellulose en lignine). Vanaf vullen tot afventileren lijkt er nauwelijks verandering te zien in NDF in alle drie lagen. De hoeveelheid organische stof neemt in deze periode wel degelijk af zoals blijkt uit de toename in asgehalte! Hier blijkt hoe belangrijk het is de meting te relateren aan een onveranderlijke grootte als as. Als voorbeeld is NDF in Figuur 17. uitgedrukt als % van de as waarbij de beginverhouding op 100% is gesteld. Nu is beter te zien dat 40-50% van de oorspronkelijke hoeveelheid NDF wordt verbruikt en dat dit geldt voor alle drie de lagen. De schijnbare toename rond 24 juni is verdwenen. De afbraak van NDF is in de onderlaag nauwelijks lager dan in de twee lagen erboven. In Figuur 16. lijkt dit wel zo maar dat is voornamelijk schijn veroorzaakte doordat de hoeveelheid organische stof in de onderlaag minder snel afneemt dan in de twee lagen erboven.

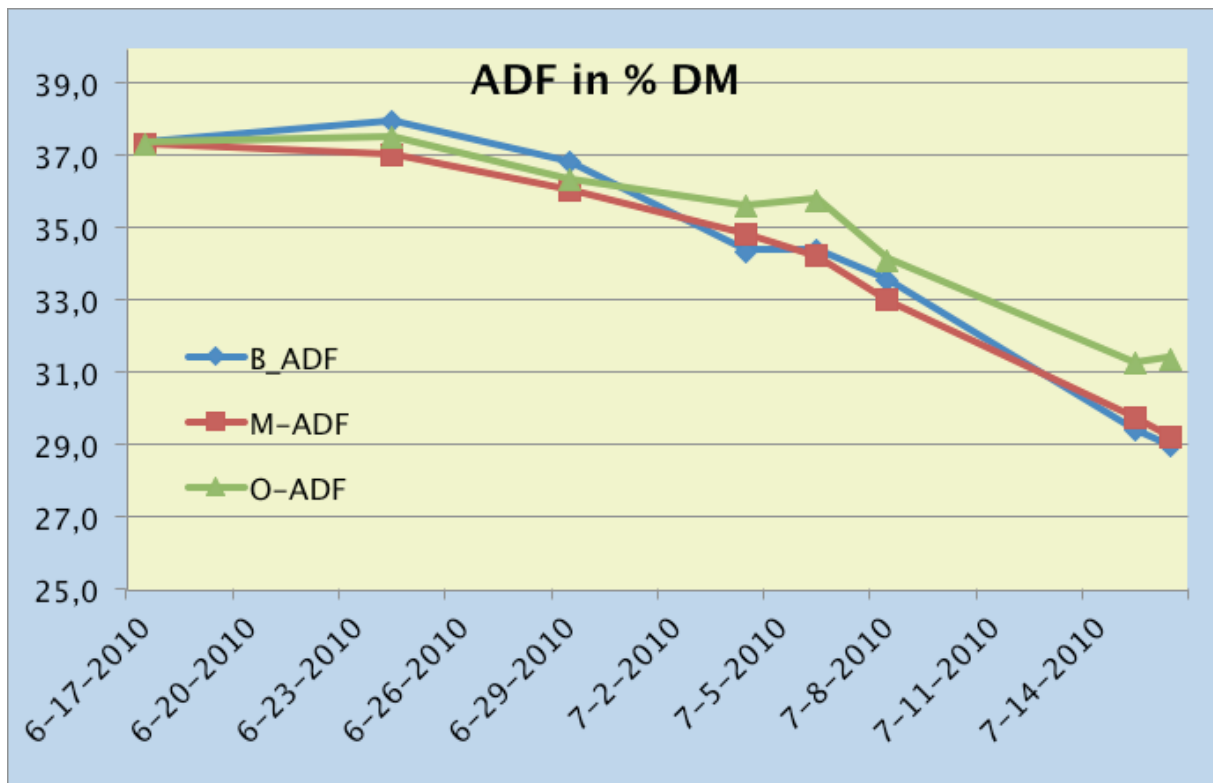
Wat niet zichtbaar is, is dat in de fase tot knopvorming, de eerste drie datapunten, veel mycelium wordt gevormd. Dat het gehalte NDF in percentage droge stof in die periode bijna gelijk blijft, betekent misschien dat een deel van de NDF veranderd in mycelium die zelf weer als NDF in de analyse terugkeert. Het kan ook betekenen dat tot 29 juni de meeste vertering plaats vindt aan al in water opgeloste organische stoffen. NDF blijkt in Figuur 16. tenslotte nog geen 50% van alle organische stof te zijn.



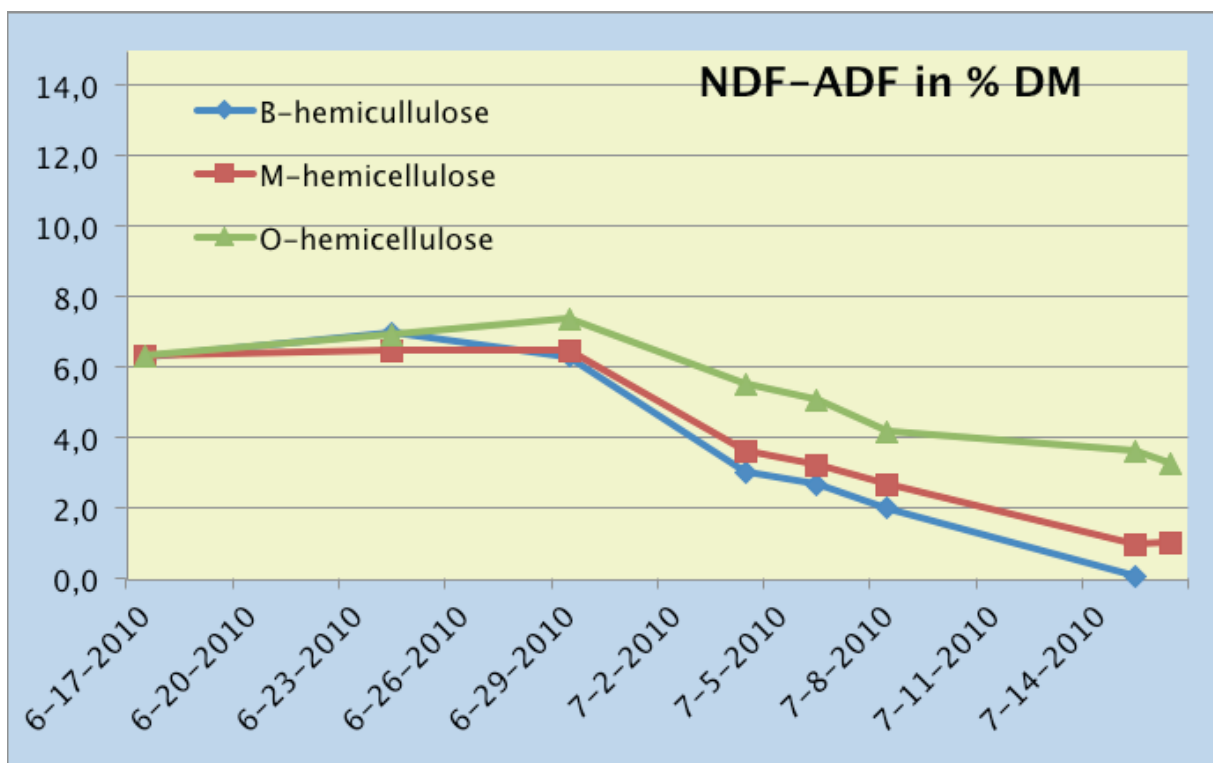
Figuur 16. Afname van het gehalte NDF per eenheid droge stof (g/g) op basis van NIR.



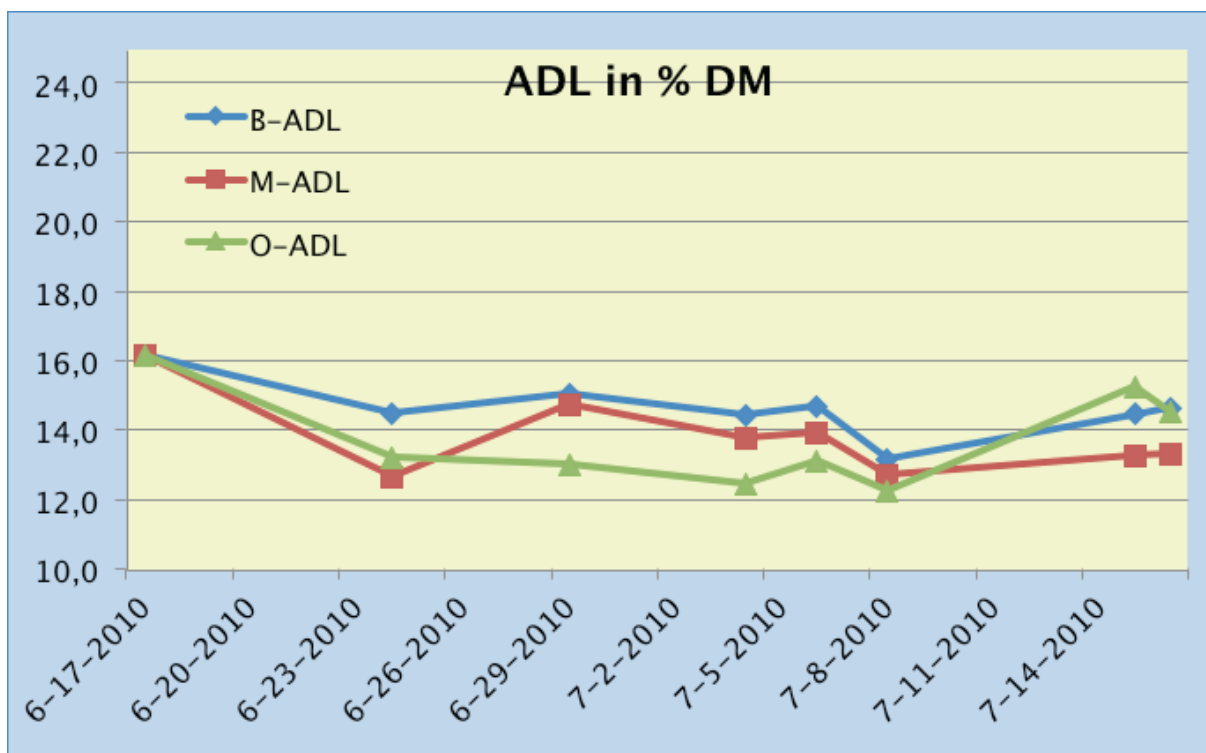
Figuur 17. Afname van NDF per eenheid as op basis van NIR.



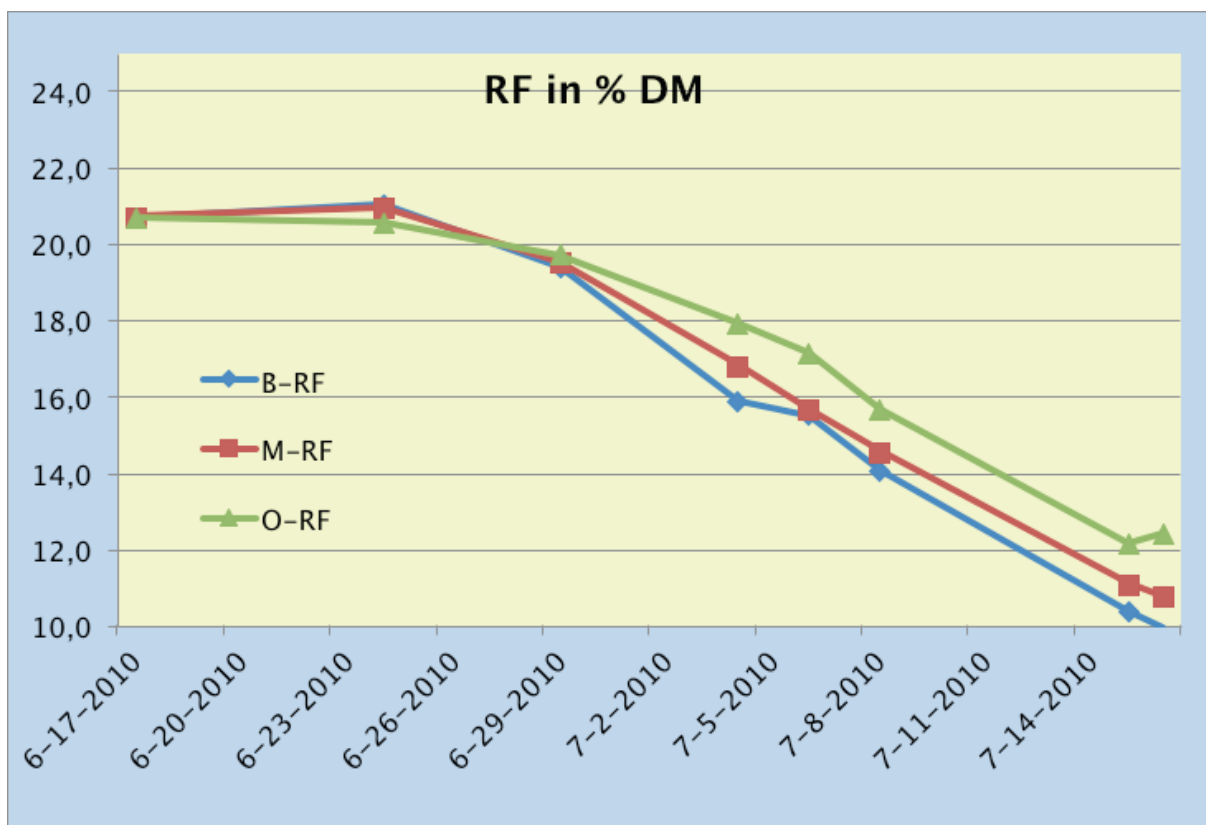
Figuur 18. Afname van het gehalte ADF per eenheid droge stof op basis van NIR.



Figuur 19. Afname van het gehalte hemicellulose per eenheid droge stof op basis van NIR.



Figuur 20. Afname van het gehalte ADL per eenheid droge stof op basis van NIR.



Figuur 21. Afname van het gehalte ruwe vezels (RF) per eenheid droge stof op basis van NIR.

De meeste gehalten (als %DM) dalen in de loop van de tijd; NDF (44-31%); ADF (39-29%); RF (21-10). De belangrijkste daling betreft die van hemicellulose berekent als NDF-ADF (Figuur 19). Hier is de vertering in de bovenste lagen uitputtend. Uitgedrukt op de hoeveelheid as blijkt werkelijk 90-100% in de bovenste twee lagen en 60% in de onderste laag te worden verteerd. Hemicellulose is daarmee een belangrijke kandidaat voor een productie beperkende factor bij hergebruik van compost.

In Bijlage 5 zijn tabellen opgenomen waarin wordt gerekend met de absolute hoeveelheid hemicellulose, cellulose en lignine uitgedrukt per vierkante meter bed, als percentage van de oorspronkelijke hoeveelheid en per ton verse compost. Duidelijk wordt dat de efficiëntie waarmee champignon de compost verteerd niet zo laag is als we eens wordt gedacht. Hier volstaat op te merken dat van de oorspronkelijke 2.5 kg hemicellulose per vierkante meter er na de teelt bijna niets meer over is, zelfs niet in de minder verteerde onderste laag. Van de 6.5 kilogram cellulose per vierkante meter is na teelt nog 3.9 kilogram over. Er is dus maar 40% verteerd.

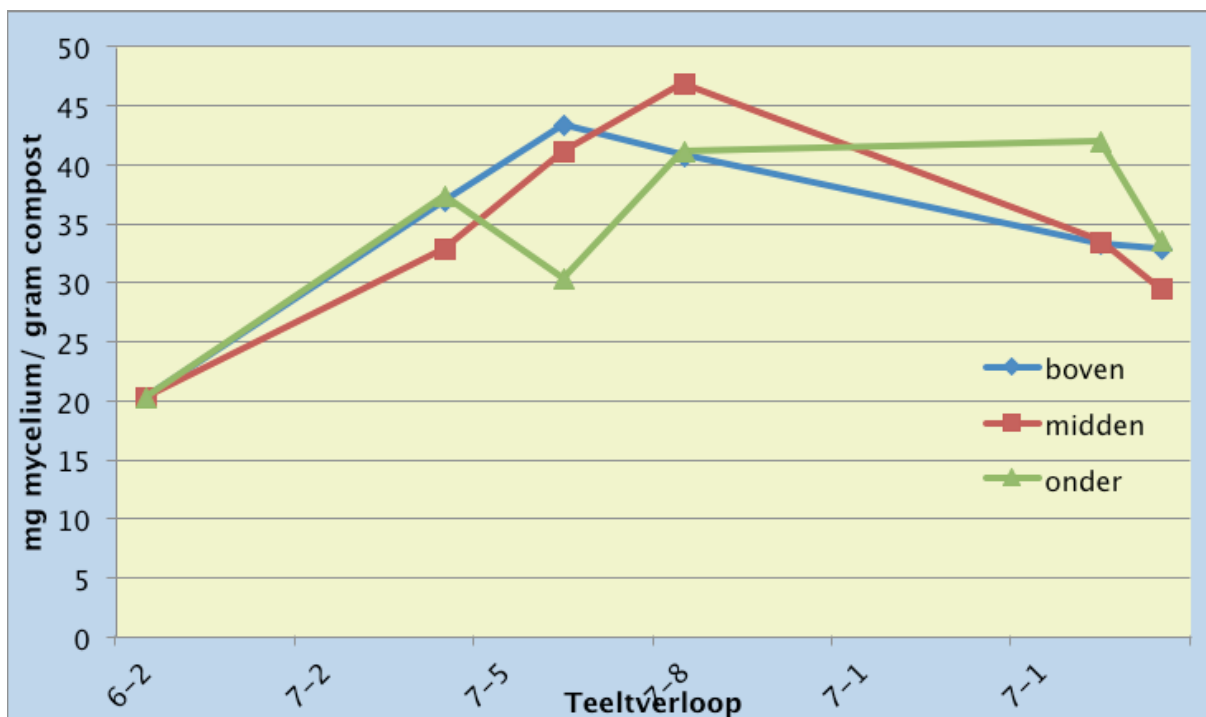
De meeste gehalten (als %DM) dalen in de loop van de tijd; NDF (44-31%); ADF (39-29%); RF (21-10). De belangrijkste daling betreft die van hemicellulose berekent als NDF-ADF (Figuur 19). Hier is de vertering in de bovenste lagen uitputtend. Uitgedrukt op de hoeveelheid as blijkt werkelijk 90-100% in de bovenste twee lagen en 60% in de onderste laag te worden verteerd. Hemicellulose is daarmee een belangrijke kandidaat voor een productie beperkende factor bij hergebruik van compost.

In Bijlage 5 zijn tabellen opgenomen waarin wordt gerekend met de absolute hoeveelheid hemicellulose, cellulose en lignine uitgedrukt per vierkante meter bed, als percentage van de oorspronkelijke hoeveelheid en per ton verse compost. Duidelijk wordt dat de efficiëntie waarmee champignon de compost verteerd niet zo laag is als we eens wordt gedacht. Hier volstaat op te merken dat van de oorspronkelijke 2.5 kg hemicellulose per vierkante meter er na de teelt bijna niets meer over is, zelfs niet in de minder verteerde onderste laag. Van de 6.5 kilogram cellulose per vierkante meter is na teelt nog 3.9 kilogram over. Er is dus maar 40% verteerd.

3.6 Mycelium

De hoeveelheid mycelium is natuurlijk van invloed op de beoordeling van de verteringsgraad. Alleen een afname van ADF/ADL/hemicellulose wordt gemeten terwijl het waarschijnlijk is dat een deel van de ADF/ADL/hemicellulose afkomstig is uit mycelium. Het zou zelfs zo kunnen zijn dat 100% van de gemeten waarde uit het mycelium komt en een tekort daardoor onopgemerkt blijft.

Er is getracht de hoeveelheid mycelium te schatten door meten van de hoeveelheid ergosterol (Figuur 22). Ergosterol wordt bijvoorbeeld in de voedselveiligheid vaak gebruikt als maat voor de hoeveelheid schimmeldraad in voedingsmiddelen. Hoewel de methode nog moet worden geoptimaliseerd voor compost is een trend zichtbaar. Er is sterke groei van vullen tot afventileren en daarna zijn geen grote veranderingen meer te zien. De absolute hoeveelheid organische stof in mycelium wordt geschat op uiteindelijk 1 kg droge stof per vierkante meter bed. Bij een aangenomen droge stof gehalte van 7.5% (mondeling A. Sonneveld) is dat 13.9 kg vers mycelium per vierkante meter bed.



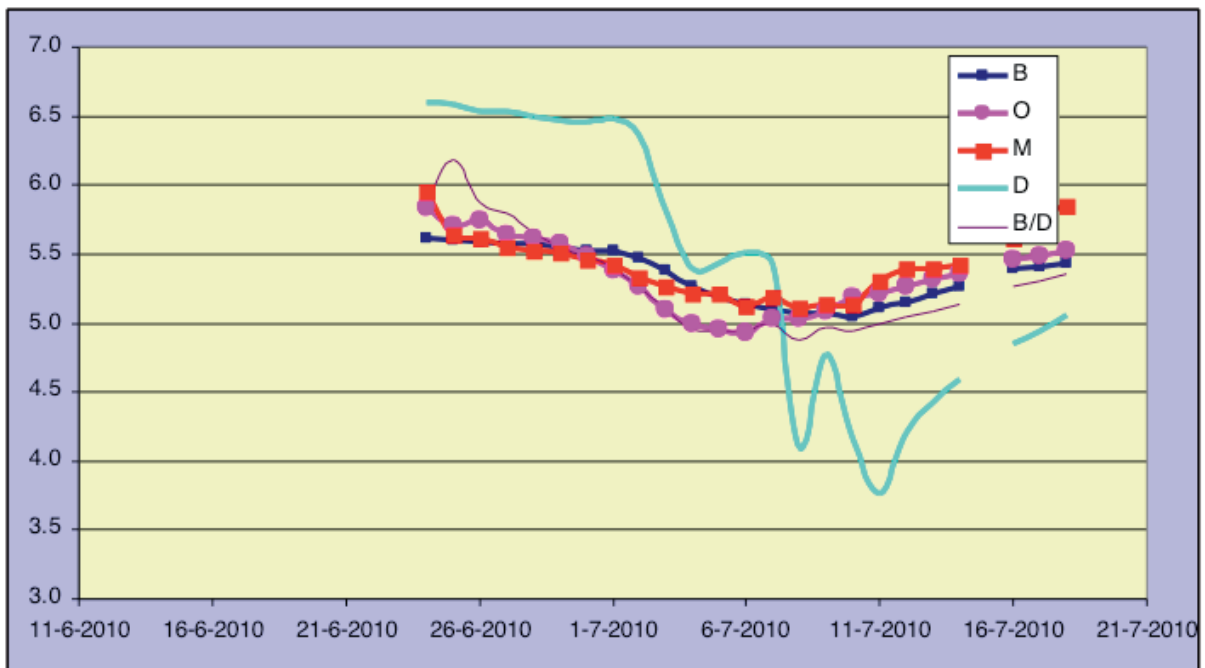
Figuur 22. Gehalte aan mycelium in de droge compost gebaseerd op een ergosterolmeting aan de compost.

Als we deze onzekere 1-1.5 kg.m² in mycelium vergelijken met de hoeveelheid NDF of hemicellulose is de berekening; 30 kg droge compost per vierkante meter waarvan 44% NDF en 6% hemicellulose. Dat is 13 respectievelijk 2 kg.m². Mycelium komt dus niet terug in de analyse als hemicellulose en de geschatte hoeveelheid mycelium is aanzienlijk kleiner dan de hoeveelheid NDF op elk moment. De hoeveelheden ADL en RF liggen na de eerste vlucht echter wel in de zelfde orde van grootte (op het einde van de teelt respectievelijk 4 en 3 kg.m². Het is dus mogelijk dat de RF is uitgeput en dat de meting uitsluitend nog het al gevormde mycelium aangeeft.

3.7 Zuurstofmetingen

Op 24-06 werden zuurstofgehalten gemeten van 17,4% g/g in de bovenlaag, 14,5% in de middenlaag en 13,2% in de onderlaag. Aangenomen dat voor elke gebruikte mol zuurstof een mol koolzuurgas gevormd wordt ($C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$) betekend dit dat er ongeveer 5, 8 en 10% g/g koolzuurgas is gevormd. In het vervolg wordt dan ook gerekend met 1-10% (10.000-100.000 ppm) koolzuurgas in de compost.

3.8 pH-metingen



Figuur 23. PH-metingen.

De pH in de compostlagen laat zien hoe de pH afneemt tot 5.0-5.5. Dit is precies de pH-range die is verwacht op grond van de CO₂ concentratie en de bijbehorende evenwichts-pH:



Pas na de eerste vlucht als het watergehalte iets daalt, zorgt de verbeterde gasuitwisseling voor lagere CO₂ en hogere O₂ concentraties en dus een hogere pH. Het is van belang de pH ter plekke in de compost te kennen omdat dat de waarde is die het mycelium ervaart.

In Figuur 23. is te zien dat de pH in de dekaarde wild en nogal onverwacht fluctueert en vooral ook laag wordt. Dit is niet bevestigd door metingen. Het enige bekende mechanisme om de pH werkelijk zo te verlagen is een grote opname van ammonium. Voor elk ion ammonium dat wordt opgenomen en ingebouwd als amine zal de champignon twee ionen H⁺ uitscheiden (NH₄⁺ = NH₂⁺ + 2H⁺). Het is echter waarschijnlijker dat de electrode in de bovenlaag last heeft van indrogen.

3.9 Laagdikte, droge bulk dichtheid, OM en as

Tabel 5. geeft een overzicht van de laboratoriumbepalingen aan de in de meetkisten ingegraven ringen in de loop van de tijd. De waarden van dichtheid en organische stof en komen overeen met op andere manieren verkregen waarden maar de fluctuatie van ring tot ring is groot. Dit heeft niet met de vulling van de ringen te maken aangezien die nauwkeurig op gewicht zijn gevuld. Het kunnen labbepalingsfouten maar misschien ook gevolgen van de relatief lange tijd tussen het wegnemen van de kisten en het moment waarop de kist is terug gekoeld (zelfs na plaatsen in de koeling nog enkele uren).

De toename van het asgehalte is 10%, dat is een derde groter dan met de NIR methode. Omdat de methode van verassen in de oven erg betrouwbaar is, verdient deze de voorkeur. De asbepaling is belangrijk voor de beoordeling van de organische voedingstoestand. De afname van de laagdikte toont dat het volume de eerste drie meetdagen gelijk blijft. Er verdwijnt wel materiaal (zie de dichtheid) maar dat gaat niet ten koste van het volume. Het mycelium stabiliseert de structuur van de compost. Pas vanaf 04-07 zakken de lagen in en wel te beginnen met de onderste. Later volgt de middelste en nog later de bovenste laag.

Tabel 5. Lab metingen aan ringen op verschillende diepten

Monsterdatum	Positie	DBD Kg.m ⁻³	Afname mm	As % g/g	OS % g/g
15-6-2010	B	165.2	0.0	34.7	65.3
	M	164.0	0.0	34.7	65.3
	O	172.1	0.0	34.2	65.8
24-6-2010	B	177.5	0.0	36.8	63.2
	M	187.0	0.0	38.8	61.2
	O	186.3	0.0	39.6	60.4
29-6-2010	B	167.5	0.0	38.3	61.7
	M	169.7	0.0	37.7	62.3
	O	174.5	2.4	37.3	62.7
4-7-2010	B	161.2	1.7	44.1	55.9
	M	159.4	1.9	40.0	60.0
	O	164.5	4.5	39.9	60.1
6-7-2010	B	175.3	2.6	43.9	56.1
	M	162.2	4.7	41.5	58.5
	O	167.1	5.6	39.8	60.2
8-7-2010	B	142.9	5.3	47.3	52.7
	M	148.6	8.1	48.5	51.5
	O	154.7	4.9	47.9	52.1
16-7-2010	B	138.7	8.8	45.4	54.6
	M	147.5	6.8	44.9	55.1
	O	152.9	6.6	44.4	55.6
B, M, O Boven, Midden, Onder					
DBD Droge Bulk Dichtheid					
Afname Hoogteverlies van de laag					
As Minerale Stof					
OS Organische Stof					

3.10 Het model

Besloten is de rapportage over het model in zijn geheel op te nemen als Bijlage .

4 Discussie

4.1 Organische voeding

In het onderzoek zijn zoals gebruikelijk de componenten van de organische voeding weergegeven als percentage van de droge stof. De hoeveelheid droge stof neemt echter zelf af in de tijd! Voor een goed begrip van de beschikbaarheid en de veranderingen die de champignon ervaart, is het belangrijk de gehalten voortaan uit te drukken als percentage een grootte die in de tijd stabiel blijft.

Een in de tijd stabiele grootte zou het asgehalte kunnen zijn. Dat komt omdat in de verhouding droge organische stof/as de hoeveelheid as onveranderlijk is, ook als het volume door verdichting verandert. Daarmee is het, als de dichtheid bij aanvang van de teelt bekend is, niet meer nodig om het volume van het monster te kennen en zijn verdichtingen /verluchtingen niet relevant meer voor het bepalen van het verlies aan voedingscomponenten (of in meer absolute zin koolstof). Het is waarschijnlijk nog beter en zeker veiliger om alle meetwaarden uit te drukken per vierkante meter bedoppervlakte en helemaal niet meer met verhoudingen te werken.

Ook het watergehalte wordt in de champignonteelt vaak uitgedrukt in g/g compost. Uit de potgrondindustrie, tuinbouw en wetenschap is bekend dat dit verhullend werkt. Een voorbeeld; als twee composten met een drooggewicht van respectievelijk 300 en 500 kg.m⁻³ allebei een vochtgehalte g/g van 60% hebben dan betekent dit dat het % v/v voor de gronden respectievelijk 45% en 75% is ($60/(100-60) * 300$ en $60/(100-60) * 500$). Omdat de aan- en afvoer van zuurstof en koolzuurgas en daarmee de myceliumgroei, reageren op het % v/v betekent dit dat de eerste compost te droog is en de tweede te nat. Een nog beter benadering zou het werken met het gehalte lucht v/v zijn, aangezien te nat eigenlijk staat voor te weinig zuurstofaanvoer en te droog voor een te grote warmte-afvoer. Het werken met luchtgehalten v/v zou dus een beter inzicht geven in de te verwachten zuurstofgehalten en temperatuur in de compost vlak vóór en na watergeven. Om de beschikbaarheid van water voor de groei te beoordelen kan echter beter in liter per vierkante meter bed gerekend worden. Steeds gaat het erom grootheden te kiezen die voor de groei van de champignons bepalend zijn.

De asmeting met de NIR methode lijkt de waarden per laag te dicht bij elkaar te brengen. Dat is met de asbepalingen door verassen niet zo. Daarom zou ervoor gekozen kunnen worden de asgehalten aan een deel van het NIR monster te bepalen op gewichtsbasis met een ovenverassing.

De toename van het vocht met de diepte is deels een gevolg van een normaal vochtverloop met de zwaartekracht (onderin is altijd natter), deels een gevolg van het hydrofobe karakter van het mycelium (iets meer mycelium in de bovenste laag). Het sturen van het watergehalte van de compost door aanvoer van water door de dekaarde naar de doorgroeide lagen is dus niet eenvoudig te sturen. De afbraak van organische stof is niet direct gekoppeld aan het watergehalte. Water is nodig voor het transport van bacteriën en voeding, maar niet voor de verbrandingsreactie. Water is wel nodig voor het koelen van de verbrandingswarmte. Een te hoog watergehalte onderin kan leiden tot een te trage aanvoer van zuurstof en daardoor een langzamer dan nodige vertering. Een te laag watergehalte maakt het bacteriën en schimmels onmogelijk alle delen van de compost te benutten. Een te laag watergehalte en te hoog gehalte luchtgevulde poriën kan mogelijk ook leiden tot een te grote afvoer van warmte.

De meting geeft aan hoeveel organische stof is verdwenen in de vorm van koolzuurgas, maar niet hoeveel organische stof er verteerd is. Dit omdat de hoeveelheid koolstof die is omgezet van compost naar mycelium nog onbekend blijft. Daarom was de ergosterol bepaling als maat voor de hoeveelheid mycelium nodig om te schatten hoeveel compost werkelijk is verteerd.

De hoeveelheid mycelium lijkt met 15 liter per vierkante meter, overeenkomend met 1-1,5 kg.m⁻² droog mycelium, lager dan intuïtief verwacht werd. Mycelium wordt waarschijnlijk meegemeten in één of twee van de gemeten fracties hemicellulose, cellulose of lignine. Dus op het einde van de teelt, als er nog 0-0.5 kg.m⁻² hemicellulose is, en 3.9 kg.m⁻² cellulose en 3.9 kg.m⁻² lignine, (Bijlage V, Tabel 1.), is nog 1-1.5 kg daarvan mycelium dus niet meer beschikbaar voor vertering.

Dat zou kunnen betekenen dat de gemeten hemicellulose al in het mycelium zit en dat de beschikbaarheid dus nog lager is dan uit de metingen blijkt. De ergosterol methode moet waarschijnlijk verder geoptimaliseerd worden voordat hieruit harde conclusies getrokken kunnen worden, maar biedt perspectief.

De NIR bepalingen laten uitputting zien van hemicellulose. Als dit bewezen wordt kan de productie van compost wellicht gestuurd worden op hemicellulosegehalte, of beter nog op het geleidelijk vrijkomen van hemicellulose. Er zou mogelijk met laboratoriumexperimenten getest kunnen worden of toedienen van fijn verdeelde hemicellulose aan uitgeputte compost de groei herstelt tot (of vasthoudt op) normale waarden als bewijs van uitputting. Uitgedrukt op de hoeveelheid as blijkt werkelijk 90-100% in de bovenste twee lagen en 60% in de onderste laag te worden verteerd. Hemicellulose is daarmee een belangrijke kandidaat voor een productie beperkende factor bij hergebruik van compost.

De uitputting van ammonium in de NIR analyse resultaten is in tegenspraak met de bepaling van ammonium volgens de 1:1,5 analyse. Vooralsnog is de 1:1,5 analyse geloofwaardiger omdat de ammonium in de NIR monsters vervolgen kan zijn, in reactie op de hogere pH.

Het is duidelijk dat de NIR analyse fracties van organische stof laat zien die van belang zijn voor de groei van de champignon. De NIR analyse is gekalibreerd met de natchemische methode die nog steeds standaard is in de voederanalyse in de veeteelt. NIR is snel en de analyses zijn erg reproduceerbaar. Een probleem met NIR is echter dat het niet precies aangeeft wat er wordt afgebroken en wat de absolute waarden zijn. Voor trend analyse is de NIR echter wel geschikt. Voor een goed inzicht in afbraak (kwalitatief en kwantitatief) zou een biochemische of DNA gebaseerde meting als high throughput screening gebruikt kunnen worden. Voor analyse van stro zijn deze ontwikkeld (Alonso-Simón *et al.* 2010) en zouden misschien gebruikt kunnen worden voor analyse van complexe koolhydraatfracties in compost.

De kennis van de NIR bepaling en wat de waarden voorstellen is niet diep genoeg om gerichte ontwikkelingen van compost en vulstrategieën in de praktijk in gang te zetten. Het lijkt verstandig dit in samenwerking met de toeleverende industrie verder gestalte te geven.

4.2 Minerale voeding

De EC van de oplossing in contact met het mycelium is hoog, 8-12 dS.m⁻¹ in het 1:1,5 vocht en 20-40 dS.m⁻¹ in het vrije vocht. Dit laat goed zien dat champignon een coprofy is, aangepast aan hoge zoutgehalten. De oplossing in de champignon moet in osmotisch evenwicht zijn met 20-40 dS.m⁻¹. 1 dS.m⁻¹ komt overeen met 35 kPa aan zuigspanning, dat is 350 cm waterkolom. De zuigspanning in de champignon zou dus -0.7 tot -1.4 MPa of 70-150 meter zuigspanning moeten zijn. Kalberer (2006) schat de waarden van de champignon op -0.6 tot -0.9 MPa wat in dezelfde orde van grootte ligt. De champignons bevatten hier veel te weinig zout voor en moeten dus osmotisch actieve stoffen aanmaken die het evenwicht bewaren. Bij de champignon zijn dit vooral mannitol en in mindere mate ureum. Een verhoging van het zoutgehalte in de compost heeft vreemd genoeg geen effect op de osmotische waarde van champignons en ook geen effect op het droge stofgehalte of totale opbrengst (Kalberer, 1995). Zout toevoegen aan de dekaarde heeft echter wel een effect op het droge stofgehalte van champignons en dit wordt inderdaad veroorzaakt door een verhoging in het mannitol gehalte (Stoop & Mooibroek, 1998). Mannitol heeft een licht zoete smaak maar of een verhoogd mannitol-gehalte invloed heeft op de smaak is nooit getest.

De watergift heeft grote invloed op de EC in de bovenlaag want deze bestaat uit schoon water. Wat zou er gebeuren met smaak en productie als in dit water 0-10 dS.m⁻¹ minerale voeding wordt gegeven?

Opmerkelijk is dat hoewel de hoeveelheid champignonmassa sterk toenam, de concentratie opgeloste of vrije minerale voeding min of meer gelijk bleef. Het kan zijn dat de champignon zelf het compostmilieu stabiel houdt. Testen met variatie in EC of osmotische waarde kunnen hier duidelijkheid verschaffen. Dit kan van belang zijn voor de telers en voor irrigatie met in verhouding zeer lage EC hoewel water gegeven via de dekaarde voor een gedeelte door de compost heen loopt en niet of nauwelijks door de hydrofobe compost wordt opgenomen.

Uit de totaal analyses van de compost blijkt dat maar 10-20% van de aanwezige minerale voeding wordt opgenomen door de champignons. In de oplossing is wel 60% van het totaal aanwezige kalium en maar 34% van het aanwezige ijzer beschikbaar. Het naleveren door vertering is voor ijzer dus van belang. Bovendien blijkt dat van de Bijmesten van ijzer en mogelijk zink in chelaatvorm kan daarom interessant zijn. Geteste toevoegingen van opgeloste mineralen aan de compost in het verleden hebben weliswaar nauwelijks effect getoond zoals in Weil *et al.* 2006 ijzer geen effect toont en alleen Mn een ca. 10% verhoging op de opbrengst lijkt te hebben. De toevoeging was echter in de vorm van Scotts Micromax waarin ongechelaateerd ijzer zit. Dit kan dus door dezelfde evenwichten als het al aanwezige ijzer neerslaan in niet opneembare vorm.

Het blijkt dus nuttig om de minerale voedingstoestand te bekijken op twee manieren. Ten eerste als concentratie (EC of mmol.L⁻¹) om absolute tekorten/overmaat op te merken. En ten tweede als absolute hoeveelheid om te zien of nalevering uit de compost mogelijk is en of toevoegen zin heeft. In de totaal analyse zit zowel de voeding in oplossing als ook de hoeveelheid nog gebonden in de compost. De totaal analyse levert de absolute hoeveelheid per kg aangeleverde droge stof monster. Om per vierkante meter te werken moet worden omgerekend naar kg of mol per m² bed.

De pH in de compostlagen blijkt 5.0 tot 5.8 te zijn. Dit klopt met de geschatte koolzuurgasconcentraties van maximaal 10% v/v (100.000 ppm). De gebruikelijke pH metingen aan compost betreffen een in water geschud monster waaruit de CO₂ uiteraard grotendeels is verdwenen. De meting is overgenomen uit de grond / substraatteelten waar de CO₂ waarden meestal niet hoog genoeg zijn om de pH te beïnvloeden. Voor een juist begrip van de groei van champignons is een betere meetmethode van belang omdat het mycelium de pH in de compost ervaart en beïnvloedt.

De 10% volgt uit de gemeten zuurstofgehalten van minimaal 13%. Hierbij wordt aangenomen dat zuurstof 1:1 wordt omgezet in CO₂. De aanname is dat de compost volledig aerob wordt omgezet volgens;



De zuurstofmetingen laten ook een aantal hoge waarden van 21% zien. Er wordt aangenomen dat dit wordt veroorzaakt door lekken van de meetbuizen. Als dit niet zo is, betekent dit dat de 10% lagere watergehalten al kunnen leiden tot drastisch beter beluchting. Dat kan ongunstig zijn omdat hierdoor de pH op kan lopen en ammonia kan ontstaan uit ammonium. Dat de aan en afvoer van zuurstof dramatisch kan versnellen met betrekkelijk kleine wijzigingen in luchtgehalte v/v is op zich bekend (Blok en Wever, 2008).

4.3 Vochtmetingen

Het vochtgehalte neemt gedurende de teelt volgens de vochtmeters 10-20% af maar volgens de waarden gemeten aan de compost varieert dit van 5 tot 4% droger aan het einde van de teelt in de bovenste, respectievelijk middelste laag tot een 2% natter in de onderste laag. Dit duidt op een probleem met één van de metingen of allebei de metingen. Omdat de vochtmeters compenseren voor de EC in het medium en deze met 20-40 dS.m⁻¹ veel hoger ligt dan de 0-6 en 0-10 dS.m⁻¹ in het bodemvocht waarvoor dit type meters is gemaakt, wordt de meting door vochtmeters van het FD en TDR type gewantrouwd. Het is verstandig voor deze metingen over te stappen op loadcells en de EC met aparte meters te volgen. Mogelijk is de Aquaflex meter (Jes technology) geschikt als EC meter, met als bijkomend voordeel dat de meter over een aanzienlijk lengte meet en het monstervolume dus representiever is.

Te droge compost verliest gemakkelijk energie en koolzuurgas waarbij het zuurstofgehalte toeneemt. Het watergehalte is een verzekering voor het stabiel houden van het milieu in de compost.

4.4 De balansen voor koolstof, water, energie en minerale voeding

De koolstofkringloop laat zien dat in twee vluchten per m² 2.5 kg koolstof (C) wordt omgezet uit compost. Van deze hoeveelheid wordt ongeveer 1.5 kg (60%) afgevoerd met de ventilatielucht en 1.2 kg (40%) in de vorm van champignons en voetjes. Dit laat nog onbesproken dat een ander deel van de compost wordt omgezet in mycelium. De aanname dat 50% van de organische stof in compost bestaat uit koolstof is bekend uit de veen en houtwereld. Voor compost noemt Anton Sonnenberg 47% maar de waarde zal ongetwijfeld fluctueren per batch. Voor champignon is eerst ook 50% verondersteld maar dit bleek bij nameten 48%.

De waterbalans laat zien dat er per m² 37 liter water wordt gegeven. Er verdwijnt nog 12 liter door 1-2% indrogen en nog 4 liter komt vrij door het verbranden van koolstof volgens de reactie $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$. Samen is dit 53 liter. De afvoer bestaat uit 23 liter afvoer door de buitenlucht en 30 liter opname door de champignons. Samen 53 liter dus bijna identiek aan de aanvoer uit de compost.

De energiebalans is op te stellen doordat de hoeveelheid verdampt water een verdampingswaarde vertegenwoordigt die is te berekenen op 60 MJ.m². De omgezette compost staat voor een energie productie van 77 MJ.m². De aanname voor de energieproductie is dat de compost een verbrandingswaarde vertegenwoordigt van 15 MJ.kg⁻¹ droge stof. Dit zal later door metingen aan de compost verder moeten worden getest. Dit getal kan per compost verschillen en kan met een aangepast DEWAR vat worden gemeten.

De balans voor minerale voeding laat zien dat 12 mol.m² wordt opgenomen door de champignons terwijl 16 mol.m² uit de compost verdwijnt. Hierbij is al rekening gehouden met een verlies van 6 mol voor een nog onverklaard verlies aan calcium en zwavel. Het vermoeden is dat dit als CaSO₄ is neergelagen, mogelijk in de dekaarde. Dit is beslist mogelijk aangezien de evenwichtsconstante van CaSO₄ $7.1 \cdot 10^{-5}$ is zodat hieruit volgt dat bij gelijke concentraties Ca en SO₄ al neerslag ontstaat bij gehalten boven de 8.4 mmol.L⁻¹ Ca.

5 Conclusies

5.1 Conclusies

Balansen

Met de verzamelde gegevens kon de koolstofbalans redelijk worden opgezet. Uit de compost komt per vierkante meter 2.5 kg.m^{-2} koolstof vrij en er wordt 2.7 kg.m^{-2} koolstof afgevoerd als respectievelijk koolzuurgas (1.5 kg.m^{-2}) en als geogoste champignon (1.2 kg.m^{-2}).

De waterbalans laat zien dat de aanvoer uit de compost 53 l.m^{-2} bedraagt en de afvoer via ventilatie en champignons 53 l.m^{-2} . De aanvoer is opgebouwd uit watergift, vochtverlies compost en verbrandingswater (respectievelijk 37, 12 en 4 l.m^{-2}). De afvoer is onderverdeeld in ventilatie-afvoer en afvoer in de champignons (respectievelijk 23 en 30 l.m^{-2}).

De energiebalans laat zien dat uit de compost 77 MJ.m^{-2} vrijkomt en dat 60 MJ.m^{-2} wordt afgevoerd in waterdamp. De verbrandingswaarde van compost is hierbij de grootste onzekerheid.

De minerale voedingsbalans toont een levering uit compost van 20 mol.m^{-2} en een afvoer in champignon van 12 mol.m^{-2} . Als wordt gecorrigeerd voor een op afvoer van gips duidende calcium en zwavel piek, is de aanvoer uit compost 16 mol.m^{-2} . Er wordt 10-20% van de minerale voeding in de compost afgevoerd in geogost product. De concentraties van elementen in oplossing blijven opmerkelijk stabiel gedurende de teelt. Er is wel invloed van het watergeven met water zonder mineralen.

Organische voeding

De toename in asgehalte duidt op een koolstofverlies van 30% droge stof in de bovenlagen en 10% in de onderlaag. De methode van bepalen lijkt hier nog veel invloed te hebben op de mate van vertering gemeten in de onderlaag.

Hemicellulose en mogelijk RF worden in de loop van de vluchten uitgeput in de bovenste twee lagen en kunnen beperkend zijn voor een vervolgteelt.

Minerale voeding

De EC is steeds hoog; 10 dS.m^{-1} in het 1:1,5 extract, d.w.z. ongeveer $20\text{-}40 \text{ dS.m}^{-1}$ in de compost oplossing!

De teelt pH is veel lager dan de literatuur opgeeft, tot wel 5.0 in de onderlagen op 08-07-2010. Dit stemt ruwweg overeen met de voorspelde pH bij 10000 ppm CO_2 .

Beschikbaar ijzer en zink worden in de loop van de vluchten uitgeput in de bovenste twee lagen en kunnen beperkend zijn voor een vervolgteelt.

De gehalten minerale voeding in de bovenlaag zijn vanaf het begin lager en lijken het gevolg van beregenen. De invloed van beregenen op de EC verdient nader onderzoek.

Het nitraat gehalte bij NIR analyse vertoont een piek, mogelijk als gevolg van conversie in het Mycelium.

5.2 Lessen uit losse metingen

De vochtbalans kan op verschillende manieren berekend worden waarbij elektronische vochtgehaltemetingen minder betrouwbaar zijn dan op gewicht gebaseerde metingen. Dit omdat de vochtmeting gestoord wordt door de meter te hoge EC's.

Afvoer van koolstof via CO_2 in de ventilatie is een belangrijke component in de koolstofbalans, en de ventilatieberekening bevat een onnauwkeurigheid van misschien wel 20%.

De koolstof gehalten van compost en champignons vormen een heel belangrijke factor in de koolstofbalans en behoren apart bepaald te worden. De vermelde aannames (koolstof gehalte compost en champignons beide 50%) bleken bij nameten goed te kloppen.

5.3 Aanbevolen meetplan

Het werken per teeltlaag met een scheiding van netten werkt bijzonder goed. Dit kan een standaard onderzoekstool worden. De bepaling van nat en drooggewichten en laagdikten kunnen het beste gebeuren aan deze lagen, dat werkt eenvoudiger en betrouwbaarder dan aan ingebrachte ringen. Belangrijk is dat de periode van monsteropslag beperkt wordt of dat de monsters worden ingevroren.

Volg de gewichten gedurende de teelt met loadcells onder meetbakken, niet met FD meters. Gebruik in plaats van FD meters temperatuur sensoren en load cells. De pH sensoren voldoen. De NIR metingen zijn heel belangrijk maar moeten worden gerapporteerd in absolute waarden (omrekenen via de asbepaling). De NIR-asbepaling moet worden gekalibreerd met een op oven verassing gebaseerde methode aan monsters die tegelijk met de NIR monsters ingevroren zijn.

De gasbuizen moeten vooraf geprepareerd worden. Ze zijn heel gevoelig voor kleine verstoringen inclusief de natuurlijke krimp van de lagen. Het voorstel is daarom de buizen in de laag te begraven en een flexibele slang naar de bovenkant of zijkant van de bak te leiden. Stoten op de uitvoer van de slang kunnen zo niet doorweken op de ingebrachte buis.

5.4 Verdere proeftechnische aanbevelingen

Als de proef van 2010 herhaald wordt om de balansen te berekenen zouden een aantal punten verbeterd kunnen worden. Analyse van de kisten zou frequenter kunnen gebeuren, bijvoorbeeld iedere 2 dagen. Deze analyse kan beperkt worden tot gegevens die voor de balansen nodig zijn, terwijl de nutriënten analyse misschien minder vaak nodig is (bv alleen op essentiële dagen zoals nu gedaan is). De bepaling van vochtgehalte, organische stof gehalte en asgehalte volstaat.

Het werken met vochtgehalte en FD meters wordt afgeraden. Beter is het met loadcells te werken omdat gewicht een betrouwbare meting is en de vochtmeters teveel hinder van de EC lijken te hebben.

De data moeten op een systematische manier bepaald en weggeschreven worden zodat draaitabel analyses mogelijk zijn. De oogstdata moeten geregistreerd worden als de oorspronkelijke meetdata (gram per kist) en niet in bewerkte vorm (gram.m⁻²). Omrekeningen zijn snel genoeg te maken met de draaitabellen.

Het zou goed zijn om een foutenanalyse of een schatting van de onnauwkeurigheid te maken van de bepaling van de luchtuitwisseling.

5.5 Aanbevelingen voor vervolg

In het licht van de aandachtspunten in de doelstelling (verminderd gebruik van compost, systeem innovatie en minder veen in de dekaarde) wordt aanbevolen:

De proef te herhalen met een andere compost om de geldigheid van de mogelijk beperkende rol van hemicellulose, ijzer en zink verder te testen.

Vervolgproeven op te zetten met het toevoegen van afwijkende hoeveelheden hemicellulose en cellulose voor en tijdens de teelt.

Vervolgproeven op te zetten met detailmetingen van watergehalte, lucht en koolzuurgasgehalte en de invloed van die grootheden op de efficiëntie van omzettingen van hemicellulose en cellulose. Meer specifiek wordt aanbevolen te kijken naar de rol van zuurstofdifusie op de vorming van warmte en koolzuurgas (waarbij aangenomen wordt dat het watergehalte de zuurstofdifusie sterk beïnvloedt).

6 Literatuur

- Amsing, J. 2009.
Optimalisatie vochtvoorziening onder uitgroeiende champignons. Fase 2: Doseerpunt van water in compost. H. DLV PLant, the Netherlands, ed.
- Amsing, J. 1987.
Koolzuurmetingen tijdens de vegetatieve fase van *Agaricus bisporus*. De Champignoncultuur 31:99-111.
- Amsing, J. 1984.
CO₂ productie en ventilatiebehoefte tijdens de oogstperiode van *Agaricus bisporus*. De Champignoncultuur 28:291-301.
- Amsing, J. 1986.
Koolzuurmetingen tijdens het uitzweten van compost in een teeltcel. De Champignoncultuur 30:489-503.
- A.S.M. Sonnenberg, J. Amsing, E. Hendrix, 2009.
Naar een betere benutting van het substraat in de champignonsteelt. Compost als modelsysteem. PRI Paddenstoelen, PRI rapport nr. 2009-1
- Baars, J., and Sonnenberg, A. 2009.
Myceliumgroei en Champignonproductie in relatie tot water en minerale voeding - literatuuronderzoek. WUR, PRI rapport 2009-4.
- Bechara, M. A., Heinemann, P., Walker, P. N., and Romaine, C. P. 2006.
Agaricus bisporus Mushroom Cultivation in Hydroponic Systems. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 49:825-832.
- Blok, C. and G. Wever (2008). "Experience with Selected Physical Methods to Characterize the Suitability of Growing Media for Plant Growth." *Acta Horticulturae* 779: 239-250.
- Flegg, P. B. 1974.
The water requirement of the mushroom crop. *Scientia Horticulturae* 2:237-247.
- Gerrits, J. P. G. 1969.
Organic compost constituents and water utilized by the cultivated mushroom during spawn run and cropping. The international Society for Mushroom Science. Proceedings 7:1-19.
- Gielen J. 2002.
Meet & informatiesysteem warmte vocht en CO₂-afgifte. C-point Horst.
- Kalberer, P. P. 1987.
Water potentials of casing and substrate and osmotic potentials of fruit bodies of *Agaricus bisporus*. *Scientia horticulturae* 32:175-182.
- Medina, E., Paredes, C., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., and Moral, R. 2009.
Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresource technology* 100:4227-4232.
- Noble, R., and Dobrovin-Pennington, A. 2005.
Partial substitution of peat in mushroom casing with fine particle coal tailings. *Scientia Horticulturae* 104:351-367.
- Noble, R., Fermor, T. R., Lincoln, S., Dobrovin-Pennington, A., Evered, C., and Mead, A. 2003.
Primordia initiation of mushroom (*Agaricus bisporus*) strains on axenic casing materials. *Mycologia* 95:620-629.
- Noble, R., Dobrovin-Pennington, A., Evered, C. E., and Mead, A. 1999.
Properties of peat-based casing soils and their influence on the water relations and growth of the mushroom (*Agaricus bisporus*). *Plant and soil* 207:1-13.
- Pardo, A., de Juan, A. J., Pardo, J., and Pardo, J. E. 2004.
Assessment of different casing materials for use as peat alternatives in mushroom cultivation. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2:267-272.
- Plant, D. 2009.
Optimalisatie vochtvoorziening onder uitgroeiende champignons. Fase 2: Hoeveelheid en tijdstip. H. DLV PLant, the Netherlands, ed. Royse, D.J., Sanchez, J.E., Beelman, R.B., Davidson, J., 2008.
Re-supplementing and recasing mushroom (*Agaricus bisporus*) compost for a second crop. *World J. Microbiol.*

Biotechnol. 24, 319–325.

Royse, D., P. 2010.

Effects of fragmentation, supplementation and the addition of phase II compost to 2nd break compost on mushroom (*Agaricus bisporus*) yield. *Bioresource Technology* 101:188-192.

Wever, G., van der Burg, A. M., and Straatsma, G. 2005.

Potential of adapted mushroom compost as a growing medium in horticulture. *Acta Horticulturae* 697:171-177.

Wiegant, W. M., Wery, J., Buitenhuis, E. T., and De Bont, J. A. M. 1992.

Growth-Promoting Effect of Thermophilic Fungi on the Mycelium of the Edible Mushroom *Agaricus bisporus*.

APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY:2654-2659.

Bijlage I Metingen

1 Kist	Kistgewicht	Load cels	4	5-15 minuten
3 Kisten	Watergehalte	FD-meter	4	5 minuten
	EC	FD	4	5 minuten
	Temperatuur	FD	4	5 minuten
1 Kist	pH	pH	3	5 minuten
1 Kist	Zuurstof	Zuurstofmeter	1	incidenteel
	Koolzuurgas	?		
1 Kist	Vochtspanning	Tensiometers	4	1 dag
12 kisten netten	Compost minerale voeding	Hoofd en sporen	3	7 momenten
	Compost minerale voeding	Watergehalte	3	7 momenten
	Compost minerale voeding	Gehalte OM		7 momenten
	Compost minerale voeding	As		7 momenten
	Compost Fracties OM	NDF/ADF/ADL	1	7 momenten
	Compost mycelium	Ergosterol HPLC	2	7 momenten
12 kisten ringen	Compost Fysisch	Bulk Dichtheid	1	7 momenten
	Compost Fysisch	Porienvolume		7 momenten
12 kisten	Dekaarde	Watergehalte		7 momenten
	Dekaarde	ergosterol		7 momenten
Celniveau	RV in	RH meter Vailsala	1	5 minuten
Celniveau	RV out	RH meter Vailsala	1	5 minuten
Celniveau	CO ₂ in	koolzuurmeter	1	5 minuten
Celniveau	CO ₂ out	koolzuurmeter	1	5 minuten
Celniveau	volume in	flow meter	1	5 minuten
Celniveau	volume out	flow meter	1	5 minuten
Celniveau	T cel	Pt 100	1	5 minuten
Celniveau	RV ruimte	RH meter Vailsala	1	5 minuten
Celniveau	Wateraanvoer	Flowmeter	1	5 minuten
Alle kisten	Champignons	Gewicht	1	dag
Alle kisten	Champignons	Droge stof	1	2 vlucht; sort. F en M
Alle kisten	Champignons elements	Analyse	1	2 vlucht; sort. F en M
Alle kisten	Voetjes	Gewicht	1	dag
Alle kisten	Voetjes	Droge stof	1	Gemidd. per vlucht

Bijlage II Ventilatiesnelheid

Voor het berekenen van de CO₂, vocht- en warmte balansen voor een champignonteelt bij WUR in cel 3 in juni-juli 2010 ("input/output experiment"), hebben we gebruik gemaakt van meetdata van de AEM computer. Het gaat vooral om ventilatie, CO₂ concentratie, temperatuur en luchtvochtigheid. Voor iedere balans is de formule heel simpel:

$$\text{afvoer} = \text{ventilatiesnelheid} \times \text{verschil in concentratie tussen binnen en buiten}$$

Voor de koolstof balans wordt de CO₂ concentratie ingevuld, voor de waterbalans is het de vochtconcentratie en voor de warmtebalans is het temperatuur. (Vervolgens vinden omrekeningen plaats zoals van CO₂ naar koolstof, enz).

In al drie de balansberekeningen is de ventilatie van essentieel belang, of eigenlijk de ventilatiesnelheid of luchtuitwisselingsnelheid in m³ per uur. De ventilatiemetingen in de teeltcel van WUR zijn enigszins ingewikkeld. Daarom is gekeken naar een rapport over dit onderwerp van Gielen (2002) van het bedrijf C point uit Horst. Hun doelstelling was een meetstelsel te ontwikkelen en testen waarmee de CO₂, vocht- en warmte balansen van champignoncellen berekend kunnen worden. Zij maakten ook gebruik van meetdata uit de computer in de meetcel (*of misschien heeft C point meegewerkt aan de opzet van het meetstelsel en AEM computersysteem?*). Gielen beschrijft de berekeningswijze voor de balansen op pagina's 6 – 11 en 22-26. Hun berekeningswijze is anders dan die van ons, veel uitgebreider, en wordt hier achterwege gelaten om verwarring te voorkomen. Hieronder worden wel enkele paragrafen uit Gielen (2002) gekopieerd, om aan te tonen dat de ventilatiemeting tamelijk onzeker en onnauwkeurig is.

Luchthoeveelheden op basis van berekeningen

De inblaasluchthoeveelheid zou in eerste instantie bepaald worden m.b.v. de stand van de frequentieregelaar, het door de frequentieregelaar afgegeven vermogen en de ventilator karakteristiek (CNM 400D). De karakteristiek van de ventilator wordt opgebouwd uit een aantal formules met daarbij behorende dimensieloze grootheden (3 stuks). Deze dimensieloze grootheden horen ieder bij een bepaald gedeelte van de karakteristiek. Er zijn ook punten binnen de grafiek die niet direct door deze dimensieloze grootheden vastgelegd zijn. Daarvoor moeten de waarden van de dimensieloze grootheden door interpolatie worden vastgesteld. Hiermee wordt weer een extra stuk onbetrouwbaarheid ingebouwd. De betrouwbaarheid neemt nog verder af omdat met de gebruikte formules maar voor een beperkt gebied van de ventilator karakteristiek betrouwbare metingen afgeleid kunnen worden. Daarnaast is het afgegeven

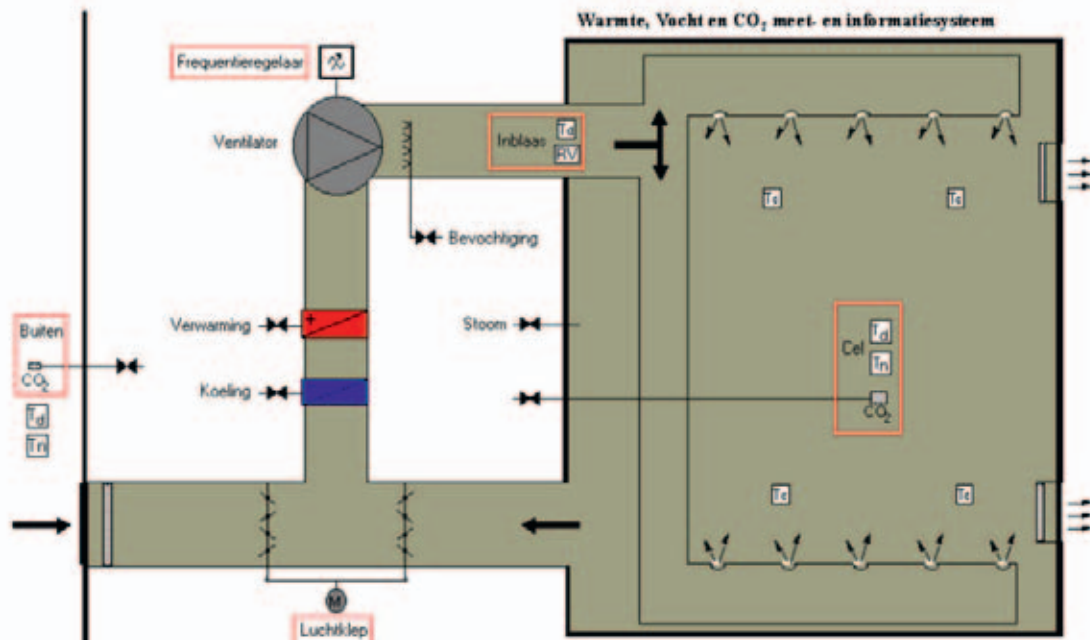
Luchthoeveelheden op basis van grafiek meetrapport

Om toch tot de juiste luchthoeveelheden voor verversing en inblaas te komen, werd er besloten om de luchthoeveelheidsberekening te doen op basis van een meetrapport van handmatig uitgevoerde luchthoeveelheidsmetingen. Mede omdat de luchtklep karakteristiek niet lineair verloopt, zijn bij verschillende ventilator- en luchtklepstanden de luchthoeveelheden gemeten. Deze meetgegevens zijn uitgezet in grafieken. Met behulp van een rekenprogramma (Mathcad) zijn uit deze grafieken de uiteindelijke formules afgeleid die specifiek bij deze kwekerij horen. De op deze wijze berekende luchthoeveelheden zijn weliswaar nog beperkt afhankelijk van de variatie in filterweerstand (erversing), maar met tijdig onderhoud is dit te verwaarlozen. Op deze wijze kan men met de bestaande apparatuur en een aanpassing in de software de luchthoeveelheden met voldoende nauwkeurigheid berekenen. Mits er geen grotere aanpassingen in de kwekerij plaatsvinden (overdruk openingen, verschillende soorten filters, luchtkleppen etc.) geeft dit betrouwbare resultaten, waarbij de cellen onderling goed vergeleken kunnen worden.

Conclusie (1): de ventilatiesnelheid die wij gebruikt hebben voor onze balansberekeningen (die is afgeleid uit twee flowmetingen geregistreerd via de AEM computer), bevatten een tamelijk grote onzekerheid en onnauwkeurigheid.

Berekening ventilatiesnelheid

De berekening van de ventilatiesnelheid is niet eenvoudig, omdat er drie ventilatoren waren (aanvoer, recirculatie en afzuig), en slechts twee flowmetingen (aanvoer en recirculatie). Er wordt een drukverschil opgebouwd tussen de cel en buiten, en er zijn filters aanwezig in de ventilatiekanalen die weerstand geven. Deze factoren hebben misschien invloed op de flowmetingen.



Figuur 1. Schematisch overzicht (bovenaanzicht) van de teeltcel bij WUR (bron Gielen, 2002).

Ed Hendrix en ook computerleverancier AEM bevelen aan om ventilatie te berekenen als *aanvoerflow minus recirculatieflow*. Het werd betwijfeld of dit nauwkeurig is. In de eerste plaats zijn de 2 flowmetingen geen directe metingen, maar op een ingewikkelde manier afgeleid uit andere metingen (zie bijlage I). Ook vindt er ongecontroleerde luchttuitwisseling plaats als de deur open is. Er bestaat een gedetailleerd rapport over dit systeem gemaakt door C point uit Horst (Gielen, 2002). Zie schema in Figuur ., en verdere details in Bijlage I. Over de ventilatiemeting is een *second opinion* gevraagd aan Bart van Tuijl en tevens zijn testmetingen uitgevoerd door van Ed Hendrix (zie Bijlage I-b). De conclusie is dat het inderdaad de beste manier is om ventilatiesnelheid te benaderen als *aanvoerflow minus recirculatieflow*. Het rapport van Gielen (2002) geeft echter duidelijk aan dat de bepaling van de ventilatiesnelheid slechts een globale benadering is (Bijlage I).

Test ventilatiesnelheid

Om de ventilatiemetingen te testen zijn metingen uitgevoerd door Ed Hendrix aan de ventilatie en afzuig. Voor de test werden de ventilator en luchtclep constant gehouden en werd de afzuig ventilator gevarieerd. Doel was om te testen of de waarde van 'Inblaas minus recirculatie' beïnvloed werd door de afzuig ventilator. Daarom is de afzuigventilator stapsgewijs opgevoerd van 0 naar 80%, en zijn de inblaas- en recirculatieflow geregistreerd. Resultaten staan in onderstaande tabel.

Tabel II-1. Metingen aan het effect van afzuigventilator in cel 3.

max luchtklep %	10	10	10	10	10	10	10	10	10
min luchtklep %	10	10	10	10	10	10	10	10	10
max ventilator %	35	35	35	35	35	35	35	35	35
min ventilator %	35	35	35	35	35	35	35	35	35
verschuldruk Pa		3	4	-2	-20	-37	-50	-50	-50
max afzuig ventilator %	0	10	20	30	40	50	60	70	80
min afzuig ventilator %	0	10	20	30	40	50	60	70	80
inblaasflow m ³ /uur	220	218	220	219	220	225	227	232	231
recirculatieflow m ³ /uur	193	192	194	195	190	183	179	176	172
Ventilatiesnelheid = inblaas – recirculatie	27	26	26	24	30	42	48	56	59

Conclusie (2): De afzuigventilator had geen effect op de berekende ventilatiesnelheid, zeker niet bij lage stand van de afzuigventilator.

Eindconclusie: de ventilatiesnelheid (luchtuitwisselingssnelheid) die wij gebruikt hebben voor onze balansberekeningen bevat een tamelijk grote onzekerheid en onnauwkeurigheid. De afzuigventilator had geen effect op de ventilatie, en wordt terecht niet meegenomen in de ventilatieberekening.

Bijlage III Details van de balans berekeningen

Ervaringen bij het meten

Eenheden gebruikt voor metingen en berekeningen

In de berekeningen zijn veel verschillende eenheden gebruikt voor de koolstofstromen, ook voor de 'basis' eenheden, namelijk per m², per kist en per cel. Dit was nodig omdat de data werden aangeleverd in verschillende eenheden: oogstgegevens in gram/m², compostanalyse in gram per kist, en ventilatie was berekend voor de hele cel. De tweede reden is dat het aantal kisten in de cel niet constant was. Bij aanvang (15 juni) waren er 78 kisten in de cel aanwezig en op het einde (16 juli) nog maar 52. Bij iedere omrekening (bv van 'gram per cel' naar 'gram per kist' of 'gram per m²') moest worden gerekend met het aantal kisten in de teeltcel op die dag.

Verder waren er omrekeningen nodig van gram naar kilogram; van liter naar gram; van ppm naar mg/m³ CO₂ concentratie; en van minuut naar uur naar dag naar hele periode. In de spreadsheet zijn de eenheden steeds vermeld

Koolstof uit compost

Het is bekend dat de compost wordt afgebroken, en dat de vrijkomende koolstof opgenomen wordt door de champignons. De hoeveelheid compost in de kisten neemt af tijdens de teelt (in dikte en gewicht). Aangenomen wordt dat de dekaarde niet meedoet in de compost omzetting, en ahw een inerte laag vormt.

Bij aanvang van de proef waren 78 kisten gevuld ieder met 3 lagen van elk 5.5 kg compost + 7250 gram dekaarde. Op een aantal strategisch gekozen dagen waren een paar kisten uit de cel gehaald en gewogen en geanalyseerd. Deze dagen waren bij inzet (15 juni), bij afventileren (24 juni), knopvorming (29 juni), aanvang oogst eerste vlucht (4 juli), halverwege eerste vlucht (6 juli), kaalpluk (8 juli), aanvang oogst tweede vlucht (15 juli), en op de einddatum (16 juli). Op 16 juli stonden er nog 52 kisten in de cel met gemiddeld nog 13.0 kg compost + resterende dekaarde per kist.

Uit de verandering (meestal afname) van het gewicht tussen twee dagen kon worden berekend hoeveel de gemiddelde afname was in de voorgaande dagen sinds de laatste waarneming.

Per datum werden 2 of 4 kisten bemonsterd. Aan de 3 lagen compost werd onder andere het volgende bepaald: gewicht, vochtpercentage, asgehalte. (Alle andere waarnemingen zijn niet gebruikt voor de koolstofbalans). Helaas was het koolstofgehalte (als % van drooggewicht) niet bekend, en hiervoor moest een aanname gemaakt worden. De theoretisch maximale waarde is 58%, maar dit cijfer gaat gauw omlaag als er wat zand in de compost zit. Daardoor kan de variatie in koolstofgehalte van compost behoorlijk groot zijn (pers. meded. Chris Blok). Er is gerekend met de aannames 30, 40 en 50% (koolstof in % van drooggewicht). Het zou veel helpen als het koolstofgehalte van compost goed bekend was, in ieder geval bij aanvang, maar liefst op iedere waarnemingsdatum.

Details

Oost per kist of per m²

Voor de koolstofbalans is de hele teeltcel als systeem genomen, en is dus gekeken naar de koolstof afvoer uit de cel. De oogstdata waren gemeten aan individuele kisten. Deze waren 55 x 35 x 37,5 cm groot en hadden een teeltoppervlak van 0.19 m². De oogstdata zoals aangeleverd in een spreadsheet waren uitgedrukt in kg/m². Bij navraag (bij Anton Sonneberg) bleek dat deze cijfers waren bepaald als kg/kist, en vervolgens waren vermenigvuldigd met 5 (omdat er 5 kisten per m² waren). Daarom zijn de oogstdata gedeeld door 5 om terug te rekenen naar kg/kist.

Monsterkisten

De oogstdata gaven de oogst van iedere individuele kist voor vlucht 1 en vlucht 2 apart. Een aantal kisten was tijdens de loop van de proef uit de cel verwijderd voor analyse. Daardoor daalde het aantal kisten in de cel van 78 op 15 juni tot 52 kisten op 16 juli. De totale oogst uit cel 3 bedroeg 394.5 kg. Het merendeel van de kisten heeft tot het einde geproduceerd (vlucht 1 en 2), maar alle monster kisten zijn vroegtijdig uit de cel gehaald. In de spreadsheet KOOLSTOFBALANS is voor iedere dag nauwkeurig rekening gehouden met het exacte aantal kisten dat aanwezig was in de teeltcel.

Voetjes

Bij de oogst van champignons bleven de 'voetjes' achter. Over de hele proefperiode werd 66 kg voetjes geoogst, maar dit omvat een hoeveelheid compost die aan de voetjes kleeft. Er is een monster genomen om de hoeveelheid aanhangende compost te bepalen. Hieruit bleek dat het versgewicht van de schoongemaakte voetjes 31% bedroeg van het versgewicht van de vuile voetjes. Zie data in de spreadsheet KOOLSTOFBALANS/PRODUCTIE.

Gegeven dat er 66 kg vuile voetjes was geoogst, met circa 31% champignonweefsel, betekent dat er 20.5 kg voetjes (zonder aanhangend compost) was geoogst. Dit is circa 5% van de totale oogst. Dit is uiteraard een benadering. De totale oogst aan champignonweefsel was dus $294.5 + 20.5 = 415.3$ kg in cel 3.

Droge stof gehalte van champignons

Droge stof gehalte van champignons is bepaald aan een monster, voor fijne, middel en grove champignons en voor de voetjes. Hieruit is een gemiddelde waarde genomen, namelijk 7.1%

Koolstofgehalte

Het koolstofgehalte van het champignonweefsel is een onbekende factor. In de spreadsheet KOOLSTOFBALANS/PRODUCTIE is hiervoor een variabele ingevoerd die gemakkelijk gewijzigd kan worden. De koolstof balans is berekend voor 3 waarden van het koolstofgehalte van champignons: 30, 40 en 50% (dit is % van de droge stof). Het zou veel helpen als het koolstofgehalte van champignons goed bekend was.

CO₂ concentratie

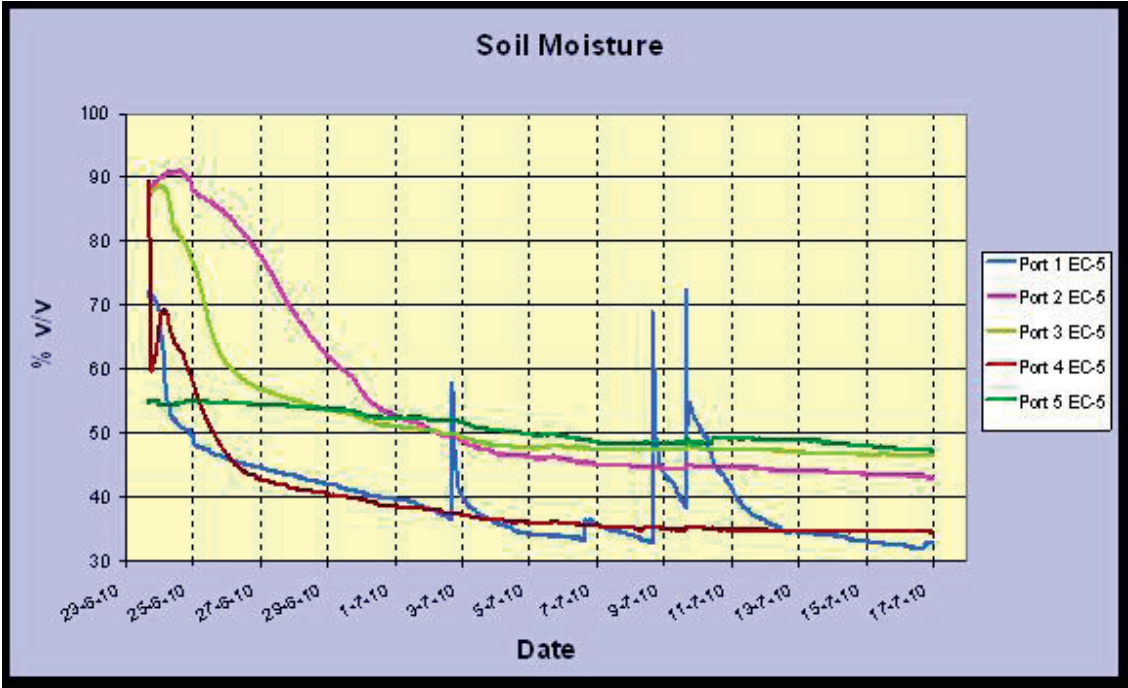
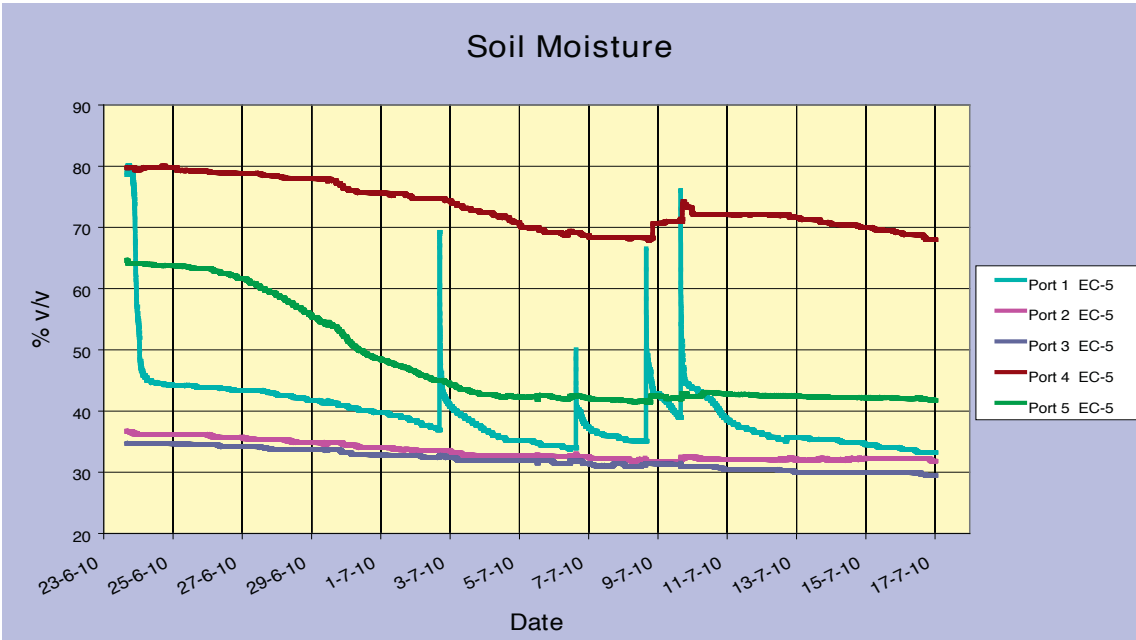
Ook de CO₂ concentratie in de cel was gemeten en geregistreerd door de AEM computer. De oorspronkelijke meetdata waren gedaan met meetfrequentie 2 minuut. Deze data zijn omgerekend naar uurgemiddelden en verder verwerkt, en de resultaten zijn gepresenteerd als daggemiddelden.

Voor de CO₂ concentratie buiten is een vaste waarde van 370 ppm verondersteld. Meting van de CO₂-buitenwaarden zou het resultaat iets nauwkeuriger maken. Maar omdat de ventilatieberekening niet nauwkeurig is (zie hieronder), is de kleine fout in de buiten CO₂ concentratie niet van belang.

De CO₂ concentratie is omgerekend van ppm naar mg/m³ (conversie 1 ppm = 1.83 mg/m³). Dit geldt eigenlijk bij constante druk en temperatuur, maar de fout die hiermee gemaakt wordt is totaal verwaarloosbaar.

Er wordt omgerekend van CO₂ naar koolstof door te vermenigvuldigen met de molaire gewichtsverhouding (12/44).

Bijlage IV Watergehalte metingen



Bijlage V Opname van organische voeding

Tabel 1. Absolute hoeveelheden per vierkante meter bed.

	aanvang	einde	aanvang	einde	verbruik	verbruik
	%	%	kg.m ²	kg.m ²	kg.m ²	%
droge compost			30.9	26.2		15%
as	31	38	9.6	9.9	-0.4	0
NDF	45	30	13.9	7.9	6.1	
ADF	37	30	11.4	7.9	3.6	
hemicellulose			2.5	0.0	2.5	100%
ADL lignine	16	15	4.9	3.9	1.0	21%
NDF-ADL cellulose			6.5	3.9	2.6	40%
oplosbare os	24	32	7.4	8.4	-1.0	0
	100	100				

Tabel 2. Gehalten organische fracties per teeltfase.

Teeltfase	NDF	ADF	lignine	hemicellulose	Cellulose	Organische stof
vullen	163.70	140.00	60.70	23.70	79.30	259.10
Afventileren	159.54	135.00	49.58	24.54	85.43	250.78
Knopvorming	154.15	130.08	51.08	24.07	79.00	245.22
Vlucht 1	131.53	117.81	45.80	13.71	72.02	221.74
Einde vl. 1	128.12	115.91	46.44	12.21	69.47	216.21
Tussen vl.	116.14	106.72	40.50	9.42	66.22	205.67
Vlucht 2	95.18	90.99	42.84	4.19	48.15	194.09
Einde teelt	92.64	88.87	42.23	3.77	46.63	190.82
	% afbraak van fractie					
	43.4%	36.5%	30.4%	84.1%	41.2%	26.4%
kg afname/ton compost	71.06	51.13	18.47	19.93	32.67	68.28

Tabel 3. Afbraak organische stof t.o.v. vorming.

Productie/ton verse compost			
	Vers	Droge Stof	Org. Stof
Compost vullen	1000.00	374.70	259.10
Compost einde teelt	785.45	312.29	190.82
Champignons	371.18	26.35	23.60
Voetjes	21.60	1.53	1.37
Totaal	392.79	27.89	24.97
Mycelium	180.00	12.78	11.44
Totale biomassa	572.79	40.67	36.42

Tabel 4. Efficiency.

Afbraak Org. stof	68.28
Vorming org. stof	36.42
Efficiëntie	53%

Dat ligt dicht in de buurt van wat andere schimmels en gisten doen. Omzet dus wel efficiënt. De hoeveelheid die gebruikt wordt echter niet. Voor de modelvorming en parametrische beschrijving zou je moeten kijken naar wat mensen publiceren over vaste stof fermentatie (SSF).

Bijlage VI Een rekenmodel voor champignons

Inleiding

De gegevens die in het input-output project zijn verzameld zijn gebruikt om een rekenmodel voor de teelt van champignons te maken. Het rekenmodel houdt nauwkeurig bij wat de verschillende bronnen en bestemmingen van C en H₂O zijn, en wat de diverse gewichten zijn.

Een rekenmodel is een nuttig middel om goed in beeld te krijgen wat er zich precies afspeelt tijdens de teelt van champignons. Omdat het model is gebaseerd op de metingen van de input-output proef, komen de onderstaande figuren overeen met wat eerder in dit rapport is gepresenteerd. Het enige verschil is dat de hoeveelheden niet zijn gepresenteerd voor de gehele teeltcel, maar per m² teeltoppervlak (13 m² in de proefcel). Deze standaardisatie is gedaan met het oog op de toekomst; andere cellen hebben andere teeltoppervlakten. De getallen kunnen natuurlijk altijd worden teruggerekend tot de gehele cel.

Een rekenmodel kan vervolgens worden gebruikt om te verkennen wat de gevolgen zijn van een ander vulgewicht, meer ventilatie, etc. We zijn er nog niet in geslaagd om een goede temperatuurberekening bij te voegen (dit vereist vrij complexe energieberekeningen voor zowel compost als lucht), maar ook dat behoort tot de mogelijkheden. En met meer inzicht in de minerale voedingsbehoefte kan ook dat worden toegevoegd, zodat er kan worden gekeken naar een optimale samenstelling van de compost.

We volstaan op dit moment met een relatief eenvoudige presentatie van het rekenmodel, waarbij het voornaamste doel is om de gedachten te ordenen.

De volgende onderdelen kunnen worden onderscheiden:

- Compost + mycelium. In de praktijk wordt met compost de doorgroeide compost bedoeld, dus eigenlijk compost vermengd met het mycelium.
- Compost (zonder het mycelium). Dit onderscheid wordt gemaakt omdat het 'schone' compost en het mycelium verschillende eigenschappen hebben, waar rekening mee gehouden moet worden.
- Mycelium. Er is aangenomen dat de samenstelling van mycelium gelijk is aan die van de bovengrondse champignons.
- Dekaaarde.
- Champignons (zonder voetjes).
- Voetjes.

Compost wordt ingebracht, net als lucht en water. Compost is niet alleen de belangrijkste bron van C, maar bevat ook een aanzienlijke hoeveelheid water, en levert daarnaast water door middel van verbranding. Inkomende lucht bevat water, maar ook CO₂, waar in de input-output balans rekening mee moet worden gehouden (ook al valt de hoeveelheid mee).

Champignons (zonder de voetjes) en de voetjes verlaten de teeltcel, en nemen C en water mee. Verder is de luchtstroming verantwoordelijk voor de afvoer van C en water.

Er is voor de eenvoud aangenomen dat de dekaarde vochtig blijft.

- In de figuren zijn vier fasen weergegeven:
- Een beginfase: de periode in de proef waarin wel is gemeten, maar voor de eerste vlucht.
- Vlucht 1.
- Vlucht 2.
- Vlucht 3. Deze is niet in de proef gerealiseerd, maar is toegevoegd ter illustratie.

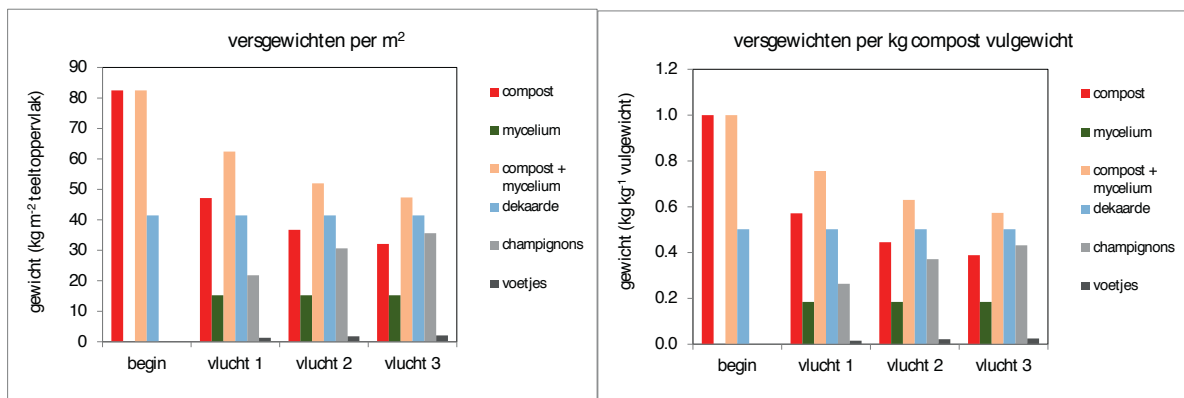
De rekenresultaten in de figuren zijn cumulatief weergegeven, dus gewichten worden in de tijd bij elkaar opgeteld.

Gewichten

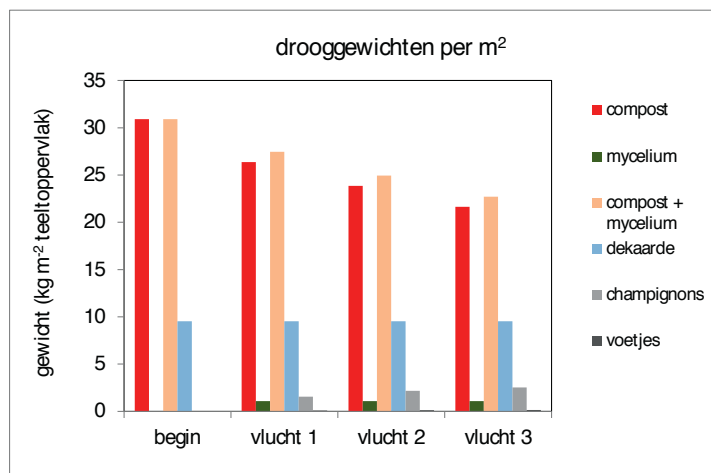
De versgewichten zijn uitgedrukt per m² teeltoppervlak, maar ook per kg vulgewicht van de compost.

Om een eenvoudig voorbeeld te geven: Er werd gevuld met 82.5 verse compost per m². Dit is zichtbaar als rode balk in de linker onderstaande figuur. Aan het einde van de teelt was dit gereduceerd tot zo'n 32 kg m². Vaak worden getallen uitgedrukt per kg vulgewicht. Als dat ook hier wordt gedaan, dan moet er worden gedeeld door 8.25 kg m². De beginwaarde is dus 1 kg kg⁻¹, maar aan het einde was er nog 0.39 kg compost per kg vulgewicht over.

De verhoudingen tussen de getallen blijft hetzelfde, alleen verandert de dimensie. Het belangrijkste dat opvalt is dat het gewicht aan doorgegroeide compost (compost + mycelium) enigszins afneemt, en dat het gewicht van de 'schone' compost zeker niet nul bereikt. Zoals bekend wordt er veel compost voor de eerste vlucht afgebroken.

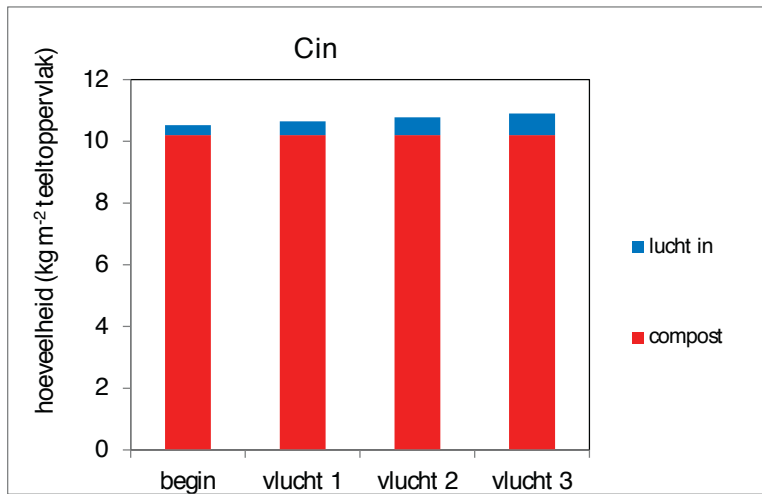


Het is ook interessant om te kijken naar de drooggewichten, omdat de watergehalten van mycelium en 'zuivere compost' nogal uiteen lopen. In termen van drooggewicht is er veel minder mycelium aanwezig dan in termen van versgewicht.

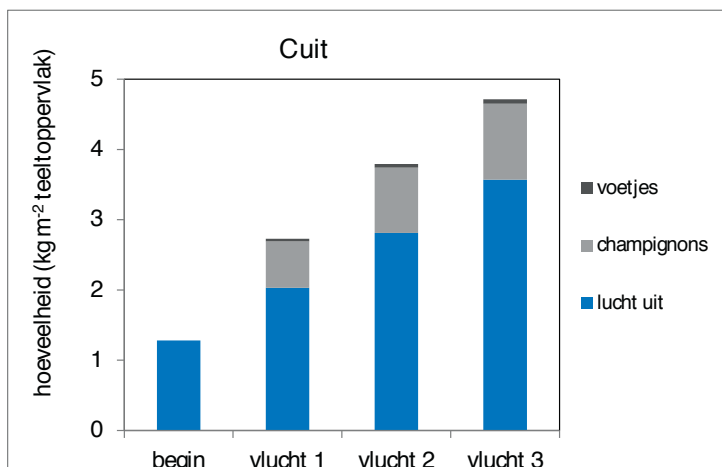


De koolstofbalans

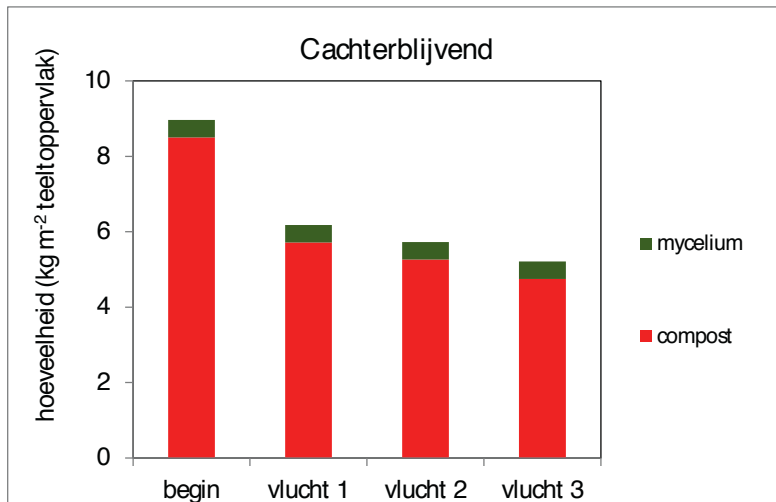
Verreweg de belangrijkste bron voor C is het compost. De luchttoevoer levert een kleine hoeveelheid C, maar dit is eigenlijk niet van belang omdat het meteen weer naar buiten wordt gepompt. Het is in de figuur opgenomen ter volledigheid.



De belangrijkste afvoer van C wordt door de ventilatie van lucht verzorgd. Tijdens de beginperiode was de CO₂ concentratie van de afgevoerde lucht gemiddeld 2025 ppm, en tijdens de vluchten ongeveer 1200 ppm (zie Figuur 5.). De door de lucht afgevoerde C is voornamelijk afkomstig van omgezette compost, en voor een klein deel van de C die via de lucht is aangevoerd. De hoeveelheid C die door de champignons, en zeker door de voetjes wordt afgevoerd, is stukken kleiner.

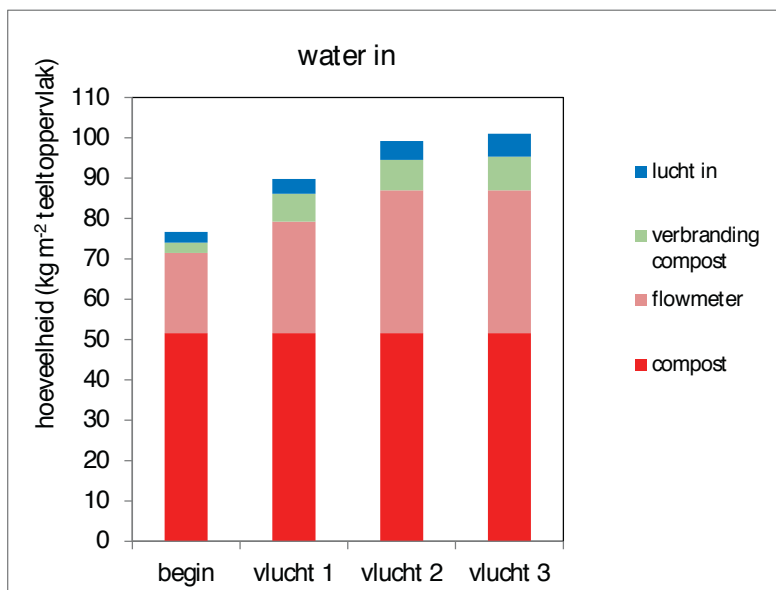


Interessant is de C die achterblijft. Er zit een klein beetje C in het mycelium, dat een hoog watergehalte heeft, maar er is een aanzienlijke hoeveelheid C aanwezig in het compost. Niet al deze C zal opneembaar zijn, maar het lijkt toch aan te geven dat het systeem een grotere potentie heeft.

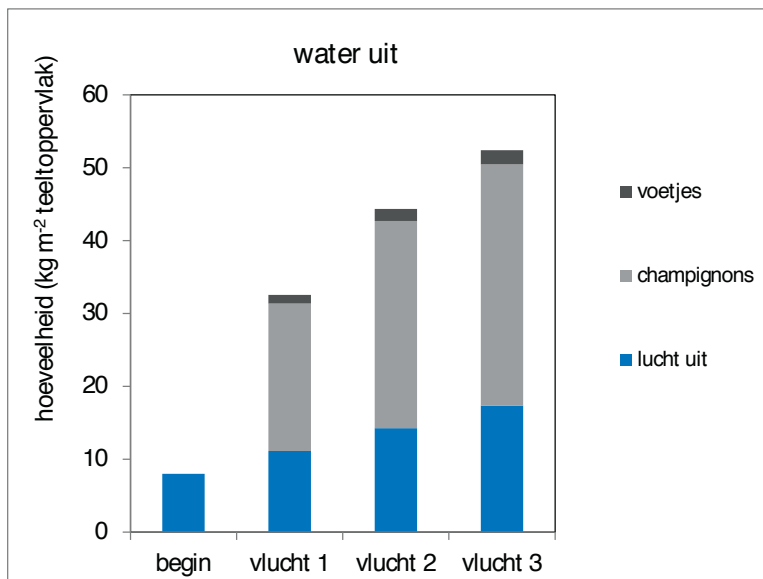


De waterbalans

Het meeste water wordt naar binnen gebracht via de compost. Irrigatie via de dekaarde (in de figuren weergegeven door 'flowmeter') is een goede tweede. De watertoevoer door de verbranding van compost, en via de lucht, zijn kleinere posten.



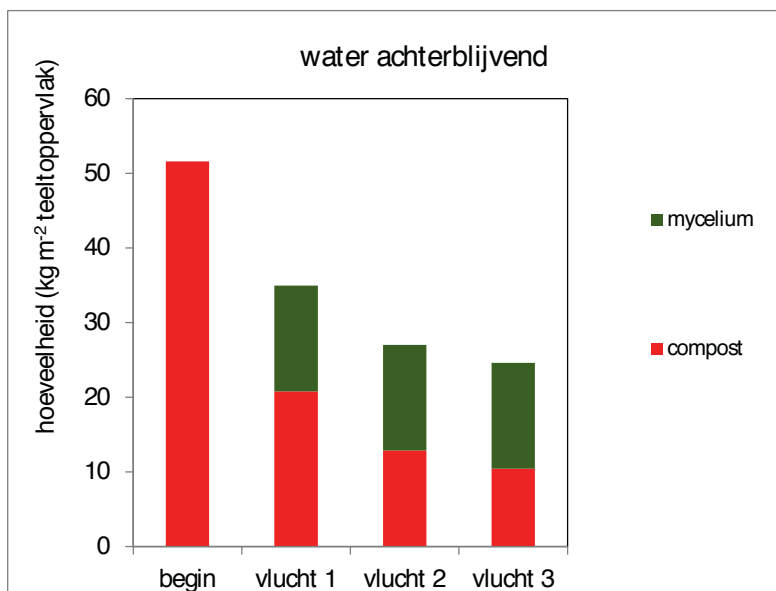
De geogste champignons zijn verantwoordelijk voor de afvoer van het meeste water, gevolgd door de lucht. De voetjes voeren een bescheiden hoeveelheid water af.



Het verschil tussen aan- en afvoer van water is natuurlijk het achterblijvende water. Op basis van de verzamelde getallen blijkt dat het meeste achterblijvende water in het mycelium terecht komt (het aangenomen drogestofgehalte is 7.1%), en dat het 'schone' compost redelijk uitdroogt.

Het resultaat van de berekeningen is dat het watergehalte van het compost + mycelium een beginwaarde van 63% heeft, en afneemt tot 56% aan het einde van de 2^e vlucht. Dit komt goed overeen met de waarnemingen (zie Figuur 14a). Aan het einde van de imaginaire 3^e vlucht zou dit watergehalte verder zijn afgenomen tot 52%.

Dit is slechts een eerste versie van het rekenmodel, en mogelijk zijn er complexe waterstromen aanwezig tussen dekaarde, compost en mycelium. Maar toch is de boodschap dat er op het gebied van watervoorziening aandacht aan het teeltsysteem kan worden gegeven.

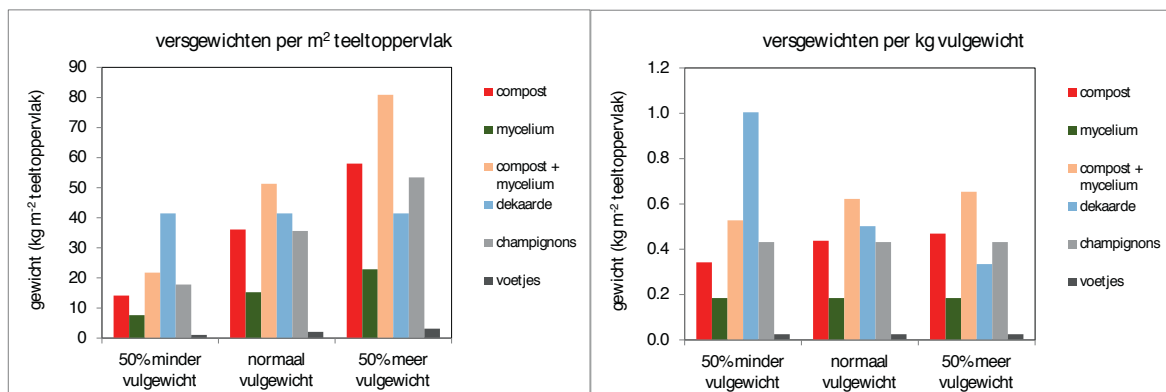


Meer of minder compost?

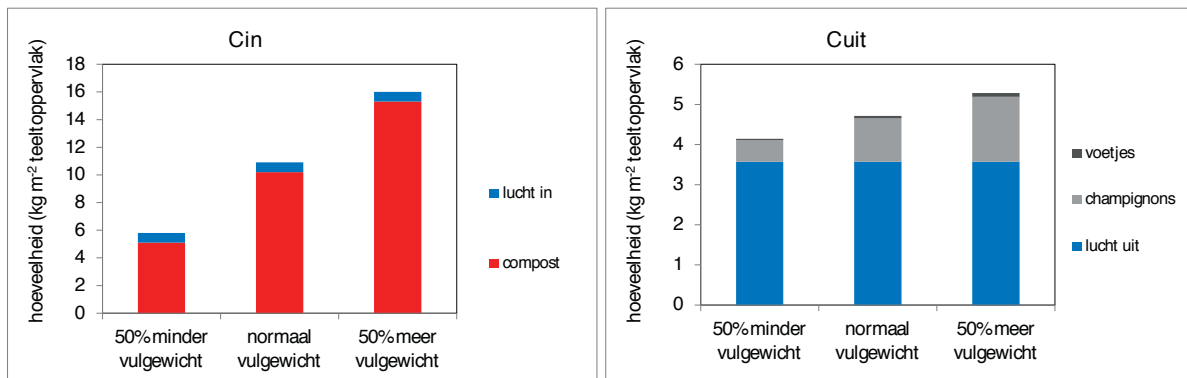
De gevolgen van meer of minder compost kunnen worden berekend. Er is de eenvoudige aanname gedaan dat 50% minder compost ook 50% minder productie inhoudt (Sonneberg et al., 2009). Dit is natuurlijk een aanname, en het is goed mogelijk dat de productie minder daalt dan de vermindering van de compost. De rekenresultaten zijn daarom indicatief, maar geven wel de richtingen en grenzen aan van wat er zal plaatsvinden.

Er zijn twee alternatieven doorgerekend: eentje met 50% minder, en eentje met 50% meer compost. In de onderstaande figuren zijn per onderwerp de drie eindsituaties steeds naast elkaar geplaatst, zodat vergelijken eenvoudig is.

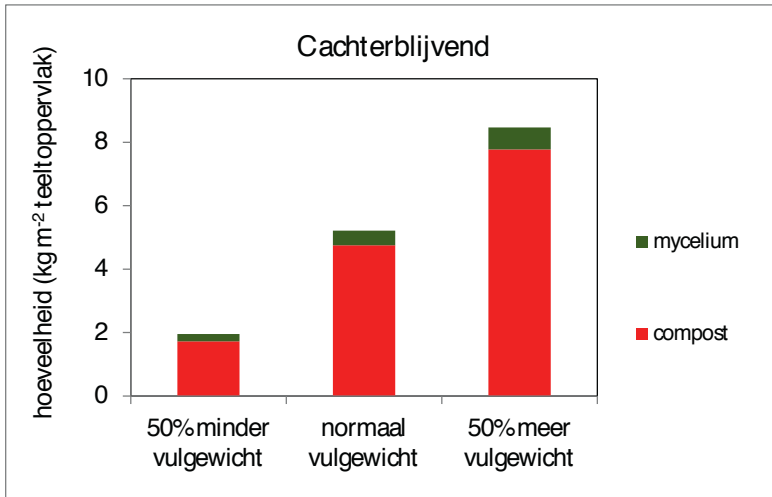
Aan het einde van de teelt is er per m² teeltoppervlak, en per kilo vulgewicht (dus de beginsituatie) meer compost over naarmate het vulgewicht hoger is. Er is minder compost in champignons omgezet. Omdat er een vaste productie aan champignons per kilo compost is aangenomen, verandert dit uiteraard in de grafiek hieronder niet. De deklaag is in alle gevallen even dik, en neemt dus in relatieve zin af als er met meer compost wordt gevuld.



Er wordt per m² teeltoppervlak uiteraard meer C aangevoerd bij grotere vulhoeveelheid compost. Verschillen in uitgaande C worden zichtbaar door de grotere hoeveelheid geogoste champignons (en voetjes). De hogere productie gaat mogelijk gepaard met andere luchtstromen, maar daarmee is op deze plek geen rekening gehouden.



De voornaamste verschillen in C die nog in het teeltsysteem aanwezig zijn aan het einde van de teelt zijn te vinden in de compost. Een 50% afname van de hoeveelheid vulcompost heeft tot gevolg dat er aan het einde van de teelt nog nauwelijks C in de compost aanwezig is. Er is nog een klein beetje extra ruimte, en dan moet ook echt alle compost in alle lagen worden omgezet, wat niet reëel is te verwachten.



De waterbalans is redelijk eenduidig: via extra compost wordt meer water in het teeltsysteem gebracht. Omdat er geen andere watergift is aangenomen, blijft de waterstroom gemeten met de flowmeter hetzelfde. Maar dit kan uiteraard worden aangepast, zodat bij een lager vulgewicht het dreigende watertekort kan worden voorkomen. Het meeste water verlaat het systeem via de geogste champignons.

