



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 17 031

Examensarbete 30 hp
Oktober 2017

Uppskalning av fluglarvskompostering

Luftningsbehov och ventilation

Solveig Johannesdottir

REFERAT

Uppskalning av fluglarvskompostering – *Luftningsbehov och ventilation*

Solveig Johannesdottir

Genom fluglarvskompostering erhålls biomassa från organiskt avfall samt en näringsrik behandlingsrest som kan användas som gödningsmedel eller för biogasutvinning. Larvbiomassan kan användas som djurfoder eller för att tillverka biodiesel. Eskilstuna Strängnäs Energi och Miljö AB planerar bygga en pilotanläggning för fluglarvskompostering med larver av den amerikanska vapenflugan (*Hermetia illucens*). Behandlingen ska ske i lådor staplade på varandra, avskilda med ett mellanrum för att tillåta luftning av materialet. Luftningsbehovet utgörs av larvernas syrebehov samt av att transportera bort fukt och värme från materialet.

Syftet med det här projektet var att utvärdera luftningsbehovet under fluglarvskomposteringsbehandling av matavfall med staplade behandlingslådor. Först designades ett experimentskåp att utföra experimenten i och därefter ett ventilationssystem till skåpet. Två experiment utfördes där tre staplar med nio behandlingslådor vardera utvärderades. I experiment I användes totalt 15 kg matavfall och 15 000 larver per behandlingslåda, i experiment II användes 11 kg matavfall och 10 000 larver per behandlingslåda. Under experimenten togs prover för torrsubstans (TS) och glödförlust (VS), pH samt tillväxt av larverna. Sensorer mätte lufttemperatur, relativ luftfuktighet och materialtemperatur.

I båda experimenten erhöles en behandlingsrest med betydligt lägre TS-halt än önskat, vilket troligtvis berodde på att luftflödet i experimentskåpet var lägre än beräknat. I experiment I evaporerade i genomsnitt 6,2 kg vatten per behandlingslåda och i experiment II 4,8 kg, vilket för båda experimenten motsvarade cirka 50 % av det med matavfallet tillsatta vattnet. Enligt resultaten av experimenten kan torrsubstansen av matavfallet reduceras med runt 60 %. Runt 32 % av torrsubstansen i matavfallet omvandlades till larvbiomassa. Materialtemperaturen var i genomsnitt 27–30 °C under experimenten. Lufttemperaturen i experimentskåpet var 27–28 °C och 31 °C i inluften. Den relativa luftfuktigheten i experimentskåpet var 59–67 % och 36 % i inluften. Baserat på resultaten krävs ett luftflöde på 8,4 m³/h per behandlingslåda för att nå en TS på 50 % i behandlingsresten om matavfallet har en TS-halt på 15 %.

Baserat på resultaten är ett nedåtriktat luftflöde att föredra framför uppåtriktat i de fall ett vertikalt luftflöde används. Skillnader i temperaturer och luftfuktighet indikerade dock att det vertikala, nedåtriktade, luftflödet inte kunde förse alla behandlingslådor i staplarna med samma luftflöde. På grund av detta kan det vara lämpligt att överväga ett horisontellt luftflöde i containern i vilken behandlingen ska ske. Vidare kan det vara fördelaktigt att reglera vattenhalten i matavfallet så att stora variationer i luftningsbehov undviks eller reglera luftflödet efter vattenhalt i ingående matavfall. Inför val av ventilationsdesign rekommenderas fortsatta studier av hur höga luftflöden påverkar behandlingen.

Nyckelord: fluglarvskompostering, luftningsbehov, matavfall, materialreduktion, bioomvandling, *Hermetia illucens*

Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet. Lennart Hjelmns väg 9, SE-75 651 Uppsala

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Scaling-up of fly larvae composting treatment – *Aeration need and ventilation*

Solveig Johannesdottir

Larvae of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) can convert organic waste into biomass. The residue is nutrient-rich and can be used as fertilizer or for biogas production. The aim of this study was to assess the aeration need for designing a ventilation system in a pilot plant for larvae composting in Sweden.

First, a cabinet with required ventilation arrangement for performing the experiments was designed. Two experiments were performed, where three stacks each comprised of nine boxes with spacers were used. In the first experiment, a total of 15 kg of municipal food waste and 15 000 larvae were used per box. In the second experiment, a total of 11 kg food waste and 10 000 larvae were used per box.

In the first experiment 6.2 kg of water evaporated per treatment box and in the second 4.8 kg, both corresponding to about 50 % of the water present in the substrate added. An average temperature of 31 °C in the inlet air resulted in temperatures of 27-30 °C in the material during the treatment. Based on the results, 8.4 m³/h of air is needed per treatment box to reach 50 % dry matter in the residue of food waste containing 15 % dry matter. The results also indicate that to reach the desired water content in the residue, there might be a need to adjust the initial water content in the food waste and use horizontal airflow in the treatment container. Before deciding on a ventilation design, further studies are necessary to assess how high airflows affect the treatment.

Keywords: fly larvae composting, aeration need, food waste, material reduction, bioconversion, Black Soldier Fly

Department of Energy and Technology, Swedish Agricultural University. Lennart Hjelms väg 9, SE-75 651 Uppsala
ISSN 1401–5765

FÖRORD

Detta är ett examensarbete motsvarande 30 hp för civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik på Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet.Handledare har varit Evgheni Ermolaev och Cecilia Lalander, båda vid institutionen för energi och teknik, SLU. Ämnesgranskare var Björn Vinnerås vid institutionen för energi och teknik, SLU.

Examensarbetet genomfördes inom projektet ”Storskalig produktion av foderprotein från hushållsavfall” (diarienummer 202100-2817) som finansieras av Naturvårdsverket och har beviljats enligt förordningen om stöd för strategisk användning av spetsteknik för hållbar stadsutveckling.

Det är ett flertal personer som varit till stor hjälp och stöd under arbetets gång. Jag vill rikta ett stort tack till Eskilstuna Strängnäs Energi och Miljö AB som försåg mig med matavfall till experimenten, särskilt tack till Benny Björk som levererade det till SLU. Jag vill tacka Sam och Viktoria som var till stor hjälp under experimenten, och för de roliga stunderna i växthuset. Mina handledare Evgheni och Cecilia har varit ett stort stöd genom hela arbetet, både i diskussioner, feedback på rapporten och genom att hoppa in och hjälpa till med experimenten när det varit mycket att göra. Ett särskilt tack vill jag rikta till Evgheni för all hjälp med inköp av utrustning och installation av sensorer. Jag är tacksam för hjälp från Björn Vinnerås i design av experimentuppställning. Till hela kretsloppsteknikgruppen på institutionen för energi och teknik på SLU vill jag rikta ett stort tack för att de har fått mig att trivas så bra. Jag vill tacka Oskar för ovärderligt stöd under hela arbetet, och min familj som inspirerat mig till att gå en akademisk utbildning överhuvudtaget.

Solveig Johannesdottir
Oktober 2017

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Uppskalning av fluglarvskompostering – *Luftningsbehov och ventilation*

Solveig Johannesdottir

I Sverige är rötning den vanligaste biologiska behandlingen av organiskt avfall. Genom att röta organiskt avfall utvinns biogas och rötresten kan användas som gödningsmedel. I organiskt avfall finns ytterligare produkter att utvinna, till exempel biomassa. Att utvinna så många produkter som möjligt ur avfall följer EU:s plan för en cirkulär ekonomi. I den cirkulära ekonomin har material en så lång livslängd som möjligt. Fluglarvskompostering är en i Sverige relativt ny biologisk behandling av organiskt avfall. I fluglarvskompostering tillsätts fluglarver i organiskt avfall som de sedan lever i och konsumerar. En vanlig typ av fluga till detta är den amerikanska vapenflugan som lever i varma klimat och inte finns naturligt i Sverige. Fluglarvskompostering med den amerikanska vapenflugan ger larvbiomassa som kan användas som djurfoder. Proteininnehållet på torrviktsbasis i larverna är jämförbart med sojaprotein. Det går även att extrahera fett ur larverna och använda det som råvara till biodiesel. Efter fettextraktion går det fortfarande att använda resterande larvbiomassa till djurfoder. Den del av avfallet som larverna inte omvandlar till biomassa, behandlingsresten, är rik på näring och organiskt material och kan användas som gödselmedel. Det går även att utvinna en del biogas ur behandlingsresten, och därefter använda som gödselmedel.

Eskilstuna Strängnäs Energi och Miljö AB planerar att bygga en pilotanläggning för fluglarvskompostering. Behandlingen ska ske i en fraktcontainer med en kapacitet att ta emot ett ton matavfall per dag. I det planerade systemet ska matavfall behandlas i plastbackar, som kallas behandlingslådor, till vilka larver tillsätts den första dagen av behandlingen. Sedan tillsätts ytterligare matavfall vid två tillfällen under de två veckor som behandlingen pågår. För att göra detta yteffektivt i anläggningen ska behandlingslådorna staplas på varandra. Det behöver dock vara ett mellanrum mellan behandlingslådorna för att luft ska kunna flöda emellan dem. Luftningsbehovet i fluglarvskomposteringen består av larvernas och de mikroorganismerna som finns i matavfallets behov av syre samt behovet av att transportera bort värme och fukt från materialet. Larverna och mikroorganismerna behöver syre till sin respiration och producerar själva värme samtidigt som en del av det vattnet som finns i matavfallet evaporerar under behandlingen

Syftet med det här projektet var att utvärdera hur stort luftflöde som krävs i fluglarvskomposteringen. Experiment utfördes på behandlingslådor som staplats på varandra, med ett mellanrum av 6,5 cm. För att efterlikna miljön som ska råda i containern designades först ett luftisolerat experimentskåp. Till experimentskåpet designades och installerades sedan ett ventilationssystem. Därefter utfördes två experiment där tre staplar med nio behandlingslådor vardera ställdes in i skåpet. I samtliga behandlingslådor tillsattes matavfall tre gånger under behandlingstiden. I experiment I tillsattes 15 000 små larver i varje behandlingslåda första dagen och i experiment II 10 000 larver. I experiment I tillsattes totalt 15 kg matavfall och i experiment II totalt 11 kg. Under experimenten togs prover ur materialet i utvalda behandlingslådor för att följa hur larverna tillväxte samt hur vattenhalten, den organiska andelen och pH-värdet i materialet förändrades. Samtidigt mätte sensorer temperaturen i luften och materialet i behandlingslådorna samt den relativa luftfuktigheten.

Målet för experimenten var att erhålla en behandlingsrest som bestod till 50 % av torrsubstans och 50 % av vatten. Inget av experimenten uppnådde det målet, vilket troligen berodde på att ventilationen i experimentetskåpet hade ett lägre luftflöde än beräknat. Under experimenten evaporerade hälften av vattnet som fanns i matavfallet, vilket för experiment I var 6,2 kg och experiment II var 4,8 kg. I matavfallet reducerades runt 60 % av torrsubstansen av vilka 32 % omvandlades till larvbiomassa under båda experimenten. Materialtemperaturen var i genomsnitt 27–30 °C, lufttemperaturen 27–28 °C i experimentetskåpet och 31 °C i den ingående luften. Den relativa luftfuktigheten var 59–67 % i experimentetskåpet och 36 % i inluften under experimenten. Baserat på resultaten krävs ett luftflöde på 8,4 m³/h per behandlingslåda för att nå en torrsubstans på 50 % i behandlingsresten om matavfallet har en torrsubstans-halt på 15 %. Dessutom indikerade resultaten att det kan vara fördelaktigt att minska vattenmängden i matavfallet innan den används i fluglarvskomposteringen. Mindre andel vatten i matavfallet, eller mindre mängd matavfall, leder till att ett mindre luftflöde krävs.

I experimenten användes ett vertikalt luftflöde. Experimenten visade att om luftflödet ska vara vertikalt bör det vara riktat nedåt, hellre än uppåt. Men resultaten indikerade även att ett horisontellt luftflöde kan vara att föredra. Ett horisontellt luftflöde som är riktat längs med staplarna kan designas relativt enkelt i containern, dock innebär det att vissa behandlingsstaplar får ett betydligt högre luftflöde än de behöver. Alternativt kan ventilationen designas med horisontellt luftflöde tvärs över staplarna. Det skulle ge en jämnare luftflödesfördelning och även ett ventilationssystem som är lättare att reglera. Dock krävs en precis placering av staplarna i containern. Inför valet av ventilationssystem bör det studeras hur behandlingen fungerar med horisontellt luftflöde, och särskilt hur det fungerar med högre luftflöden.

ORDLISTA

Fluglarvskompostering	Biologisk behandling där fluglarver omvandlar organiskt avfall till biomassa
Substrat	Det organiska material som används i komposteringen. I det här projektet har kommunalt organiskt hushållsavfall använts
Behandlingsrest	Det material som är kvar efter att larverna omvandlat en del av substratet till biomassa. Består av det larverna inte kunnat bryta ned samt det som gått igenom larverna
Prepuppa	Det sista larvstadiet innan larver blir puppor för att därefter omvandlas tillflugor
Satsprocess	Behandlingsdesign där en viss mängd substrat ges till ett visst antal larver, vartefter fler larver inte tillsätts men mer substrat kan tillsättas. När larverna omvandlat en tillfredsställande mängd substrat separeras de från behandlingsresten
Behandlingslåda	En plastback i vilken matavfall och larver tillsätts. Här används flera behandlingslådor som staplas på varandra till en behandlingsstapel
TS	Torrsubstans. Anges som en andel av våtvikten, där fraktionen TS + fraktionen vatten blir 1
VS	Glödförlust, organisk fraktion (eng. volatile solids). Anges som en fraktion av TS, vilken består av VS och oorganiskt material (aska)
Red_{TS}	Materialreduktion på torrviktsbasis, här massan av TS som reducerats i behandlingsresten delat på massan av TS i matavfallet
BOF	Bioomvandlingsfaktor från avfall till larvbiomassa, kan beräknas på TS eller VS-basis. Här beräknat som mängden TS i larver delat på mängden TS i matavfallet
$n_{lv,in}$	Antalet larver som tillsätts vid behandlingsstart
t_d	Antalet behandlingsdagar
m_{mf}	Våtvikten av matavfallet som tillsätts, summan av $m_{H_2O,mf}$ och $m_{TS,mf}$ (massan av vatten respektive TS i matavfallet)
$m_{lv,tot}$	Våtvikten av larver vid behandlingens slut, summan av $m_{H_2O,lv}$ och $m_{TS,lv}$ (massan av vatten respektive TS i larverna)

$m_{br,tot}$	Våtvikten av behandlingsresten vid behandlingens slut, summan av $m_{H_2O,br}$ och $m_{TS,br}$ (massan av vatten respektive TS i behandlingsresten)
$m_{VS,resp}$	Massan VS som respirerats, den tillsatta mängd VS som inte återfinns i larver eller behandlingsrest
$m_{H_2O,evap}$	Massan vatten som evaporerat, den tillsatta mängd vatten som inte återfinns i larver eller behandlingsrest
X_{pot}	Den mängd vatten som ett kg luft kan transportera vid given gradient i lufttemperatur och relativ luftfuktighet. Anges i g vatten/kg luft
R	Luftflöde, anges i m^3/h .
$m_{O_2,st}$	Stökiometriskt syrebehov, den mängden syre som krävs för nedbrytningen av en viss mängd VS

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	1
1.1 FLUGLARVSKOMPOSTERING.....	1
1.2 DEN AMERIKANSKA VAPENFLUGAN	2
1.3 FLUGLARVSKOMPOSTERING MED DEN AMERIKANSKA VAPENFLUGANS LARVER.....	3
1.3.1 Processparametrar	4
1.3.2 Produkter	5
1.3.3 Utmaningar.....	6
1.4 PROBLEMBESKRIVNING	6
1.4.1 Frågeställningar.....	8
2. MATERIAL OCH METOD	9
2.1 MATERIAL.....	9
2.1.1 Ventilationssystemet	9
2.1.2 Sensorer.....	10
2.2 EXPERIMENTUPPSTÄLLNING	12
2.2.1 Förförsök	12
2.2.2 Experiment 0	13
2.2.3 Experiment I och II	13
2.3 PROVTAGNING.....	14
2.3.1 Vägning av larver under och efter behandlingen samt överlevnadsgrad	14
2.3.2 Mätning av pH.....	16
2.3.3 Bestämning av TS och VS	16
2.4 BERÄKNINGAR OCH ANTAGANDEN	17
2.4.1 Massbalans	17
2.4.2 Stökiometriskt syrebehov	18
2.4.3 Teoretisk behandlingkapacitet och luftningsbehov	19
2.4.4 Materialreduktion och BOF	20
2.4.5 Initiala antaganden för parametrar	20
2.4.5 Statistisk analys	21
2.5 AVGRÄNSNINGAR.....	21
3. RESULTAT	22
3.1 BEHANDLINGSRESULTAT OCH MASSBALANS	22
3.1.1 Behandlingsresultat	22
3.1.2 Massbalans	23
3.2 TEMPERATURER OCH LUFTFUKTIGHET	25
3.2.1 Lufttemperatur.....	25
3.2.2 Relativ luftfuktighet	28
3.2.3 Temperatur i materialet	30
3.2.4 Jämförelse experiment I och II.....	31
3.3 BEHANDLINGSKAPACITET OCH LUFTNINGSBEHOV	32
4. DISKUSSION	34
4.1 BEHANDLINGSRESULTAT OCH MASSBALANS	34

4.2 TEMPERATURER.....	35
4.3 BEHANDLINGSKAPACITET OCH PROCESSPARAMETRAR.....	36
4.4 VENTILATION – DESIGN OCH STYRKA	38
5. SLUTSATS	41
6. REFERENSER	42
6.1 PUBLICERADE REFERENSER.....	42
6.2 INTERNETREFERENSER OCH MUNTliga REFERENSER.....	44
BILAGOR	45
A - LUFTTEMPERATUR.....	45
B – RELATIV LUFTFUktIGHET	47
C – MATERIALTEMPERATUR	49
D – DATA FRÅN PROVTAGNING	50

1. INLEDNING

Den i Sverige vanligaste biologiska behandlingen av organiskt avfall är rötning. Den största nyttan av biologisk behandling, jämfört med exempelvis förbränning, av organiskt avfall är att näringsämnen kan återföras till jordbruksmark (*Biologisk återvinning*, 2017). År 2013 uppskattades den totala mängden matavfall i Sverige till 1 072 000 ton, varav från hushåll var 793 000 ton (Jensen & Johansson, 2014). Av detta matavfall återfördes näringsämnen från 21 % genom rötning och 10 % genom kompostering. Av den totala mängden matavfall som genererades gick endast 39 % till biologisk behandling, resten behandlades på annat sätt (Jensen & Johansson, 2014). Den svenska regeringen har satt som mål att senast år 2018 ska minst 50 % av det genererade matavfallet sorteras. Från det ska växtnäring utvinns genom biologisk behandling och ur minst 40 % ska energin tas till vara (*Ökad återvinning av matavfall*, 2016).

Inom EU pågår arbete mot en cirkulär ekonomi där kretsloppet står i centrum och avfallshantering spelar en viktig roll (*Att sluta kretsloppet – en EU-handlingsplan för den cirkulära ekonomin*, 2015). I en cirkulär ekonomi upprätthålls värdet av produkter i största möjliga mån, vilket ger dem en längre livslängd. Detta ska öka återanvändning och återvinning, vilket minskar avfallsmängderna samt är mer resurseffektivt och hållbart. Genom att se avfall som en resurs tilldelas det ett värde och omvärderas från avfall till ny produkt. Det fortsätter på så vis runt i ett kretslopp. Återvunna material kallas sekundära råmaterial och utgör idag en liten del av materialen på marknaden. I arbetsdokumentet från EU pekas återvunna näringsämnen ut som en särskilt viktig kategori av sekundära råmaterial (*Att sluta kretsloppet – en EU-handlingsplan för den cirkulära ekonomin*, 2015).

Genom att behandla organiskt avfall, såsom matavfall, med t.ex. rötning utvinns biogas och rötresten kan användas som gödsel. På så vis erhålls två nya produkter från matavfallet. Det finns dock fler produkter att hämta från matavfallet som kan utgöra sekundära råmaterial och konkurrera med primära råmaterial på marknaden. Genom att odla biomassa på organiskt avfall erhålls ytterligare en produkt: djurprotein. Många typer av insekter lever på organiskt material, där de inkorporerar energi och näringsämnen i sin biomassa (Newton *et al.*, 2005). Detta kan utnyttjas för avfallshantering. Genom att utvinna flera, kommersiellt gångbara, produkter ur avfall övergår det till att vara en resurs.

1.1 FLUGLARVSKOMPOSTERING

I fluglarvskompostering utförs nedbrytningen av det organiska materialet av mikroorganismer tillsammans med larver (Diener *et al.*, 2009). Grundidén är att larver lever i och konsumerar organiskt material. Under tiden reduceras mängden material och mängden biomassa ökar. Detta genererar två produkter: biomassa och behandlingsrest. Beroende på vilken typ av larv som används, typ av material samt processparametrar såsom temperatur och behandlingstid erhålls olika mängd och sammansättning av produkterna (Čičková *et al.*, 2015).

Vanliga typer av fluglarver för kompostering med matavfall som substrat är husfluga (*Musca Domestica*) och amerikansk vapenfluga (*Hermetia illucens*, eng. Black Soldier Fly) (Čičková *et al.*, 2015). Den amerikanska vapenflugan, även kallad svart soldatfluga eller svart vapenfluga, har flera fördelar jämfört med husflugan vid fluglarvskompostering. Till skillnad mot husflugor så äter inte amerikanska vapenflugor

som vuxna och flyger inte mellan förorenade substrat och exempelvis människor. De är således inte vektorer för sjukdomsspridning. Dessutom är den amerikanska vapenflugans larver större och består av en högre andel fett. Detta eftersom de som vuxnaflugor ska klara sig enbart på sina energireserver (Čičková *et al.*, 2015; Newton *et al.*, 2005; Sheppard *et al.*, 2002; Tomberlin *et al.*, 2002). Dessa egenskaper är särskilt goda för avfallshantering. Förutom dessa egenskaper så lämnar larver i sista larvstadiet (prepuppor) självmant substratet innan de ska bli puppor, vartefter de blirflugor. Detta beteende möjliggör ett självskördande system för fluglarvskompostering (Sheppard & Newton, 1994).

1.2 DEN AMERIKANSKA VAPENFLUGAN

Den amerikanska vapenflugan kommer ursprungligen från tropiska till varm-tempererade områden i Amerika. Idag återfinns den på fler kontinenter i tropiska och varm-tempererade områden mellan 45° N and 40° S världen över (Diener *et al.*, 2011b). Det krävs en temperatur på minst 26 °C för att honorna ska lägga ägg (Tomberlin *et al.*, 2002). Den ideala temperaturen är 28-30 °C med en relativ luftfuktighet av runt 70 % (Oliveira *et al.*, 2015). Flugorna är svarta i färgen (figur 1, vänster), 15-20 mm långa och lever i en till två veckor (Sheppard *et al.*, 1994; Oliveira *et al.*, 2015). Honorna lägger ägg i torra sprickor eller kanter och äggen kläcks efter några dagar. Äggen läggs i närheten av ett substrat där de nykläckta larverna kan tillväxa. Larverna går igenom sex larvstadier av varierande tidslängd. Under goda förhållanden kan längden av hela larvstadiet vara cirka två veckor men den kan också vara flera månader vid ogynnsamma förhållanden (Sheppard *et al.*, 1994; Tomberlin *et al.*, 2002). Det sista steget i larvstadiet kallas prepuppa, larverna är då runt 20 mm långa och mörknar i färgen (figur 2) (Oliveira *et al.*, 2015). När larverna blir prepuppor slutar de att äta och munnen omvandlas till en krok som de använder för att röra sig mot ett jordliknande medium där de blir puppor (Sheppard *et al.*, 1994). Efter två veckor, i god miljö, i puppan framträder flugan och livscykeln är därmed komplett (Oliveira *et al.*, 2015; Sheppard *et al.*, 1994).



Figur 1. Till vänster en vuxen amerikansk vapenfluga. Till höger en handfull små larver, runt 10 dagar efter kläckning.

1.3 FLUGLARVSKOMPOSTERING MED DEN AMERIKANSKA VAPENFLUGANS LARVER

Den amerikanska vapenfluglarven kan omvandla en stor variation av substrat till biomassa, från uteslutande animaliskt till uteslutande vegetabiliskt och de tillväxer bra på blandat matavfall (Diener *et al.*, 2011a; Li *et al.*, 2011b; Lalander *et al.*, 2013; Nguyen *et al.*, 2015). Fluglarvskompostering med vapenfluglarver har utvärderats för både kontinuerliga och satsvisa system. Några olika varianter på kontinuerliga system för behandling av gris- och höns gödsel beskrivs av Newton *et al.* (2005). I de kontinuerliga systemen tillsätts substrat och larver kontinuerligt, prepuppor tillåts migrera ur substratet och samlas upp. I satsprocesser startas behandlingen med en förbestämmd matningsfrekvens (mg per larv och dag) mot antal larver och behandlingstid. Matning kan ske genom en satsmatning, då allt substrat tillsätts på en gång, eller med kontinuerlig matning under behandlingen. När önskat behandlingsresultat uppnåtts, exempelvis att larver nått femte larvstadiet eller en viss materialreduktion uppnåtts, separeras larverna från behandlingsresten. Denna typ av process tillämpas bland annat av Dortmans *et al.* (2017). En fördel med den kontinuerliga processen är att den kan vara mindre arbetskrävande eftersom ingen aktiv separering görs. Men det finns också större risker relaterade till en systemkollaps. Om larverna i ett kontinuerligt system får en sjukdom, eller om substratet förgiftas, havererar hela systemet och måste startas om på nytt. Om något går fel i en satsprocess däremot kan de påverkade behandlingsenheterna kastas och startas om på nytt, med betydligt mindre del av det hela systemet som påverkas. I mindre skala, i rätt miljö, kan en naturlig flugkoloni utnyttjas vilket Sheppard *et al.* (1994) visade. I ett storskaligt system är en naturlig koloni dock inte tillräckligt pålitlig. Istället används en kontrollerad flugkoloni, vilket bland andra beskrivs av Dortmans *et al.*, (2017).

Under behandlingen kan mängden material reduceras avsevärt. Materialreduktioner på torrviktsbasis från 33 % till 75 % har rapporterats. Den lägsta reduktionen var med gödsel och den högsta med fekalier som substrat (Sheppard *et al.*, 1994; Myers *et al.*, 2008; Diener *et al.*, 2009, 2011a, Lalander *et al.*, 2013, 2015; Nguyen *et al.*, 2015; Paz *et al.*, 2015; Lalander *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2017). Mängden torrs substans i substratet som omvandlas till biomassa var i studien av Lalander *et al.* (2015) 11,8 % i en blandning av gris gödsel, hundmat och fekalier. Sheppard *et al.* (1994) erhöll 8 % i höns gödsel. I studien av Diener *et al.* (2009) resulterade behandlingen i att 6–16,1 % av torrs substansen av materialet, som var kycklingfoder, omvandlades till biomassa. Av resterande torrs substans blev 55,9–76,9 % kvar i behandlingsresten och 17,1–32,6 % metaboliserades.



Figur 2. Prepuppor (mörka) och larver (ljusa) i en torr behandlingsrest.

1.3.1 Processparametrar

Behandlingen fungerar med matning några gånger under behandlingstiden enligt Dortmans *et al.* (2017), som tillsätter substrat tre gånger under 12 dagar. Den sista matningen bör dock inte ske för sent. Tillsats av substrat efter att 40 % av larverna omvandlats till prepuppor kan leda till förhöjd mortalitet (Tomberlin *et al.*, 2009). Dessutom kan mortaliteten öka om för höga matningsdoser ges (Myers *et al.*, 2008).

Larvernans tillväxt samt behandlingstiden beror på ett flertal parametrar: temperatur, larvdensitet, typ av och mängd substrat. Två viktiga processparametrar är materialets torrsubstans (TS) och glödförlusten (VS), vilken även kallas organiska fraktionen och ges som en fraktion av TS. Myers *et al.* (2008) undersökte processen med olika matningsdoser mellan 90 och 233 mg kogödsel/larv/dag (30 % TS). Resultaten visade att om målet med behandlingen är att producera maximal larvbiomassa ska hög matningsdos ges. Om målet är materialreduktion ska lägre matningsdos ges. Resultaten visade även att mortaliteten var något högre för den högsta matningsdosen och att larverna blev prepuppor tidigare vid högre givor än vid lägre (Myers *et al.*, 2008). Även Diener *et al.* (2009) studerade olika matningsdoser. De använde mellan 12,5 och 200 mg/larv/dag (40 % TS), och larvdensitet på 4 larver/cm². Resultaten visade att givor över 100 mg/larv/dag inte gav kortare behandlingstid och att vid substratbrist blev larverna prepuppor medan de fortfarande hade tillväxtpotential. Vidare upptäcktes att larverna klarade oregelbunden matningsfrekvens, då matningsuppehåll på några dagar inte påverkade behandlingen. Författarna påpekade även att fler studier behöver utföras, inklusive sådana som rör processparametrar såsom temperatur, hantering samt förorenat material. Senare studerade Paz *et al.* (2015) effekten av larvdensitet och matningsdos med vegetabiliskt avfall som substrat. Resultaten visade att den största materialreduktionen erhöles med

matningsfrekvensen 60 mg TS/larv/dag, både för 2 och 6 larver/cm². Ju högre matningsfrekvens och larvdensitet, desto lägre pH hade behandlingsresten. Den kortaste behandlingstiden erhöles för hög larvdensitet och låg matningsfrekvens samt låg larvdensitet och hög matningsfrekvens. En larvdensitet på 1,2 till 5 larver/cm² och en matningsfrekvens på 95 till 163 mg TS/larv/dag rekommenderades i studien. Vidare avråddes att ha en larvdensitet över 5 larver/cm² och samtidigt en matningsfrekvens på över 95 mg TS/larv/dag (Paz *et al.*, 2015).

Ett problem vid tillämpning av resultaten från många studier är att substratgivorna är uttryckta i våtvikt eller i torrsubstans. Matningsdosen i form av mg VS per larv och dag verkar påverka larvernas tillväxt (Lalander *et al.*, 2017a). Eftersom olika substrat har olika organisk halt är det svårt att jämföra matningsdoser i olika studier när den organiska halten inte är given.

Temperaturberoendet för hela livscykel studerades av Tomberlin *et al.* (2009) vid temperaturerna 27, 30 och 36 °C. Tiden från kläckning av larver till prepuppor var längre vid 27 °C än vid 30 °C, men prepupporerna var större vid 27 °C. Vid 36 °C var mortaliteten hög vilket ledde till slutsatsen att en övre temperaturgräns för flugans livscykel fanns och att den var mellan 30 och 36 °C (Tomberlin *et al.*, 2009). Dessa resultat skiljer sig från vad Newby (1997) kom fram till, vilket var att den optimala temperaturen för tillväxt vapenfluglarver var 35 °C. I studierna av Salomone *et al.* (2017) och Cheng *et al.* (2017) var temperaturen i materialet under fluglarvkomposteringen 35 °C. Paz *et al.* (2015) visade att temperaturen i materialet under behandlingen påverkades av larvdensiteten och mängden substrat. Störst påverkan på temperaturen hade larvdensiteten, då högre larvdensitet ledde till en högre temperatur. Eftersom larverna frigör värme när de konsumerar materialet (Lardé, 1989) är det rimligt att en högre larvdensitet leder till ökad värmeproduktion. Samtidigt bör inte larvdensiteten vara för hög, då kan konkurrens uppstå mellan larverna vilket kan leda till ökad mortalitet (Paz *et al.*, 2015). Cheng *et al.* (2017) visade att även vattenhalten i substratet påverkade temperaturen i materialet under behandlingen, då en TS på 20 % ledde till en lägre materialtemperatur än TS på 25–30 % gjorde. Detta förklarade författarna med att en högre vattenhalt leder till högre värmekapacitet, och mer värme krävs således för att höja temperaturen i materialet (Cheng *et al.*, 2017).

För att förenkla separationen kom Cheng *et al.* (2017) fram till att en slutlig vattenhalt på 50 % i behandlingsresten är lämpligt för att kunna utföra separeringen genom siktning. Resultaten visade att ingående substrat med en lägre TS-halt (20 %) gav en behandlingsrest som inte kunde siktas på grund av bildning av aggregat och klumpar av materialet. Larverna som gavs material med högre vattenhalt hade en högre tillväxthastighet. Men temperaturen i materialet var inte tillräckligt hög för att effektivt reducera vattenhalten under behandlingen. Slutsatsen var att en TS-halt på 25–30 % ledde till en siktbar behandlingsrest på bekostnad av en högre tillväxthastighet hos larverna (Cheng *et al.*, 2017).

1.3.2 Produkter

Proteininnehållet på torrviktsbasis i prepuppor är jämförbart med sojaprotein; prepupporerna innehåller mellan 33 och 44 % TS (Čičková *et al.*, 2015). Fett från

amerikanska vapenfluglarver kan extraheras och potentiellt användas som råvara till högkvalitativt biodiesel (Li *et al.*, 2011b; Surendra *et al.*, 2016). Biodiesel tillverkad av extraherat fett från vapenfluglarver är jämförbart med biodiesel av rapsolja (Li *et al.*, 2011a). Efter fettextraktion kan den resterande larvbiomassan fortfarande användas som djurfoder (Diener *et al.*, 2011b; Li *et al.*, 2011a; Surendra *et al.*, 2016).

Behandlingsresten består av icke nedbrutet material och av larverna bearbetat material (Salomone *et al.*, 2017). Behandlingsresten innehåller fortfarande näringsämnen och organiskt material vilket innebär att den kan användas som gödningsmedel (Lalander *et al.*, 2015). Nedbrytningen av tre olika läkemedelssubstanser och två fungicider i fluglarvskompostering med amerikanska vapenflugan studerades av (Lalander *et al.*, 2016). Studien visade en förkortad halveringstid för substanserna i fluglarvskomposteringen och att ingen bioackumulering i larverna kunde påvisas. Behandlingsresten kan behöva ytterligare behandling för stabilisering och hygienisering innan den sprids på åkermark (Lalander *et al.*, 2017b). Tack vare det höga näringsvärdet i behandlingsresten, som är högre än vanlig i kompost, finns potential att utvinna biogas (Lalander *et al.*, 2017b). Behandlingsresten kan även behandlas med konventionell kompostering, eller maskkompostering för att få ytterligare biomassa (Dortmans *et al.*, 2017).

1.3.3 Utmaningar

Processen med amerikansk vapenfluga är en utmaning i säsongsbetonade, kallare klimat såsom i Nordeuropa eftersom flugan kräver ett varmt klimat (Newton *et al.*, 2005). Samtidigt så frigörs värme då larverna konsumerar materialet, vilket innebär att det konstant avgår värme under behandlingen (Lardé, 1989). Vid temperaturreglering behöver detta tas med i beräkningen, så att temperaturen inte blir för hög under varmare månader. Men under kallare månader kan energikostnad sparas om en hög larvdensitet hålls, då högre larvdensiteten ökar temperaturen enligt Paz *et al.* (2015).

Om larverna får substratbrist kan de sluta äta helt under en tid. Om miljön är direkt ogynnsam eller skadlig för dem, såsom för hög temperatur eller förgiftning, försöker de lämna materialet (Diener *et al.*, 2011a). Kunskap om vad som orsakar dessa beteenden är viktigt för att kunna justera processparametrar och därmed undvika att de flyr eller behandlingen inte går som förväntat.

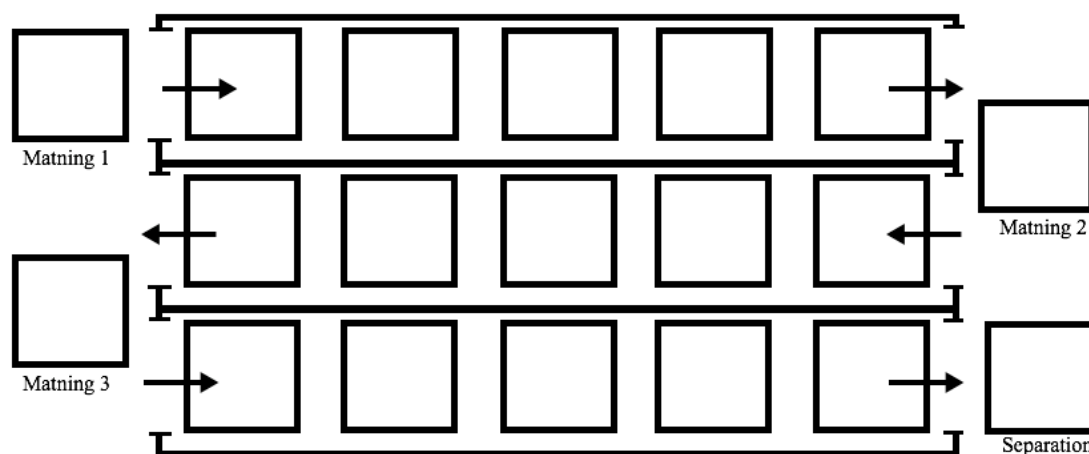
Vattenhalten i substratet påverkar behandlingsresultatet (Cheng *et al.*, 2017). Matavfall kan ha en hög vattenhalt (>80 %) vilket kan skapa ett behov av avvattning. Dortmans *et al.* (2017) avvattnar substratet till en vattenhalt runt 75 %. Enligt Salomone *et al.* (2017) innebär en för hög vattenhalt att larverna inte bryter ned materialet utan istället lämnar det. Det går dock att till viss utsträckning hindra larverna från att lämna materialet, t.ex. genom att täcka behållaren i vilket behandlingen sker (Myers *et al.*, 2008). Men det kan finnas ett behov av att reglera vattenhalten på ingående substrat, alternativt acceptera en behandlingsrest som inte kan siktas från larverna (Cheng *et al.*, 2017).

1.4 PROBLEMBESKRIVNING

Eskilstuna Strängnäs Energi och Miljö AB planerar att under hösten 2017 börja behandla en del av matavfallet från hushåll i Eskilstuna kommun med fluglarvskompostering. Anläggningen, i form av en fraktcontainer, ska ligga på avfallsstationen Lilla Nyby i Eskilstuna. Anläggningen kommer vara en pilotanläggning för fluglarvskompostering

med kapacitet att behandla upp till ett ton matavfall per dag. Behandlingen kommer utföras som en satsprocess där matavfall tillsätts tre gånger under behandlingstiden. För att göra anläggningen yteffektiv ska behandlingslådorna staplas på varandra. Då måste en luftspalt lämnas emellan dem för att syresätta materialet i behandlingslådan samt transportera bort fukt och värme. Detta görs med hjälp av ihåliga backar (luftspaltsbackar) vilka placeras emellan behandlingslådorna (Ermolaev *et al.*, 2017). Ett behandlingskriterium som behövde uppfyllas var att alla behandlingslådor i en stapel skulle avslutas samtidigt. Detta eftersom det skulle bli opraktiskt att flytta behandlingslådor mellan olika staplar i en storskalig anläggning. Ett mål var därför att minimera temperaturskillnaden mellan olika nivåer i staplarna. Det andra behandlingsmålet var att uppnå en TS på 50 % i behandlingsresten.

Då detta projekt påbörjades var designen och dimensioneringen av containern där behandlingen ska ske ännu i planeringsstadiet. Det var planerat att varje behandlingslåda skulle behandla 15 kg matavfall. Den ingående mängden matavfall skulle fördelas jämnt mellan de tre olika matningarna: en tredjedel till start av nya behandlingslådor, en tredjedel till andra matningen och en tredjedel till tredje matningen av befintliga behandlingslådor. Containern skulle bestå av tre sektioner: en för behandlingslådor som fått en matning, en för de som fått två matningar och en för de som fått tre matningar (figur 3). Behandlingsstaplarna förflyttas genom första sektionerna och vid avslutad behandling separeras larver från behandlingsrest. Om 810 kg matavfall skulle tillsättas varje vardag och fördelas jämnt mellan matningarna, skulle 54 nya behandlingslådor startas varje vardag vilket motsvarar sex staplar. Med en uppehållstid på 14 dagar för en stapel befinner sig totalt 60 staplar i containern samtidigt, vilket motsvarar 20 staplar per sektion. Motsvarande totala antal behandlingslådor i containern blir 540 och per sektion 180.



Figur 3. Containern i vilken fluglarvkomposteringen ska ske i sedd uppifrån. Containern är uppdelad i tre sektioner genom vilka behandlingsstaplarna (fyrkanter) flyttas genom från första matningen till andra, från andra matningen till tredje och till behandlingsslut med separation.

Kunskap saknas om hur bra fluglarvkompostering i staplade behandlingslådor fungerar, hur ventilationen ska utformas samt hur stark ventilation som behövs. Staplade behandlingslådor används på en anläggning för fluglarvkompostering med amerikanska

vapenflugans larver i Indonesien (Dortmans *et al.*, 2017). I svenskt klimat är tillvägagångssättet för närvarande oprövat med undantag från försök vid Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) som gjordes i början av 2017. Försöken på SLU gjordes dock utan kontrollerad ventilation.

1.4.1 Frågeställningar

Syftet med projektet var att genomföra fluglarvskomposteringsbehandling av matavfall i staplade behandlingslådor med kontrollerad ventilation för att utgöra ett första kunskapsunderlag inför uppskalning av fluglarvskompostering till en anläggning som behandlar upp till ett ton matavfall om dagen. Huvudfrågeställningen var följande:

- Hur stort luftflöde krävs för att transportera bort tillräckligt mycket vatten från behandlingslådorna så att önskat behandlingsresultat erhålls, om behandlingen sker i staplar?

För att besvara huvudfrågeställningen behövdes följande undersökas:

- Hur förändras vattenhalt och temperatur i materialet under behandlingstiden?
- Hur förändras lufttemperatur och luftfuktighet under behandlingstiden?
- Hur mycket vatten avgår under behandlingstiden, hur mycket reduceras materialet och hur mycket omvandlas till larvbiomassa?

Dessutom var det av intresse att undersöka om det uppstår några skillnader i behandlingsresultat, temperaturer eller luftfuktighet mellan olika staplar och nivåer i staplarna. Om möjligt skulle rekommendationer göras inför design av ventilationen i containern.

2. MATERIAL OCH METOD

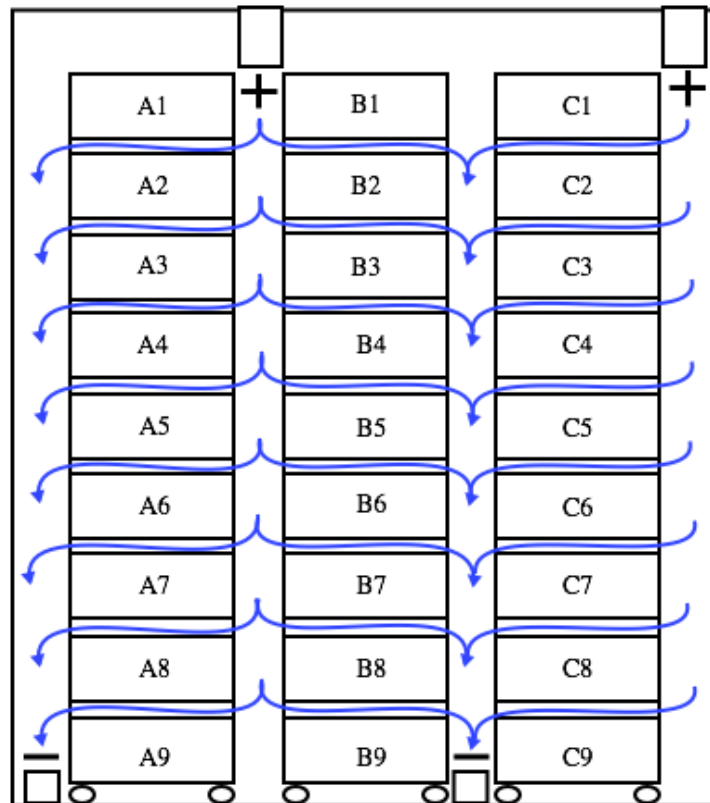
För att torka materialet bör värme och fukt som bildas i behandlingslådorna transporteras bort. Temperaturen i rummet reglerades automatiskt till 30 °C genom att ventiler i taket öppnades eller stängdes automatiskt samt vid behov med värmebläktar. Eftersom luftningsbehov och temperaturer skulle utvärderas behövde luftflödet runt behandlingslådorna kunna kontrolleras, vilket skapade ett behov av ett luftisolerat utrymme att utföra experimenten i. Ett luftisolerat skåp att utföra experimenten i byggdes i en konstruktion med träram klädd i byggplast med en träskiva i botten. Innerhöjden av träramen var 250 cm, djupet 80 cm och bredden 160 cm. På skåpets framsida satt två dörrar som öppnades utåt.

2.1 MATERIAL

Kommunalt matavfall från Eskilstuna kommun, som finfördelats på plats i Eskilstunas avfallsanläggning, användes i samtliga experiment. Amerikanska vapenfluglarver erhöles från en befintlig uppfödning på plats i växthuset vid SLU. Till pH-mätning användes avjoniserat vatten. Matavfallet behandlades i plastbackar, 40x60 cm till ytan och 17 cm höga, här kallade behandlingslådor. Behandlingslådorna staplades på en vagn.

2.1.1 Ventilationssystemet

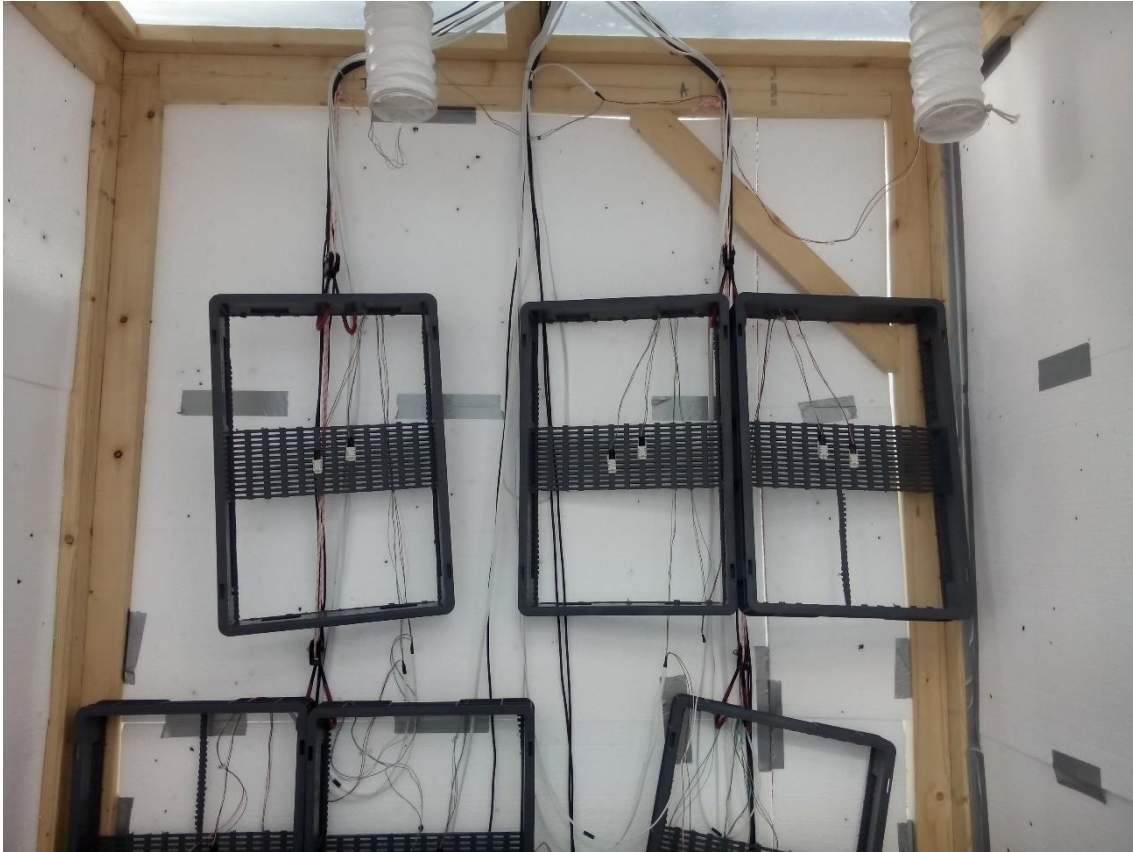
Ett ventilationssystem baserat på skillnader i lufttryck på motsatta sidor om staplarna byggdes in i skåpet (figur 4). Genom att skapa ett övertryck på ena sidan om stapeln och ett undertryck på den andra antogs att en rörelse av luften genom luftspaltsbackarna i staplarna skulle bildas. Luft pumpades in genom två flexibla plaströr med en diameter av 100 mm i taket med varsin rörläkt (Biltema, Rörläkt) med maxkapacitet av 107 m³/h var. Två ventilationsslangar, 100 mm i diameter, hängde ned till översta luftspaltsbackarna (figur 8). Längst ned på ventilationsslangarna monterades kallrassydd med vinklade blad för att distribuera luften. Kanalplaströr (Biltema), 55 mm x 110 mm, och kopplingar användes för frånluftssystemet. På golvet kopplades två luftutlopp med en diameter av 100 mm till frånluftssystemet dit en ventilationsfläkt (Biltema, Ventilationsfläkt) med en maxkapacitet av 234 m³/h kopplades. Fläkten placerades på golvet vid sidan av skåpet och kopplades till systemet med en ventilationsslang genom ett hål i väggen. Sensorer som användes drogs in via hål i taket. Alla glipor täcktes för med silvertejp, för att minska luftläckage. Denna ventilationsdesign togs fram i förförsöket (se avsnitt 2.2.1).



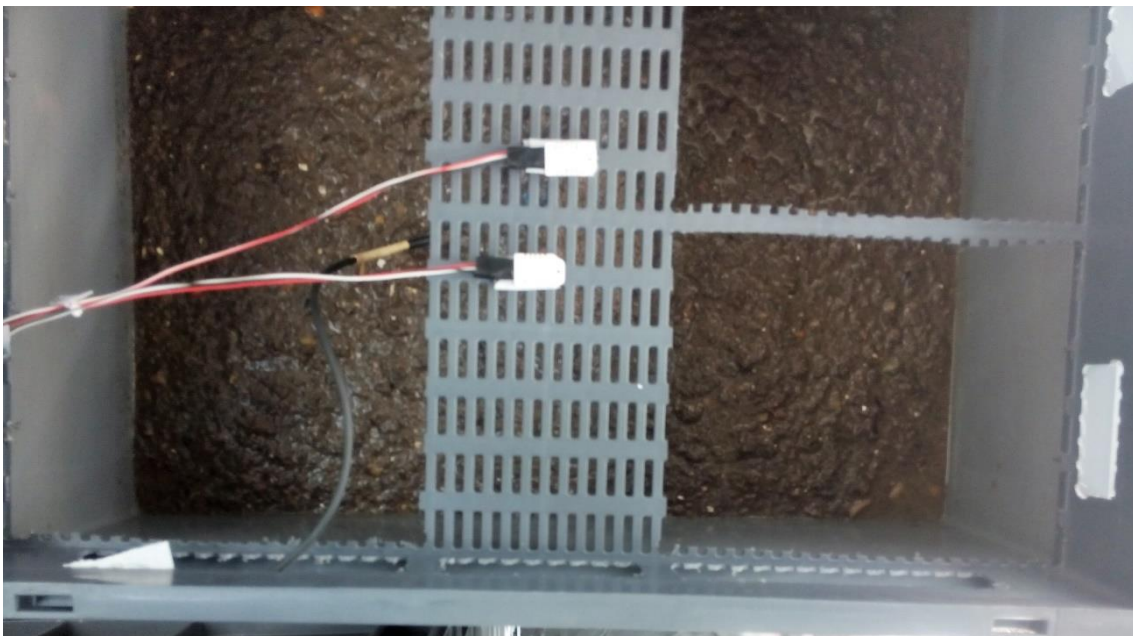
Figur 4. Skiss över skåpet och ventilationen sett framifrån med ordningen av staplar och behandlingslådor samt pilar som illustrerar luftflödet som orsakas av tryckskillnader och flödar genom luftspaltsbackarna. Övertryck är symboliserat med ett plus-tecken och undertryck med ett minus.

2.1.2 Sensorer

Att tillgå fanns sensorer för lufttemperatur och relativ luftfuktighet (luftsensorer) av märket AM2302/DHT22 med mätfel $\pm 0,5$ °C för lufttemperatur och $\pm 2-5$ % för relativ luftfuktighet. Mätdata från dessa loggades med en logger av märket Raspberry Pi modell 3B med tillhörande specialutvecklad mjukvara. Luftsensorer fördelades mellan behandlingslådor, luftinlopp och luftutlopp. En sensor placerades i vardera luftinlopp och luftutlopp, totalt fyra stycken. För att få mer tillförlitligt data placerades de sensorer som mätte emellan behandlingslådorna i par. Luftsensornerna sattes fast på luftspaltsbackarna med silvertejp (figur 5, figur 6). Eftersom det i tidigare, oisolerade, experiment var stor temperaturskillnad mellan de övre och de nedre behandlingslådorna placerades ett par luftsensorer i den nedersta lådan, nivå 9. Ett andra par av luftsensorer placerades i den näst översta behandlingslådan, nivå 2. Det sista paret av luftsensorer placerades på nivå 6, för att övervaka någon av de mittersta behandlingslådorna. Nio sensorer av märket DS18B20 användes för att mäta temperaturen direkt i materialet (materialtemperaturen) i behandlingslådorna. Dessa placerades i samma lådor som luftsensornerna (figur 6), nivå 2, 6 och 9 i varje stapel. Mätdata loggades i en dator med LogTemp software V 2.25.0.79 (MR Soft Tmi Finland).



Figur 5. Bild av insidan av experimentkåpet, sett genom dörrarna på framsidan, där några luftspaltsbackar är upphängda med luftsensorer fästa. Längst upp på bilden syns även de flexibla luftinloppen med kallrassydd.



Figur 6. Bild av en behandlingslåda med luftsensorer fästa i luftspaltsbacken ovanpå och en temperatursensor placerad i materialet vilket i denna bild är nyligen tillsatt matavfall.

2.2 EXPERIMENTUPPSTÄLLNING

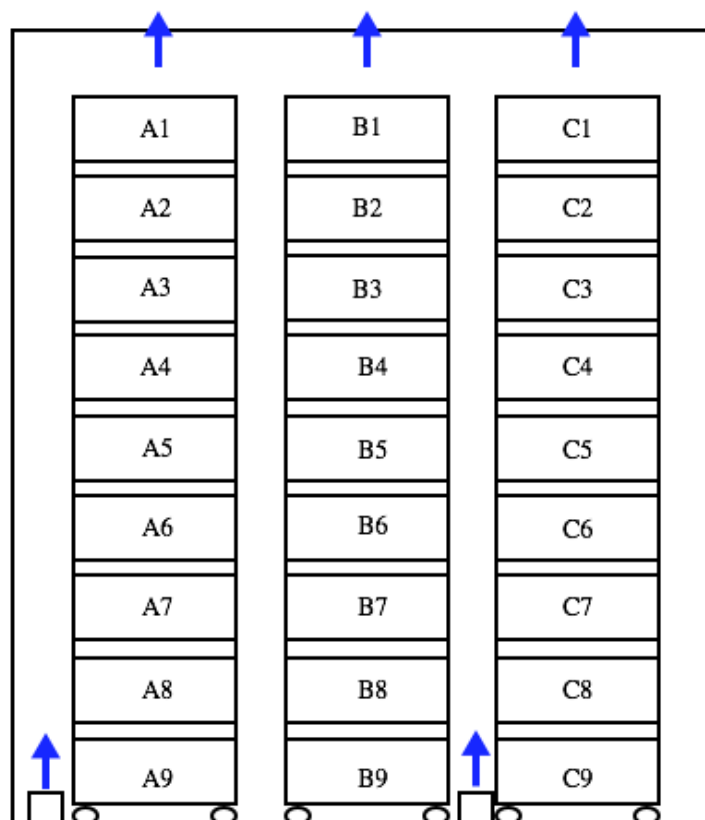
För att besvara frågeställningarna gjordes fyra omgångar med experiment: förförsök, experiment 0, experiment I samt experiment II. Syftet med förförsöket var att ta fram en ventilationsdesign i experimentskåpet att använda i efterföljande experiment. Experiment 0 var det första riktiga experimentet, men fick avbrytas för att göra ytterligare modifikationer i experimentskåpet. Experiment I och II var huvudexperimenten i detta projekt. I huvudexperimenten användes olika processparametrar. Förförsöket och experiment 0 tas inte upp i resultatdelen utan presenteras endast i avsnitt 2.21 respektive 2.2.2.

För att maximera antalet behandlingslådor, och därmed mängden matavfall som kunde behandlas, staplades behandlingslådorna på varandra. För att lämna en luftspalt emellan behandlingslådorna användes 6,5 cm höga luftspaltsbackar med samma ytmått som behandlingslådorna. Fraktcontainern som designas för att behandla ett ton matavfall om dagen har en inre takhöjd på 239 cm. Med höjd av vagnen som stapeln stod på och 10 cm avstånd till taket inkluderat, kunde nio behandlingslådor separerade med 6,5 cm mellanrum användas i en stapel. Tre staplar stod i rad under behandlingen, med ett avstånd av 10 cm ifrån varandra och väggar.

Utvärderingsparametrar för huvudexperimenten var: TS och VS i behandlingsresten, tillväxt och överlevnadsgrad hos larverna, pH i behandlingsresten, mängden vatten som avgått från matavfallet, mängden VS i matavfallet som konsumerats av larverna, lufttemperatur, relativ luftfuktighet samt temperaturen i materialet i behandlingslådorna.

2.2.1 Förförsök

Initialt testades ett system där luft pumpades in från golvet och passivt släpptes ut genom hål i taket rakt ovanför respektive stapel (figur 7). Den initiala designen gav upphov till flera graders temperaturskillnad mellan nivåerna i staplarna. Som följande steg testades ett frånluftssystem där luft pumpades ut vid golvet. Detta frånluftssystem minskade temperaturgradienterna i staplarna. För att göra ventilationen effektivare installerades rörläktar i luftinloppen, vilka även flyttades till emellan staplarna istället för rakt ovanför (figur 4). I detta experiment användes luftspaltsbackar av höjden 6,5 cm och 14 cm. Ingen större skillnad i behandlingsresultat observerades varför höjden 6,5 cm användes i efterföljande experiment, då det möjliggör fler behandlingslådor per stapel.



Figur 7. Skiss av experimentskåpet, sett framifrån, med ventilationsdesign i förförsöket. Blå pilar illustrerar luftflödets riktning.

2.2.2 Experiment 0

När den slutgiltiga designen av ventilationen i skåpet tagits fram (figur 4) startades ett experiment som var tänkt vara ett av huvudexperimenten. Dock observerades hög mortalitet i flera behandlingslådor efter några dagar, i synnerhet i de som fick mest solljus. Materialet i behandlingslådorna där hög mortalitet observerats hade ett pH-värde högre eller runt det initiala pH-värdet. Samtidigt hade temperaturer på 40 °C uppmätts i ingående luft. Överhettning i kombination med solljus ansågs därför vara den mest troliga orsaken till den höga mortaliteten. Dessutom var materialet i de översta behandlingslådorna väldigt torrt. Experimentet avbröts och justeringar gjordes inför nästa experiment. De åtgärder som gjordes var att täcka insidan av väggarna med 3 mm tjock cellplast som skydd för solljus och hänga en presenning över skåpet. Temperaturregleringen i rummet sänktes från 35 °C till 30 °C för att sänka temperaturen på ingående luft i skåpet. Dessutom beslutades att täcka över de översta behandlingslådorna, så att de inte skulle få för stort luftflöde och torka ut i huvudexperimenten.

2.2.3 Experiment I och II

I båda experimenten täcktes de översta behandlingslådorna över med en luftspaltsback och en tom behandlingslåda ovanpå (figur 8). I experiment I tillsattes totalt 15 kg matavfall och 15 000 larver i varje behandlingslåda. Matningen gjordes dag 0, 5 och 11 varvid 5 kg matavfall tillsattes varje gång. Experimentet avbröts dag 18 eftersom ett stort antal prepuppor krupit ur behandlingslådorna. I experiment II tillsattes totalt 11 kg matavfall i varje behandlingslåda och 7 000 larver tillsattes i varje behandlingslåda vid

behandlingsstart. TS-halten var dock högre än förväntat så ytterligare 3 000 larver av samma ålder som de första larverna tillsattes i varje behandlingslåda dag tre. Matningsdosererna var olika vid de olika matningarna i detta experiment. Dag 0 gavs 3,5 kg matavfall, dag 4 gavs 4 kg och dag 9 gavs 3,5 kg. Experiment I pågick i 14 dagar. De totala givorna av TS, VS och vatten var olika i experimenten (tabell 1), se avsnitt 2.4.5 för motivering. Notera att massan TS, VS och vatten i tabell 1 inte är korrigerat för provtaget material (se avsnitt 2.4.1).

Tabell 1. Total mängd TS, VS och vatten tillsatt under experiment I respektive II samt antal larver som tillsattes vid behandlingsstart ($n_{lv,in}$) i varje behandlingslåda, antal behandlingsdagar (t_d), larvdensitet, mängden torrsubstans per dag och larv (TS-dos) och mängden VS per dag och larv (Total VS-dos)

	Experiment I	Experiment II
TS (kg)	2,31 ± 0,25	1,88 ± 0,093
VS (kg)	1,93	1,55
Vatten (kg)	12,7	9,12
$n_{lv,in}$	15 000	10 000
t_d (dygn)	18	14
Larvdensitet (larv/cm ²)	6,25	4,17
TS-dos (mg TS d ⁻¹ larv ⁻¹)	8,55	13,5
Total VS-dos (mg VS/larv)	129	155

Då behandlingen avslutades separerades larver och material. Detta kunde endast göras för experiment II. För experiment I var överlevnadsgraden därför okänd. Det antogs därför att samma procentuella andel av VS i matavfallet omvandlats till larvbiomassa som i experiment II, något som har visat sig vara relativt konstant när samma typ av substrat används (Lalander *et al.*, 2017a).

2.3 PROVTAGNING

Prover togs ur samma behandlingslådor som övervakades med sensorer (lådor på nivå 2, 6 samt 9). Eftersom de översta behandlingslådorna även var av intresse för analys men det vid avvägning valdes att placera sensorer i nivån under, togs materialprover även från behandlingslådorna på nivå ett trots att inga sensorer placerades i dem. Vid varje matning togs 12 prover (samma antal som de behandlingslådor som provtogs) för analys av TS, VS och pH i matavfallet vilka togs kontinuerligt under tillsatsen av matavfall i behandlingslådorna. Innan matavfallet tillsattes i behandlingslådorna vägdes de. Vid andra och tredje matningen, samt vid avslut av behandlingen, togs prover på befintligt material i behandlingslådorna för analys av TS, VS och pH samt vikten av 10 slumpmässigt valda larver. Materialet för TS, VS och pH analys togs från fem punkter i behandlingslådan vilka blandades ihop, eventuella larver plockades ur, och materialet delades upp till respektive analys.

2.3.1 Vägning av larver under och efter behandlingen samt överlevnadsgrad

Uppskattningen av vikten av små larver som skulle tillsättas i varje behandlingslåda vid behandlingsstart bestämdes utifrån tre delprov av minilarverna. Delproven vägdes och antalet larver i respektive prov räknades för hand vilket gav medelvikten per larv.

Medelvikten per larv multiplicerat med önskat antal larver gav antal gram minilarver att tillsätta i varje behandlingslåda. De små larverna varierade i storlek, både mellan varje omgång larver såsom mellan de olika experimenten. Denna uppskattning gjordes därför inför varje experiment.

Vid matning, samt vid avslutad behandling utan separation, bestämdes medelvikten av en larv från ett delprov av 10 larver. Larverna plockades slumpmässigt ur omrört material från fem punkter i lådan. Syftet att bestämma medelvikten av 10 larver var att följa larvernas tillväxt.

Efter avslutad behandling separerades larver och material. Medelvikten per larv bestämdes utifrån vikten av 100 slumpmässigt valda larver. Sedan vägdes total mängd larver från lådan och utifrån medelvikten av en larv beräknades antalet larver i behandlingslådan. Överlevnadsgraden ($k_{öv}$) av larver uppskattades utifrån antalet larver som tillsattes vid start av behandlingen enligt:

$$k_{öv} = \frac{m_{lv,tot}}{m_{lv,med} n_{lv,in}} \quad (1)$$

där $m_{lv,tot}$ är den totala vikten av separerade larver och $m_{lv,med}$ är medelvikten av en larv baserat på vikten av 100 larver och $n_{lv,in}$ är antalet minilarver som tillsattes vid behandlingsstart.



Figur 8. Stapel A och B, sett framifrån, med en luftspaltsback och tom behandlingslåda ovanpå de översta behandlingslådorna. I figuren syns också luftinloppet mellan dem som går ned till översta luftspaltsbacken (orange).

2.3.2 Mätning av pH

Vattenhalten i det ingående matavfallet var tillräckligt högt (TS <20 %) för att mäta pH direkt i materialet. Proverna lades i fryspåsar i vilka pH mättes. Materialet i behandlingslådorna däremot var ibland för torrt för direkt pH-mätning. I de fallen togs runt 5 g material och lades i ett 50 ml centrifugrör till vilket 25 g avjonat vatten tillsattes. Rören skakades för hand i en halv minut och fick sedan stå upprätt i rumstemperatur i en timme för att låta partiklar sedimentera och låta materialet interagera med vattnet innan pH mätning (Lalander *et al.*, 2015). En tvåstegs-kalibrerad Inolab level 1 pH-meter, med en mätosäkerhet på $\pm 0,005$ pH-enheter användes för pH mätning. För mätning av matavfall och icke-nedbrutet material gjordes kalibreringen för pH 7 och 4, för nedbrutet material i slutet av behandling för pH 7 och 10. Proverna från både matavfall och material ur behandlingslådorna lades i kylskåp direkt efter provtagning. Där förvarades de tills analysen utfördes (inom 24 h). Vid tillfällena pH analysen dröjde över ett dygn frystes proverna ned vid -20 °C, och tinades igen inför analys.

2.3.3 Bestämning av TS och VS

Både matavfallet och materialet i behandlingslådorna var inhomogent. För materialet i behandlingslådorna togs en mängd material från fem punkter i lådan och larver plockades bort, sedan fördelades det i tre provskålar. Aluminiumskålar med en diameter på runt 5 cm användes för TS och VS analysen. Skålarna vägdes innan de fylldes med material (m_{sk}). När skålen fyllts vägdes den på nytt, vilket utgjorde våtvikten (m_{vv}). Skålen ställdes därefter in i en ugn på 60 °C. Om torkugnen har för hög temperatur (över 100 °C) kan organiska ämnen som utgör en del av torrsubstansen förbrännas och således erhålls en för låg fraktion TS. Efter 48 h togs proverna ut och vägdes igen, torrvikten (m_{ts}) noterades. Proverna förvarades sedan i torkugnen tills dess att VS analysen utfördes, vilket var inom två veckor från provtagning. För att bestämma VS placerades skålen i en förbränningsugn för att förbränna allt organiskt material. För att uppnå total förbränning följdes en temperaturprofil med uppvärmning i 250 °C i 2 h först för att förbränna lättflyktiga ämnen, sedan i 550 °C i 4 h för att förbränna allt organiskt material enligt SS-EN 14755:2009 ”Solid biofuels – Determination of ash content”. Den lägre temperaturen användes för att förhindra att förbränningen skedde för fort och riskera att aska förlorades. Skålen vägdes en sista gång och vikten av aska (m_{va}) noterades. Fraktionen TS beräknades enligt:

$$TS = \frac{m_{ts} - m_{sk}}{m_{vv} - m_{sk}} \quad (2)$$

där m_{ts} är vikten efter torkning, m_{vv} är våtvikten och m_{sk} är vikten av skålen. VS beräknades som fraktion av TS enligt:

$$VS = \frac{m_{ts} - m_{va}}{m_{ts} - m_{sk}} \quad (3)$$

där m_{ts} är vikten efter torkning, m_{va} är vikten efter förbränning och m_{sk} är vikten av skålen. TS och VS i larver analyserades i nedfrusna (-20 °C) larver från tidigare experiment med matavfall från Eskilstuna. Larverna som analyserades hade konsumerat matavfallet i 20–25 dagar. Larverna tinades vid rumstemperatur vartefter totalt 16 prover analyserades. TS och VS i larverna beräknades på samma sätt som för materialet med ekvation (2) och (3).

2.4 BERÄKNINGAR OCH ANTAGANDEN

I en traditionell kompost utför mikroorganismer nedbrytningen, där en viss andel av energin i materialet blir till biomassa och värme. Syrebehovet utgörs av organismernas syrebehov för respiration (stökiometriskt syrebehov) samt för transport av både värme och fukt. Ofta är det stökiometriska syrebehovet betydligt lägre än det för fukt och värme, varför någon av de senare ofta blir dimensionerande för ventilationen (Haug, 1993). I fluglarvskompostering utgörs biomassan av både mikroorganismer och larver, vilket innebär att hänsyn måste tas till båda dessa termer. Ventilationsbehovet för fluglarvskomposteringen beror alltså av både mikroorganismernas och larvernas respiration, värme som produceras av både mikroorganismer och larver samt fukt som avgår till följd av både mikroorganismernas och larvernas aktivitet.

2.4.1 Massbalans

Vid beräkning av massbalansen antogs att allt vatten som tillsattes genom matavfallet till varje behandlingslåda antingen blev kvar i behandlingsresten, togs upp av larverna eller evaporerade. Således kan massbalansen för vatten skrivas som:

$$m_{H_2O,mf} = m_{H_2O,br} + m_{H_2O,lv} + m_{H_2O,evap} \quad (4)$$

där $m_{H_2O,mf}$ är massan av vatten i tillsatt matavfall, $m_{H_2O,br}$ i behandlingsresten, $m_{H_2O,lv}$ i larvbiomassan och $m_{H_2O,evap}$ är massan vatten som evaporerat ur behandlingslådan. En viss andel av vattnet respireras, här ingår den andelen i termen $m_{H_2O,evap}$. På samma sätt antogs att den VS som tillsattes i varje behandlingslåda antingen blev kvar i behandlingsresten, omvandlades till larvbiomassa eller respirerades och beskrivs enligt:

$$m_{VS,mf} = m_{VS,br} + m_{VS,lv} + m_{VS,resp} \quad (5)$$

där $m_{VS,mf}$ är massan av VS i tillsatt matavfall, $m_{VS,br}$ i behandlingsresten, $m_{VS,lv}$ i larverna och $m_{VS,resp}$ är mängden VS som respirerats. När den genomsnittliga överlevnadsgraden av larverna var känd kunde massan av larver i behandlingslådan vid behandlingens ($m_{lv,tot}$) slut beräknas enligt:

$$m_{lv,tot} = m_{lv,med} n_{lv,in} k_{öv} \quad (6)$$

där $m_{lv,med}$ är medelvikten av en larv, $n_{lv,in}$ är antalet larver som tillsattes vid behandlingsstart och $k_{öv}$ är överlevnadsgraden hos larverna (ekvation 1). Därefter kunde massan av behandlingsresten beräknas enligt:

$$m_{br,tot} = m_{br+lv} - m_{lv,tot} \quad (7)$$

där m_{br+lv} är vikten av innehållet i behandlingslådan innan separering (behandlingsrest och larver) och $m_{lv,tot}$ är massan av larver. Massan av TS, vatten respektive VS i matavfall, behandlingsrest och larver beräknades på samma sätt. Mängden vatten ($m_{H_2O,x}$) beräknades enligt:

$$m_{H_2O,x} = m_{x,tot} (1 - TS_x) \quad (8)$$

där $m_{x,tot}$ är totala vikten och TS_x är fraktionen TS och x antingen är matavfall, behandlingsrest eller larver. Massan av VS ($m_{VS,x}$) beräknades enligt:

$$m_{VS,x} = m_{x,tot} TS_x VS_x \quad (9)$$

där $m_{x,tot}$ är totala våtvikten, TS_x är fraktionen TS, VS_x är fraktionen VS av TS och x antingen är matavfall, behandlingsrest eller larver. Massan av TS beräknades enligt:

$$m_{TS,x} = m_{x,tot} - m_{H_2O,x} \quad (10)$$

där $m_{x,tot}$ är totala våtvikten, $m_{H_2O,x}$ är mängden vatten och x antingen är matavfall, behandlingsrest eller larver.

Den totala tillsatta mängden av TS, vatten och VS beräknades som summan av det tillsatta vid varje matning, exempelvis för TS ($m_{TS,mf}$):

$$m_{TS,mf} = m_{mf,1} TS_{mf,1} + m_{mf,2} TS_{mf,2} + m_{mf,3} TS_{mf,3} \quad (11)$$

där m_{mf} är våtvikten av matavfallet och TS_{mf} är fraktionen torrsbstans i matavfallet vid respektive matning 1, 2 och 3. Den totala massa av vatten, TS samt VS som togs med proverna under experimenten subtraherades från respektive massa i matavfallet.

Med mängden vatten i behandlingsrest och larver beräknad med ekvation (8) beräknades mängden vatten som evaporerat ($m_{H_2O,evap}$) enligt:

$$m_{H_2O,evap} = m_{H_2O,mf} - m_{H_2O,lv} - m_{H_2O,br} \quad (12)$$

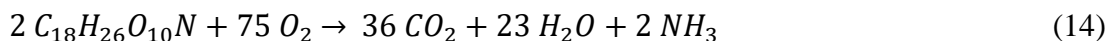
där $m_{H_2O,mf}$ är mängden vatten i matavfallet som tillsatts (ekvation 8), $m_{H_2O,lv}$ är mängden vatten i larverna (ekvation 8) och $m_{H_2O,br}$ är mängden vatten i behandlingsresten. Den procentuella andelen vattnet i matavfallet som evaporerat beräknades sedan enligt:

$$\%H_2O_{evap} = \frac{m_{H_2O,evap}}{m_{H_2O,mf}} 100 \quad (13)$$

där $m_{H_2O,evap}$ är mängden vatten som beräknats ha evaporerat (ekvation 12) och $m_{H_2O,mf}$ är mängden vatten i matavfallet (ekvation 8). Mängden vatten som togs upp av larverna ($m_{H_2O,lv}$) beräknades genom att istället bryta ut $m_{H_2O,lv}$ ur ekvation (4). Likaså beräknades mängden VS som larverna konsumerat ($m_{VS,lv}$) genom att bryta ut $m_{VS,lv}$ ur ekvation (5), och den procentuella andelen med ekvation (13) efter att ha bytt ut $m_{H_2O,evap}$ mot $m_{VS,resp}$ och $m_{H_2O,mf}$ mot $m_{VS,mf}$.

2.4.2 Stökiometriskt syrebehov

Det stökiometriska syrebehovet är den massa av syre som krävs för att bryta ned VS i materialet. Den kemiska sammansättningen av VS i matavfallet antogs vara $C_{18}H_{26}O_{10}N$ (Haug, 1993). Vid nedbrytning av VS i matavfallet konsumeras syre (O_2) samtidigt som koldioxid (CO_2), vatten (H_2O) och ammonium (NH_3) bildas enligt reaktionen:



En fullständig nedbrytning av VS i matavfallet till koldioxid och vatten antogs enligt ekvation (14). TS och VS av larver vid start av behandlingen försumrades. Med hjälp av stökiometrin i reaktion (14) kan mängden syre som krävs ($m_{O_2,st}$) beräknades enligt (Haug, 1993):

$$m_{O_2,st} = \frac{m_{VS,resp} \text{ mol}_{O_2} M_{O_2}}{M_{mf}} \quad (15)$$

där $m_{VS,resp}$ är massan VS i matavfallet som respirerats (ekvation 9), mol_{O_2} är antal mol syre som går åt för varje mol respirerat VS (här =75/2), M_{O_2} är molvikten för syre (32

g/mol) och M_{mf} är molvikten för VS i matavfallet (416,39 g/mol). Luftflödet i antal m³/h av torr luft som det motsvarar beräknades därefter enligt (Haug, 1993):

$$R_{O_2} = \frac{m_{O_2} n_{lådor}}{0,232 \rho_{luft} t_d 24} \quad (16)$$

där 0,232 är fraktionen syre i luft, t_d är antalet dagar av behandling, $n_{lådor}$ är antal behandlingslådor (i dessa experiment = 27), ρ_{luft} är densiteten av luft och faktor 24 ger enheten per timme. Densiteten av luft varierar beroende på temperatur, tryck och luftfuktighet. Atmosfärstryck antogs råda inne i experimentskåpet, vilket ger ett uttryck för ρ_{luft} enligt:

$$\rho_{luft} = 1,2929 \frac{273,15}{T_{in} + 273,15} \quad (17)$$

där T_{in} är genomsnittstemperaturen av inluften (Nordling & Österman, 2006).

2.4.3 Teoretisk behandlingskapacitet och luftningsbehov

Luftflödet som krävs för att transportera bort fukt beräknades utifrån lufttemperatur, luftfuktighet, torrsustanser och våtvikter. Massan av vatten som luften (g vatten per kg torr luft) potentiellt kan transportera bort (X_{pot}) beräknades enligt:

$$X_{pot} = X_{ut} RH_{ut} - X_{in} RH_{in} \quad (18)$$

där X_{ut} och X_{in} är den relativa mängden ånga per kg torr luft vid totaltrycket 1 bar (g/kg torr luft) för ut-, respektive inluft och RH_{in} och RH_{ut} är relativ luftfuktighet av in- respektive utluft. Den relativa mängden ånga i luften är temperaturberoende och värdena för närmaste heltal av temperatur hämtades från Mörtstedt (1976). Mängden vatten som kunde transporteras bort ifrån en låda per timme ($m_{H_2O,tr}$) beräknades enligt:

$$m_{H_2O,tr} = \frac{R X_{pot} \rho_{luft}}{n_{lådor}} \quad (19)$$

där ρ_{luft} är densiteten av luft vid aktuell temperatur (ekvation 17), X_{pot} är i g vatten per kg luft, R är kapaciteten på ventilationen (i dessa experiment = 214 m³/h) och $n_{lådor}$ antalet lådor (i dessa experiment = 27). Totala massan vatten som teoretiskt avgår under behandlingen, inklusive det som omvandlas till larvbiomassa, ($m_{H_2O,evap,teo}$) ges av:

$$m_{H_2O,evap,teo} = (m_{mf} - m_{mf} TS_{mf}) - (m_{br} - m_{br} TS_{br}) \quad (20)$$

där m_{mf} och TS_{mf} är våtvikten respektive torrsustansen av tillsatt matavfall medan m_{br} och TS_{br} är våtvikten respektive torrsustans av färdigbehandlat material (Haug, 1993). I de fall då vikten av färdigbehandlat material, m_{br} , är okänd kan den uppskattas ($m_{br,est}$) enligt:

$$m_{br,est} = \frac{(1 - VS_{mf}) TS_{mf} m_{mf}}{(1 - VS_{br}) TS_{br}} \quad (21)$$

Vilket genom insättning i ekvation (7) ger:

$$m_{H_2O,evap,teo} = m_{mf} \left((1 - TS_{mf}) - \frac{(1 - VS_{mf})(1 - TS_{br}) TS_{mf}}{(1 - VS_{br}) TS_{br}} \right) \quad (22)$$

där VS_{mf} är VS, m_{mf} är totala våtvikten och TS_{mf} är torrsubstansen i matavfallet, VS_{br} och TS_{br} är VS respektive torrsubstans i behandlingsrest (Haug, 1993). Från en given mängd vatten som kan transporteras bort från materialet under behandlingen ($m_{H_2O,tr}$) kan mängden matavfall som varje låda kan behandla beräknas förutsatt att TS och VS i matavfall och behandlingsrest är känt. Genom att beräkna $m_{H_2O,tr}$ med ekvation (19), anta att $m_{H_2O,evap,teo} = m_{H_2O,tr}$ och bryta ut m_{mf} ur ekvation (22) erhålls följande ekvation för mängden matavfall som kan behandlas:

$$m_{mf} = \frac{m_{H_2O,evap,teo}}{(1-TS_{mf}) - \frac{(1-VS_{mf})(1-TS_{br})TS_{mf}}{(1-VS_{br})TS_{br}}} \quad (23)$$

där $m_{H_2O,evap,teo}$ är mängden vatten som teoretiskt evaporerat, VS_{mf} är VS, m_{mf} är våtvikten och TS_{mf} är torrsubstansen i matavfallet, VS_{br} och TS_{br} är VS respektive TS i produkt.

På samma sätt som mängden matavfall kan beräknas givet en kapacitet på ventilationen, kan kapaciteten på ventilationen som krävs för att behandla en given mängd matavfall beräknas (R_{H_2O}). Genom att beräkna $m_{H_2O,evap,teo}$ med ekvation (20), eller (22), återigen anta att $m_{H_2O,evap,teo} = m_{H_2O,tr}$, kan luftflödet i m^3/h brytas ut ur ekvation (19) vilket ger följande relation:

$$R_{H_2O} = \frac{m_{H_2O,evap,teo} n_{lådor}}{q \rho_{luft} t_d 24} \quad (24)$$

där $m_{H_2O,evap}$ är mängden vatten som avgår per låda under behandlingen i g, $n_{lådor}$ antalet lådor (i dessa experiment = 27), $\rho_{luft,T}$ är luftdensiteten, t_d är antal behandlingsdagar och 24 ger enheten per timme. För att beräkna luftflödet som krävs för den faktiska evaporationen användes $m_{H_2O,evap}$ istället för $m_{H_2O,evap,teo}$ i ekvation (24).

2.4.4 Materialreduktion och BOF

Materialreduktionen av matavfallet under behandlingen beräknades på torrviktsbasis enligt:

$$Red_{TS} = \left(1 - \frac{m_{br}TS_{br}}{m_{mf}TS_{mf}}\right) 100 \quad (25)$$

där m_{mf} är våtvikt och TS_{mf} är TS i matavfallet, m_{br} och TS_{br} är våtvikt respektive TS av behandlingsresten (Lalander *et al.*, 2015). Bioomvandlingsfaktorn från avfall till biomassa (*BOF*) beräknades på torrviktsbasis enligt:

$$BOF = \left(\frac{m_{TS,lv}}{m_{TS,mf}}\right) 100 \quad (26)$$

där $m_{TS,lv}$ är mängden TS i larver (ekvation 10) och $m_{TS,mf}$ är mängden TS i matavfallet (ekvation 11). *BOF* på VS-basis beräknades genom att byta ut $m_{TS,lv}$ och $m_{TS,mf}$ mot $m_{VS,lv}$ respektive $m_{VS,mf}$ i ekvation (26)

2.4.5 Initiala antaganden för parametrar

Enligt tidigare experiment med matavfall kunde totalt 15 kg matavfall behandlas per behandlingslåda av 15 000 larver, vilket skulle resultera i en matningsdos på 200 mg VS/larv (Lalander *et al.*, 2017a). Därför användes 15 kg matavfall och 15 000 larver i experiment I. Inför experiment II beräknades mängden matavfall som kunde behandlas

per behandlingslåda baserat på data från experiment I. Som mål för behandlingen med avsikt på behandlingsresten valdes TS_{br} till 0,5. Det är en lämplig TS-halt av behandlingsrest för att kunna sikta bort den från larverna i slutet av behandlingen (Cheng *et al.*, 2017). VS_{br} valdes till 0,7. Ny beräkning med ekvation (23) med TS och VS enligt experiment I (tabell 1) gav att 11 kg matavfall skulle kunna behandlas. Därför minskades mängden matavfall i experiment II till 11 kg våtvikt och antalet larver minskades till 10 000, vilket skulle motsvara en matningsdos på 137 mg VS/larv.

2.4.5 Statistisk analys

Vid beräkningar med sensordata användes dygnsmedelvärden, eftersom dygnsvariationer förekom. För utvärdering av skillnader mellan de olika behandlingslådorna, både i varje stapel och emellan staplarna, användes tvåsidigt ANOVA test med 95 % konfidensintervall i Excel. I ANOVA-testerna användes medelvärdet av de två sensorerna placerade i varje behandlingslåda. Tvåsidigt ANOVA test med 95 % konfidensintervall användes även för att utvärdera skillnader i massan vatten samt massan VS som evaporerat respektive respirerats i de olika behandlingslådorna.

Med hjälp av ett tvåsidigt Students t-test med konfidensintervall på 95 % i Excel fastställdes statistiska skillnader mellan parametrar i matavfallet och behandlingsresten: TS, VS och pH. För att undersöka signifikansen av förändringar i parametrar med tiden gjordes korrelationstest mellan behandlingsdagar och parametern av intresse.

2.5 AVGRÄNSNINGAR

Experimenten utfördes i ett växthus på SLU i Uppsala, vilket innebär att miljöfaktorer såsom temperatur, luftfuktighet och solljus till viss del varit betingat av miljön i och utanför växthuset. I dessa experiment har en bestämd höjd av luftspalten mellan behandlingslådor använts, utvärdering av olika höjder har inte gjorts. I experimenten som utfördes, undantaget förförsöket, har samma design och styrka på ventilationen använts. Vattenhalten i matavfallet som levererades från Eskilstuna justerades inte innan användning, således varierade den mellan matningarna. Det antogs att samma andel VS i matavfallet omvandlades till biomassa i båda experimenten.

3. RESULTAT

3.1 BEHANDLINGSRESULTAT OCH MASSBALANS

3.1.1 Behandlingsresultat

Det var en signifikant skillnad i TS, VS och pH mellan matavfall och behandlingsrest i både experiment I och II (tabell 2). För samtliga variabler, förutom TS i experiment I, var signifikansnivån hög ($p < 0,001$). I experiment I var en större del av behandlingsresten icke nedbruten än i experiment II. Förutom visuell skillnad och ett lägre pH-värde observerades den lägre nedbrytningsgraden som en surare lukt från behandlingslådorna under experiment I. Inom experimenten var det ingen signifikant skillnad mellan TS- eller VS-halten i behandlingsresten mellan behandlingslådorna (bilaga D, tabell 7). I genomsnitt steg pH med 2,6 enheter i experiment I medan det i experiment II steg med 3,9 enheter (bilaga D, figur 1).

Tabell 2. Medelvärden och standardavvikelser av TS, VS och pH, baserat på 36 prov för TS och VS och 12 prov för pH, i matavfall respektive behandlingsrest för experiment I och II. Det är signifikant skillnad mellan matavfall och behandlingsrest, för samtliga parametrar, signifikansnivån är representerad med *

	Experiment I		Experiment II	
	Matavfall	Behandlingsrest	Matavfall	Behandlingsrest
Våtvikt (kg)	15,0	5,79 ± 1,15	11,0	3,67 ± 0,474
TS (%)	15,4 ± 1,91	17,5 ± 4,88*	17,2 ± 3,38	21,5 ± 2,36***
VS (%)	83,5 ± 1,99	79,8 ± 3,08***	82,5 ± 3,65	79,7 ± 3,13***
pH	4,79 ± 0,411	7,36 ± 0,569***	4,57 ± 0,111	8,47 ± 0,0886***

Signifikansnivå: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Analys av larver uppfödda på matavfall visade att de innehöll $35,1 \pm 1,62$ % TS varav $80,3 \pm 3,06$ % var VS. Under experiment I var tillväxthastigheten av larverna överlag högre än i experiment II (bilaga D, figur 2). Materialreduktionen på torrviktsbasis var lägre i experiment I än i experiment II (tabell 3). Överlevnadsgraden av larver i experiment II var runt 84 %. Beräkning av överlevnadsgraden i experiment I, baserat på BOF på VS-basis i experiment II, gav att 49 % av de tillsatta larverna överlevde i experiment I.

Tabell 3. Materialreduktionen på torrviktsbasis (Red_{TS} , %), bioomvandlingsfaktorn på torrviktsbasis (BOF , %), det totala mikrobiella syrebehovet ($m_{O_2, st}$, kg) samt överlevnadsgraden av larverna ($k_{öv}$, %) för experiment I respektive II

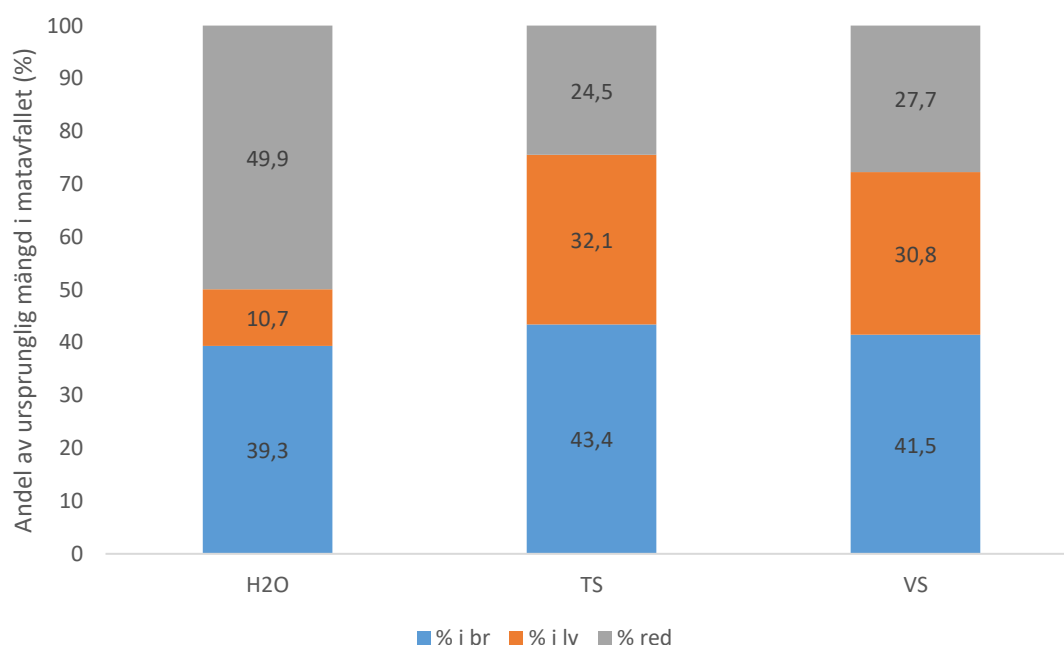
	Experiment I	Experiment II
Red _{TS} (%)	56,6 ± 3,18 ⁱ	65,3 ± 5,41
BOF (%)	32,1 ± 0,0282 ⁱ	31,5 ± 0,103
m _{O₂, st} (kg)	1,50	1,52
k _{öv} (%)	49,2 ± 0,290 ⁱ	83,8 ± 9,2

i: Beräknat baserat på BOF på VS-basis för experiment II

För experiment I var BOF på torrviktsbasis högre, vilket indikerar att mer torrsubstans i matavfallet omvandlades till larvbiomassa än i experiment II (tabell 3). Under experiment I var det stökiometriska syrebehovet 1,50 kg O₂ och under experiment II 1,52 kg O₂, vilket motsvarar ett luftflöde på 0,34 respektive 0,44 m³ torr luft/h. Matningsdosen av VS per larv baserat på 84 % överlevnadsgrad var 185 mg VS/larv för experiment II och för 49 % överlevnadsgrad i experiment I blev matningsdosen 263 mg VS/larv.

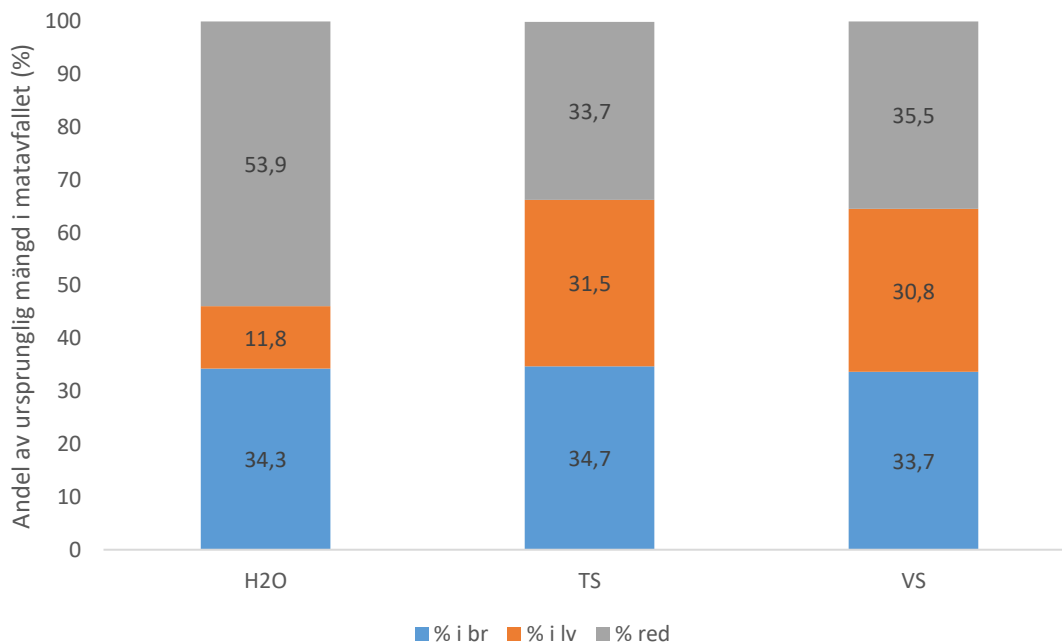
3.1.2 Massbalans

Det var ingen signifikant skillnad i andel vatten som evaporerat eller VS som respirerats mellan olika nivåer eller staplar i experiment I. Den genomsnittliga mängden vatten som evaporerade per låda var 6,18 kg under de 18 dagarna som experiment I pågick och i genomsnitt respirerades 519 g VS per behandlingslåda. Under experiment I evaporerade runt 50 % av det ursprungliga vatten och behandlingsresten innehöll runt 40 % av ursprungligt vatten, TS och VS (figur 9).



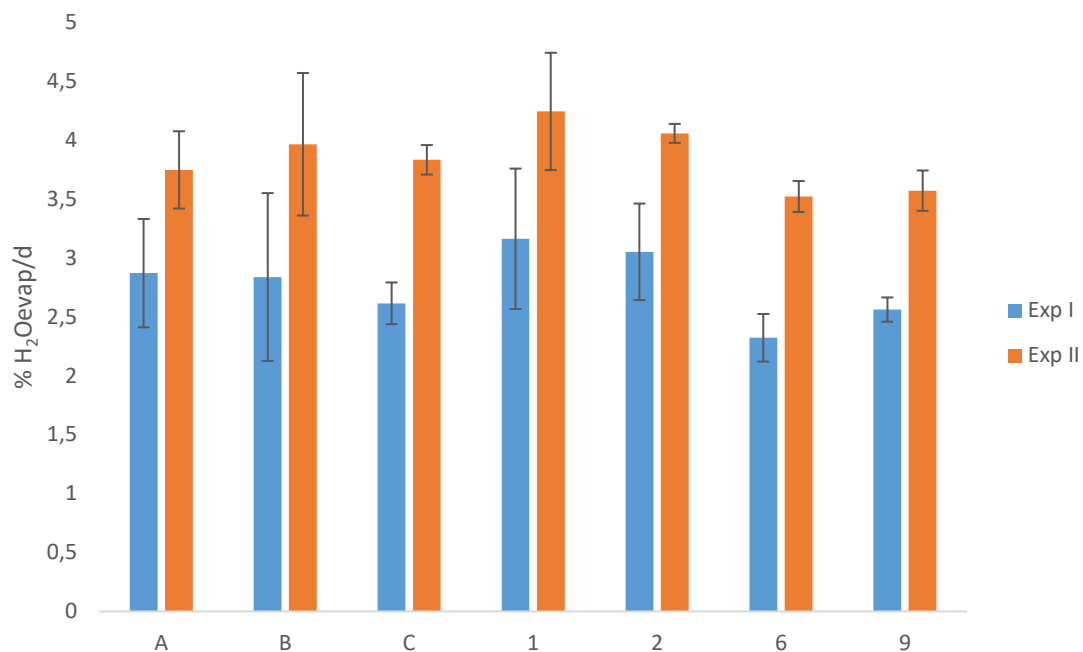
Figur 9. Den procentuella andelen av ursprungligt vatten, TS och VS i matavfallet som återfanns i behandlingsresten (br), i larver (lv) eller som evaporerat eller respirerats (red) under experiment I.

I experiment II evaporerade i genomsnitt 4,78 kg vatten och 528 g VS respirerades i varje behandlingslåda (figur 9). Det var ingen signifikant skillnad i andel vatten som evaporerat eller VS som respirerats i behandlingslådor på olika nivåer eller i olika staplar under experiment II. Under experiment II evaporerade runt 54 % av det ursprungliga vattnet och behandlingsresten innehöll runt 34 % av ursprungligt vatten, TS och VS (figur 10).



Figur 10. Den procentuella andelen av ursprungligt vatten, TS och VS i matavfallet som återfanns i behandlingsresten (br), i larver (lv) eller som evaporerat eller respirerats (red) under experiment II.

Den procentuella andelen av ursprungligt vatten och VS som återfanns i behandlingsresten var jämförbar mellan experimenten (figur 9, figur 10). Den genomsnittliga, procentuella, andelen av ursprungligt vatten som evaporerade per behandlingsdag var signifikant lägre i experiment I än II (figur 11). Det var ingen signifikant skillnad i andelen vatten som evaporerat från behandlingslådor på olika nivåer, eller i olika staplar, under något av experimenten. I båda experimenten var det ur låda B1 (högst i mittenstapeln (figur 4)) som störst andel vatten evaporerade ifrån. I genomsnitt evaporerade $2,8 \pm 0,51$ % vatten per behandlingsdag i experiment I och $3,8 \pm 0,413$ % i experiment II.



Figur 11. Procentuell evaporation av tillsatt vatten i varje behandlingslåda för experiment I (blå staplar) och II (orange staplar) per behandlingsdag i stapel A, B och C samt på nivå 1, 2, 6 och 9, inklusive standardavvikelser.

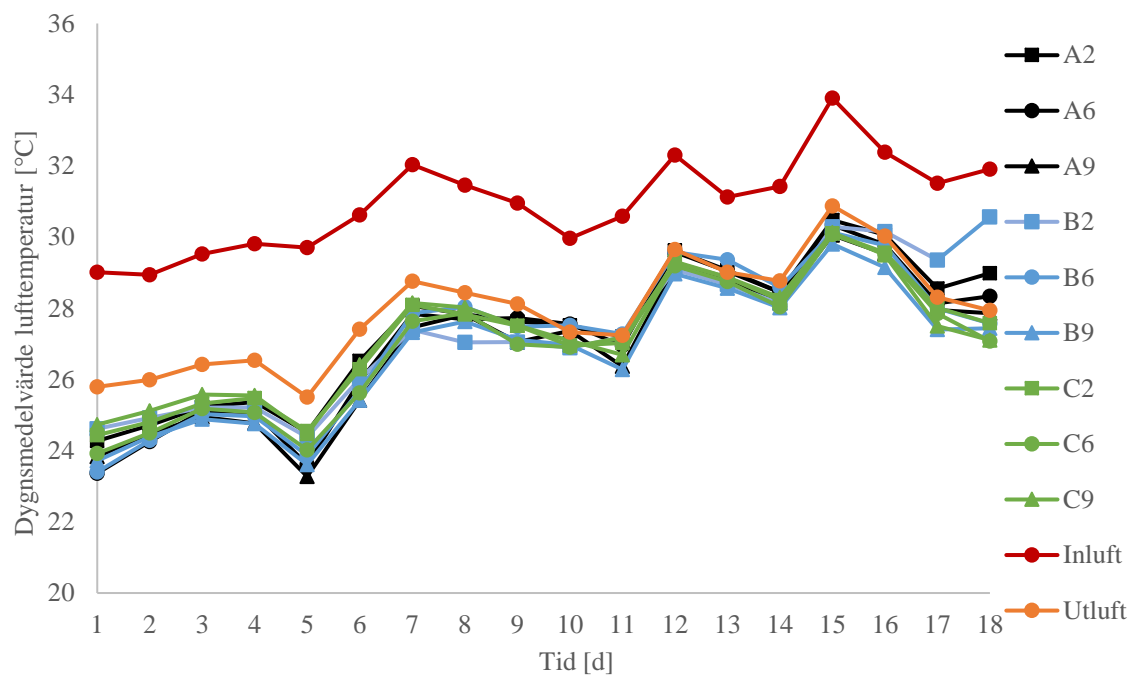
Den procentuella andelen vatten som evaporerade mellan matningarna visade en negativ trend (bilaga D, figur 3). För experiment I minskade andelen evaporerat vatten från 6,2 % per dag under dag 0–5 till 3,1 under dag 12–18. För experiment II var motsvarande minskning från 9,3 % under dag 0–4 till 4,5 % under dag 10–14.

3.2 TEMPERATURER OCH LUFTFUKTIGHET

Dygnsmedelvärden av lufttemperatur, relativ luftfuktighet och materialtemperatur för båda experimenten återfinns i bilaga A, B respektive C.

3.2.1 Lufttemperatur

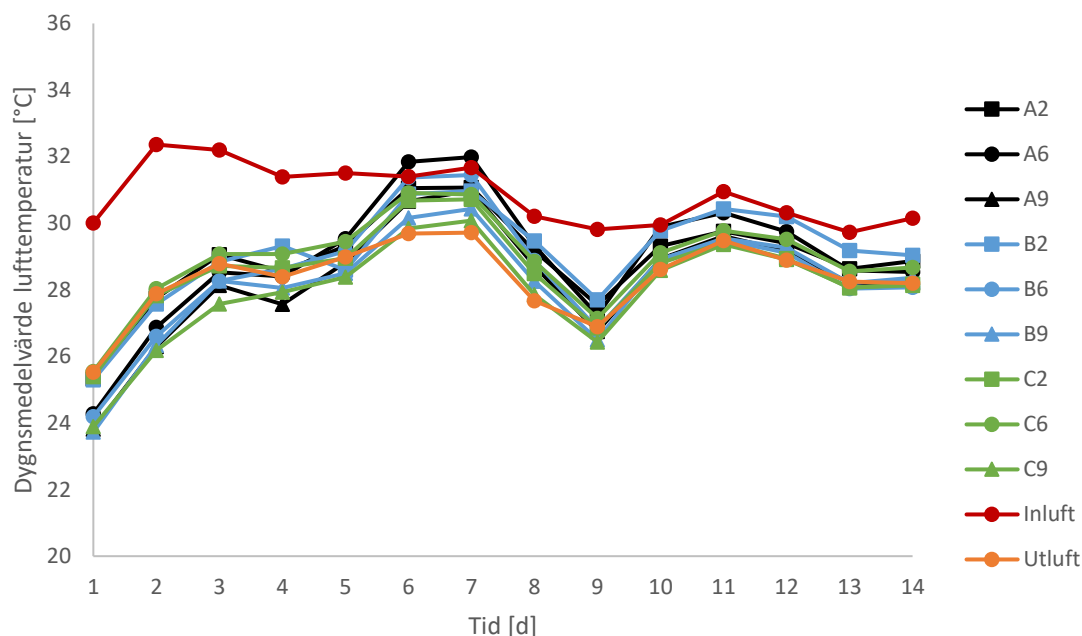
Den högsta uppmätta lufttemperaturen under experiment I var 39,9 °C i inluften och den lägsta var 18,5 °C i luften ovanför låda B9 (lägst i mittenstapeln). Medeltemperaturen i utluften var högre än lufttemperaturen i lådorna på dagarna 1–9 samt 15 (figur 12). Den genomsnittliga temperaturen av inluft och utluft var 30,9 °C respektive 27,7 °C.



Figur 12. Dygnsmedelvärden av lufttemperatur (°C) under experiment I ovanför lådorna 2 (fyrkant), 6 (cirkel) och 9 (triangel) i respektive stapel A (svart), B (blå) och C (grön) samt för inluft (röd) och utluft (orange).

I både stapel A och B var lufttemperaturen i behandlingslådorna på nivå 2 (högst i stapeln) högre än de på nivå 6 (mitterst i stapeln) och 9 (lägst i stapeln) (figur 12). I stapel C var lufttemperaturen i genomsnitt lägst i låda 6 men den genomsnittliga lufttemperaturen i låda 2 och 9 var samma. Dagarna då matning skedde, dag fem och 11, sammanföll med två av de lufttemperatursänkorna som uppmättes. Ytterligare en sänka observerades dag 14, dock observerades även en sänka i inluftstemperaturen samma dag. Medelvärdet av lufttemperaturen i behandlingslådorna berodde av inluftstemperaturen, med en korrelationsfaktor 0,90. Lufttemperaturen i behandlingslådorna ökade med antal behandlingsdagar med en korrelationsfaktor på 0,88. Vilket även inluftstemperaturen gjorde, med en korrelationsfaktor på 0,80. Således var ökningen i lufttemperatur i behandlingslådorna inte nödvändigtvis beroende av antal behandlingsdagar, utan istället av inluftstemperaturen. Den högsta standardavvikelsen, i detta fall differensen eftersom det rörde sig om två värden, mellan två sensorer i samma behandlingslåda var 4,35 °C och den genomsnittliga var 0,16 °C. Dessa värden ligger inom sensorernas mätosäkerhet.

Den högsta uppmätta lufttemperaturen under experiment II var 39,0 °C i inluften dag tre och den lägsta var 20,0 °C i utluften dag 0. Matning tre skedde dag nio, vilken sammanfaller med en sänka i lufttemperaturen (figur 13). Den andra matningen skedde dag fyra, vilket inte syns lika tydligt i figuren. Den genomsnittliga temperaturen av inluft och utluft var 30,8 °C respektive 28,3 °C.

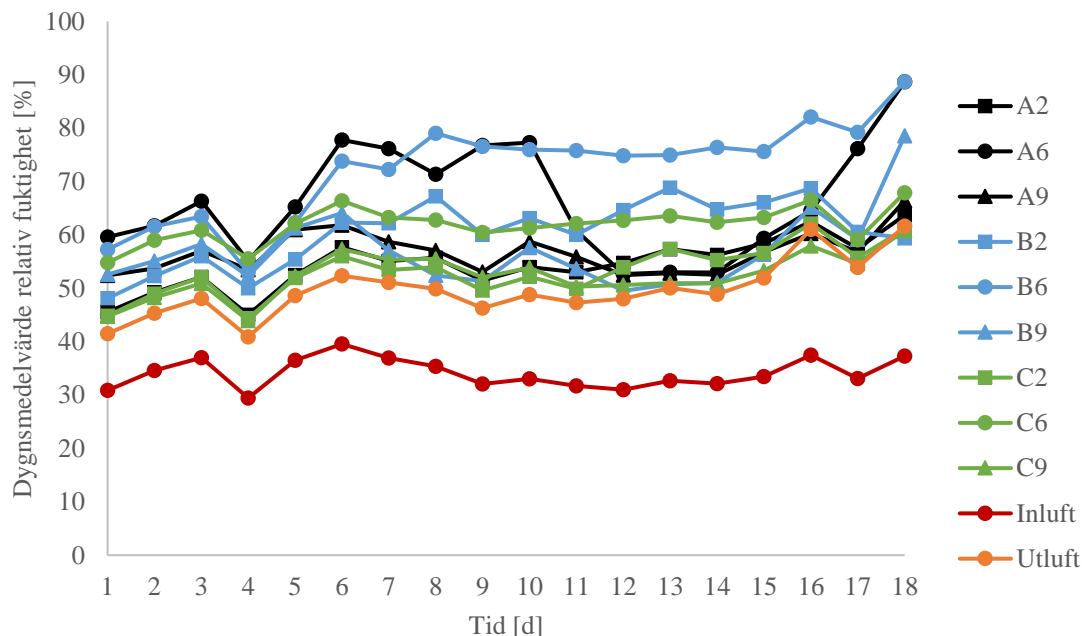


Figur 13. Dygnsmedelvärden av lufttemperatur (°C) under experiment II ovanför lådorna 2 (fyrkant), 6 (cirkel) och 9 (triangel) i respektive stapel A (svart), B (blå) och C (grön) samt för inluft (röd) och utluft (orange).

Den största differensen mellan högsta och lägsta dygnsmedelvärdet var 2,0 °C dag sex, och den genomsnittliga differensen var 1,5 °C (figur 13). Det var en svag korrelation (korrelationsfaktor på 0,52) mellan antal behandlingsdagar och medelvärdet av lufttemperaturen i behandlingslådorna. Skillnaden mellan inluftstemperaturen och den i behandlingslådorna var lägre i experiment II än I. Dessutom visar inluftstemperaturen en negativ trend över tiden i experiment II. I experiment I visade den en ökande trend (jämför figur 12 och figur 13). Dygnsmedelvärdet av inluftstemperaturen var lägre än i behandlingslåda A6 under dag sex och sju (figur 13). Den högsta standardavvikelsen mellan två sensorer i samma behandlingslåda var 6,9 °C och den genomsnittliga var 0,24 °C, vilket ligger inom sensorernas mätosäkerhet.

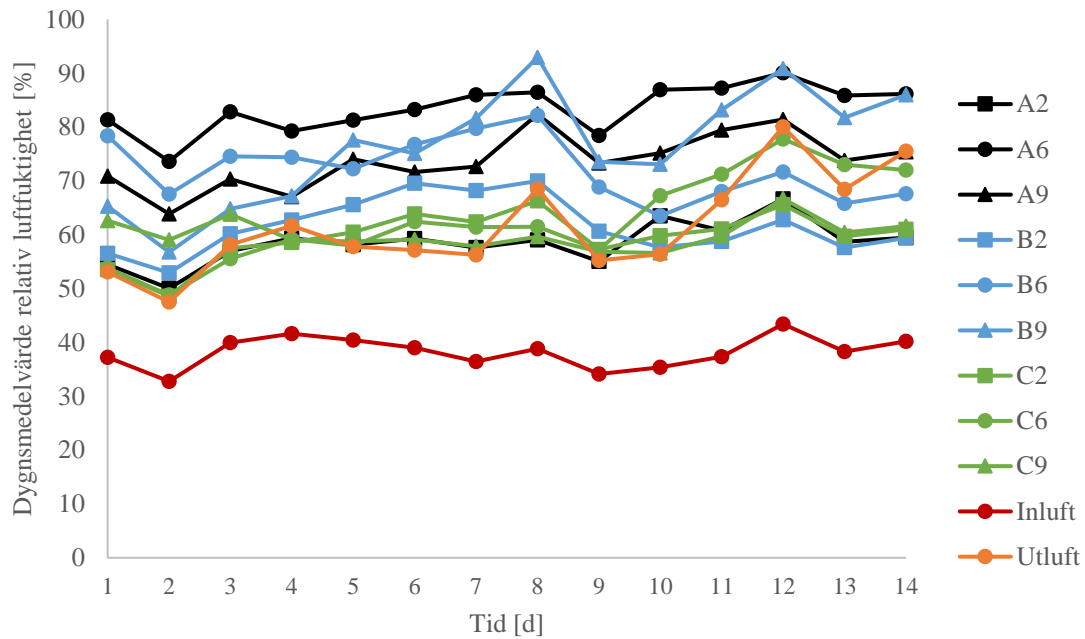
3.2.2 Relativ luftfuktighet

Av behandlingslådorna hade låda B6 (medelhöjd i mittersta stapeln (figur 4)) den högsta genomsnittliga relativa luftfuktigheten på 71,7 % under experiment I, medan låda C9 hade den lägsta på 52,2 % (figur 14). Den genomsnittliga, relativa luftfuktigheten i inluften var 34,1 % och i utluften 49,5 %.



Figur 14. Dygnsmedelvärden av relativ luftfuktighet (%) under experiment I ovanför lådorna 2 (fyrcant), 6 (cirkel) och 9 (triangel) i respektive stapel A (svart), B (blå) och C (grön) samt för inluft (röd) och utluft (orange).

Den högsta uppmätta relativa luftfuktigheten under experimentet var 98,7 % i låda B6 och den lägsta var 22,5 % i inluften. I samtliga staplar var dygnsmedelvärdet av den relativa luftfuktigheten högst i lådorna på nivå 6, den mittersta nivån, runt 10 % högre än i lådorna på nivå 2 och 9 (figur 14). De mittersta behandlingslådorna i samtliga staplar hade alltså högst relativ luftfuktighet. Skillnaden mellan de olika behandlingslådorna var mindre i början av behandlingen och efter dag sex ökade skillnaderna. För alla dagar utom dag 16 var den relativa luftfuktigheten i utluften lägre än den ovanför behandlingslådorna., Luften emellan behandlingslådorna innehöll alltså mer vatten än den luften som lämnade skåpet de flesta dagarna. Den högsta standardavvikelsen mellan två sensorer i samma behandlingslåda var 20,3 % och den genomsnittliga var 2,89 %. Den genomsnittliga avvikelsen ligger inom sensorernas mätosäkerhet, den högsta är över mätosäkerheten. Den högsta uppmätta relativa luftfuktigheten under experiment II var 111,8 % i låda B9, vilket inte är möjligt utan den var troligen nära 100 %, och den lägsta var 22,5 % i inluften (figur 15). Den genomsnittliga, relativa luftfuktigheten i inluften var 38,5 % och i utluften 61,1 %.

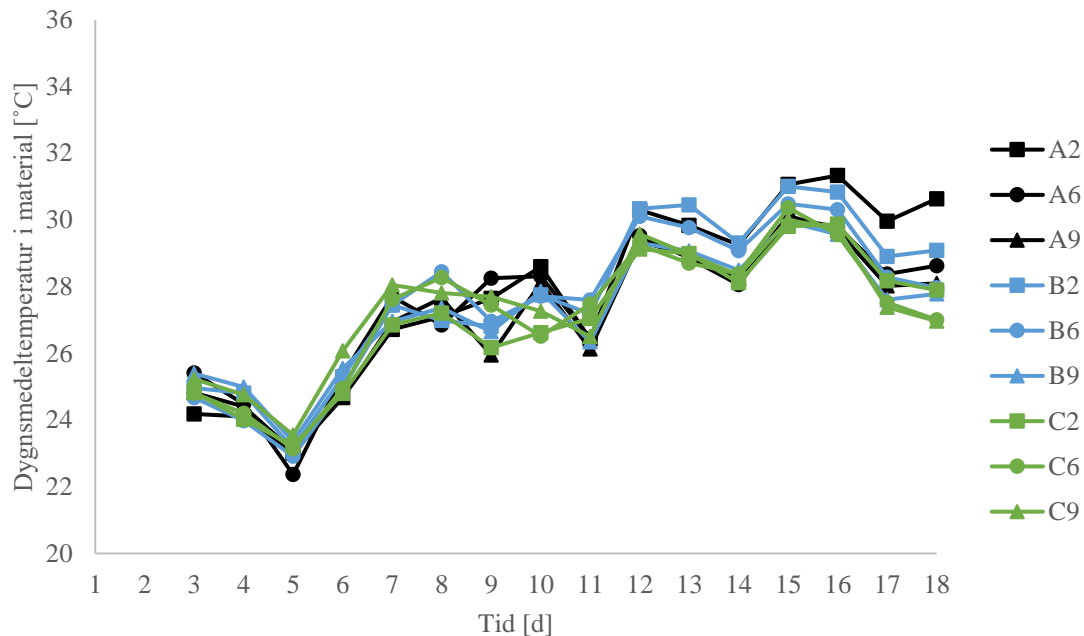


Figur 15. Dygnsmedelvärden av relativ luftfuktighet (%) under experiment II ovanför lådorna 2 (fyrkant), 6 (cirkel) och 9 (triangel) i respektive stapel A (svart), B (blå) och C (grön) samt för inluft (röd) och utluft (orange).

Den högsta, genomsnittliga, relativa luftfuktigheten var 82,8 % i låda A6 under experiment II och den lägsta, förutom inluften, var 58,3 % i låda A2 (figur 15). Den högsta standardavvikelsen mellan två sensorer i samma behandlingslåda var 23,7 % och de genomsnittliga var 5,3 %. Båda avvikelserna är högre än sensorernas mätosäkerhet.

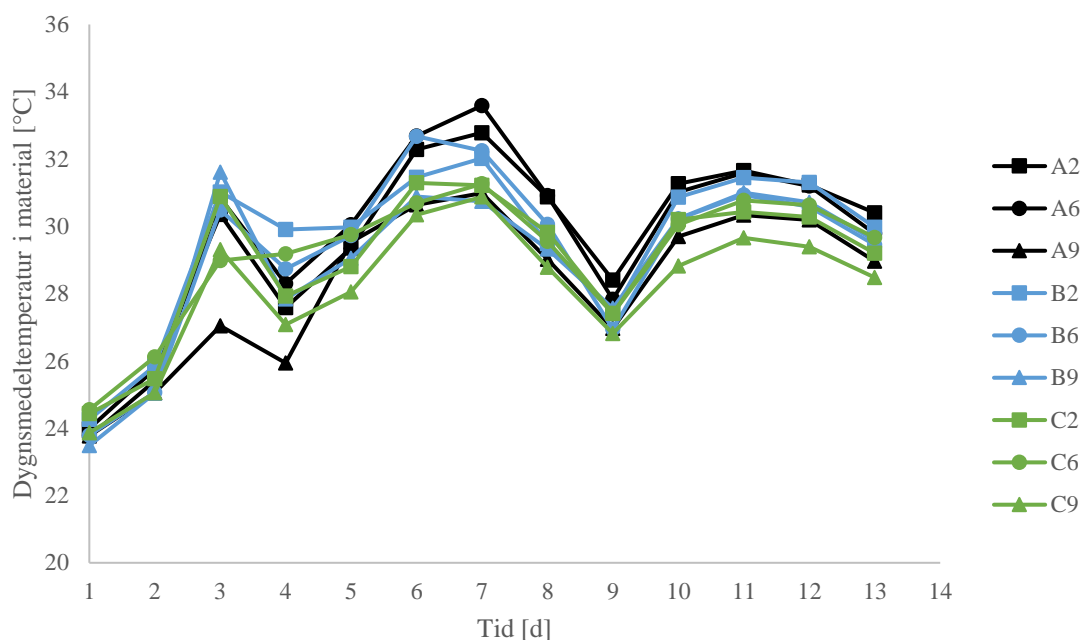
3.2.3 Temperatur i materialet

Sensordata av temperatur i materialet började loggas dag 3 av behandlingen, därför saknas data från de första dagarna av experiment I (figur 16). Den högsta uppmätta temperaturen var 33,1 °C i låda A2 dag 15 och den lägsta var 16,4 °C i låda C9 dag 5 (figur 16).



Figur 16. Dygnsmedelvärden av temperaturen i materialet i °C under experiment I i lådorna 2 (fyrkant), 6 (prick) och 9 (triangel) i respektive stapel A (svart), B (blå) och C (grön).

I stapel A och B var genomsnittstemperaturen i materialet i behandlingslådorna på nivå 2 högre än på nivå 6 och 9 (figur 16). I stapel C däremot var genomsnittstemperaturen i behandlingslådan på nivå 9 högre än i lådorna på nivå 6 och 2. Dock var temperaturskillnaden mellan alla lådor i genomsnitt endast 0,7 °C och skillnaden i materialtemperatur mellan olika behandlingslådor var inte signifikant. Den största skillnaden i dygnsmedelvärde av materialtemperatur mellan två behandlingslådor inträffade dag 18 då skillnaden mellan lådorna A2 och C9 var 3,6 °C. Materialtemperaturen ökade med antal behandlingsdagar i experiment I, med en korrelationsfaktor på 0,82. Den högsta uppmätta materialtemperaturen under experiment II var 35,3 °C i låda B2 dag 6 medan den lägsta uppmätta var 17,1 °C i låda C9 dag 9 (figur 17).



Figur 17. Dygnsmedelvärden av temperaturen i materialet (°C) under experiment II i lådorna 2 (fyrkant), 6 (prick) och 9 (triangel) i respektive stapel A (svart), B (blå) och C (grön).

Det skedde ett dygns avbrott i loggandet av materialtemperaturdata mellan dag två och tre, dygnsmedelvärdena i figur 16 är därför missvisande under de dagarna. Det högsta dygnsmedelvärdet som observerades var 33,6 °C dag sju i låda A6 och det lägsta var 23,5 °C i låda B9 dag ett (figur 17). Differensen mellan största och minsta dygnsmedelvärdet för samtliga behandlingslådor var 3,97 °C dag 4 respektive 1,59 °C dag 9. Matning utfördes dag fyra och nio vilket kan observeras i figur 17 som sänkor i materialtemperaturen. Materialtemperaturen i experiment II visade inte samma ökande trend som i experiment I (jämför figur 16). Korrelationsfaktorn mellan materialtemperatur och antal behandlingsdagar för experiment II var 0,55.

3.2.4 Jämförelse experiment I och II

Medellufttemperaturen i staplarna var olika mellan experiment I och II (tabell 4). Överlag var lufttemperatur, relativ luftfuktighet och materialtemperatur högre under experiment II än under experiment I. Lufttemperaturen var under både experiment I och II lägst vid nivå nio och högst vid nivå två, i båda experimenten fanns alltså en signifikant lufttemperaturgradient i staplarna. Det var också en signifikant skillnad i lufttemperatur mellan staplarna, liksom mellan nivåerna i varje enskild stapel. Samma sak gällde för relativ luftfuktighet; det var en signifikant skillnad mellan staplar, inom varje stapel samt mellan de olika nivåerna. I både experiment I och II var den relativa luftfuktigheten i genomsnitt högst på nivå 6, vilket var den mittersta nivån. Luften ovanför behandlingslådorna på nivå 6 innehöll alltså mer vatten än luften ovanför de andra lådorna. Det var ingen signifikant skillnad i materialtemperaturen i behandlingslådorna under experiment I. Under experiment II däremot fanns en signifikant skillnad, om än något lägre mellan staplarna än mellan nivåerna. I experiment II observerades en höjdttemperaturgradient i materialet, med högsta temperaturerna vid nivå 2 och lägsta vid nivå 9.

Tabell 4. Medelvärden av lufttemperatur (°C), relativ luftfuktighet (%) och temperaturen i materialet i behandlingslådorna (°C) i samtliga lådor (i stapel A, B, C), på varje nivå (2, 6 och 9) med \pm standardavvikelse, samt signifikansnivån i skillnaden emellan staplarna (A, B, C) samt emellan nivåerna (2, 6, 9)

	Experiment I	Experiment II
Lufttemperatur (°C)		
Stapel A, B, C	26,9 \pm 0,13***	28,4 \pm 0,25***
Nivå		
2	27,1 \pm 0,09***	28,7 \pm 0,21***
6	26,8 \pm 0,07***	28,6 \pm 0,19***
9	26,7 \pm 0,23***	27,9 \pm 0,13***
Relativ luftfuktighet (%)		
Stapel A, B, C	59,3 \pm 4,22***	67,0 \pm 5,08***
Nivå		
2	55,8 \pm 3,05***	59,5 \pm 1,21***
6	66,6 \pm 4,11***	72,1 \pm 8,31***
9	55,4 \pm 2,25***	69,4 \pm 6,80***
Materialtemperatur (°C)		
Stapel A, B, C	27,5 \pm 0,13	29,2 \pm 0,35**
Nivå		
2	27,5 \pm 0,35	29,5 \pm 0,31***
6	27,4 \pm 0,14	29,4 \pm 0,25***
9	27,6 \pm 0,23	28,6 \pm 0,37***

Signifikansnivå: **p<0,01, ***p<0,001

3.3 BEHANDLINGSKAPACITET OCH LUFTNINGSBEHOV

En liten skillnad i medeltemperaturen av ingående och utgående luft uppmättes mellan experimenten (tabell 5). Dock fanns en större skillnad i relativ luftfuktighet mellan in- och utluft i experiment II. Den större skillnaden i relativ luftfuktighet indikerar att luften transporterade mer vatten per kg luft i experiment II än I. Den totala mängden vatten som kunde transporteras bort var dock ungefär samma för båda experimenten, eftersom experiment I pågick under fler dagar än experiment II.

Tabell 5. Temperatur i in-, och utluft (T), relativ luftfuktighet i inluft respektive utluft (RH) samt mängden vatten per kg inluft respektive utluft (X). Beräknade värden baserade på experimentella data för ventilationens kapacitet att transportera bort fukt (X_{pot} och $m_{H_2O,tr}$), den faktiska mängden vatten som evaporerade under experimenten ($m_{H_2O,evap}$) samt kvoten mellan dem uttryckt i %

	Experiment I	Experiment II
T_{in} (°C)	30,9	30,8
T_{ut} (°C)	27,7	28,3
RH_{in} (%)	0,34	0,38
RH_{ut} (%)	0,50	0,61
X_{in} (g H ₂ O/kg luft)	27,6	29,3
X_{ut} (g H ₂ O/kg luft)	24,4	24,4
X_{pot} (g H ₂ O/kg luft)	2,70	3,67
$m_{H_2O,tr}$ (kg)	10,7	11,3
$m_{H_2O,evap}$ (kg)	6,18	4,79
$m_{H_2O,evap}/m_{H_2O,tr}$ (%)	57,7	42,2

Trots att luften i experiment II teoretiskt kunde bära mer vatten, evaporerade mer vatten per behandlingslåda i experiment I. Andelen vatten som evaporerade per kg matavfall var dock lägre i experiment I än i experiment II, 41,3 jämfört med 43,5 %. Kvoten mellan mängden vatten som teoretiskt kunde transporteras bort och mängden vatten som faktiskt avgick från varje behandlingslåda var högre för experiment I än II, 58 % respektive 42 %. Baserat på den faktiska mängden vatten som evaporerade från varje behandlingslåda och X_{pot} krävdes ett luftflöde på 123 m³/h under experiment I och 90,3 m³/h under experiment II.

Baserat på fördelningar av torrsubstansen (figur 10) och en TS-halt i larverna på 35,1 % erhöles en $m_{br,tot}$ på 1,56 kg för ett m_{mf} på 15 kg med 15 % TS. Detta gav ett $m_{H_2O,evap}$ på 12 kg, vilket motsvarar 94 % av tillsatt vatten. Baserat på temperaturer, relativa luftfuktigheter, TS_{mf} och VS_{mf} i experiment II (tabell 5 och tabell 2) erhöles ett luftflöde på 8,36 m³/h per behandlingslåda för att transportera bort tillräckligt med vatten för att nå en TS_{br} på 50 %. För 27 behandlingslådor skulle det då behövas ett luftflöde på 226 m³/h, vilket är något högre än maxkapaciteten av den installerade ventilationen i experimentsskåpet. För 15 kg matavfall men TS_{mf} på 25 % istället skulle det under samma förhållanden som i experiment II krävas ett luftflöde på 7,0 m³/h för att nå en TS_{br} på 50 % på 14 dagar. Om istället mängden matavfall minskas till 11 kg, med en TS på 15 %, krävs ett luftflöde på 6,1 m³/h för att nå en TS_{br} på 50 % på 14 dagar.

4. DISKUSSION

4.1 BEHANDLINGSRESULTAT OCH MASSBALANS

Matavfallet i experiment I förväntades ha en TS-halt på runt 20 %, men det visade sig vara runt 15 % (tabell 2). Detta innebar att 0,75 kg mer vatten än beräknat tillsattes i till varje behandlingslåda med matavfallet. Det innebar att 0,75 kg mer vatten behövde transporteras bort per behandlingslåda för att uppnå en TS på 50 % i behandlingsresten. Dessutom innebar en lägre torrsbstanshalt att den dagliga VS doseringen per larv var mindre än beräknat, vilket påverkar larvernans tillväxt enligt Lalander *et al.* (2017a). Trots att TS-halten i behandlingsresten var låg i experiment I, var av TS-halten i behandlingsresten signifikant högre än i matavfallet (tabell 2). I båda experimenten var andelen VS i behandlingsresten signifikant lägre och pH-värdet högre än i matavfallet (tabell 2). Detta visar att behandlingen fungerade i de staplade behandlingslådorna.

Den procentuella reduktionen av tillsatt VS var inte samma för båda experimenten (figur 9 och figur 10). Skillnaden i andel VS i matavfallet som respirerats var signifikant lägre i experiment I än i experiment II. Det var ingen signifikant skillnad i mängden VS som respirerats i behandlingslådor i olika staplar eller nivåer inom något av experimenten. Det betyder att bioomvandlingen var relativt lika i alla behandlingslådor som provtogs. Det var inte heller något signifikant skillnad i TS-halten eller VS-halten i olika behandlingslådor inom experimenten (bilaga D, tabell 7). Även det betyder att behandlingsresultaten i de olika behandlingslådor som provtogs var relativt lika.

Materialreduktionen på torrviktsbasis beräknades till 57 % för experiment I och 65 % för experiment II (tabell 3). Dessa torrsbstansreduktioner är i övre regionen av intervallet 33-73 % som återfinns i litteraturen (Sheppard *et al.*, 1994; Myers *et al.*, 2008; Diener *et al.*, 2009, 2011a, Lalander *et al.*, 2013, 2015; Nguyen *et al.*, 2015; Paz *et al.*, 2015; Lalander *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2017).

Studier har visat att en högre vattenhalt ger en snabbare tillväxthastighet hos larverna (Cheng *et al.*, 2017). Detta observerades även i experimenten som utfördes i detta projekt då medelvikten per larv ökade snabbare i experiment I än II (bilaga D, figur 2). För experiment I antogs att samma andel VS i matavfallet omvandlats in larvbiomassa, då denna andel har visat sig vara relativt konstant när samma typ av substrat används (Lalander *et al.*, 2017a). För experiment II beräknades bioomvandlingsfaktorn, *BOF*, på torrviktsbasis till 31,5 %. Det är långt över de 11,8 % som rapporterades av Lalander *et al.* (2015) och de 14,5 % som rapporterades av Diener *et al.* (2011). Banks *et al.* (2014) erhöll ett högre *BOF* på 22,3 %, vilket är något närmare de 31,5 % som erhöles i experiment II. Den *BOF* som erhöles i experiment II överensstämmer med det som tidigare erhöles med matavfall som substrat (Lalander *et al.*, 2017a).

Massbalanserna är baserade på TS och VS i matavfall, behandlingsrest och larver samt våtvikt av matavfallet, behandlingsresten och larverna. Bland dessa parametrar är våtvikten av larverna den troligen mest osäkra. I experiment II uppskattades våtvikten av larver genom att multiplicera överlevnadsgraden med antal tillsatta larver och medelvikten av en larv. I experiment I beräknades våtvikten av larver utifrån massan av VS i larver, som i sin tur beräknats från *BOF* på VS-basis för experiment II. Ett antal prepuppor hade krupit ur behandlingslådorna i experiment I vid behandlingens slut, något som gett ytterligare osäkerhet i beräkningarna av våtvikten larver i experiment I.

Den totala, genomsnittliga, massan vatten som evaporerade från varje behandlingslåda var mindre i experiment II än I: 4,8 kg jämfört med 6,2 kg. Eftersom en mindre mängd matavfall med högre TS användes i experiment II var TS högre i behandlingsresten i experiment II än I. Dock var TS betydligt lägre än de 50 % som önskades och behandlingsresten var inte siktbar efter 14 dagar. Resultaten visade ingen signifikant skillnad i massan vatten som evaporerat i olika behandlingslådor, i de enskilda experimenten. Det var inte heller någon signifikant skillnad i den procentuella andelen av det med matavfallet tillsatta vattnet som totalt evaporerade under experiment I och II. Däremot observerades en signifikant skillnad i andelen vatten som evaporerade per behandlingsdag mellan experiment I och experiment II. I experiment I evaporerade en mindre andel vatten per dag än i experiment II. Den totala andelen vatten som evaporerade var alltså jämförbart i båda experimenten, men evaporationen var effektivare i experiment II.

Den massa av vatten som luften teoretiskt kunde transportera bort per behandlingslåda under hela experimentet var 10,7 kg för experiment I och 11,3 kg för experiment II (tabell 5). De uppmätta lufttemperaturerna och relativa luftfuktigheterna användes i beräkningen men det antogs att luftflödet var 214 m³/h. Under experiment I var andelen vatten av den teoretiska mängden som transporterades bort 58 % och för experiment II var motsvarande kvot 42 % (tabell 5). Ventilationens effektivitet för att transportera vatten var alltså runt 50 % av dess kapacitet. Mätning av luftflödet i experimentsskåpet gjordes inte. Baserat på den faktiska mängden vatten som evaporerade under experimenten var luftflödet 123 respektive 90 m³/h i experiment I respektive II. En förklaring till att det är lägre än vad som antogs (214 m³/h) kan vara att ventilationssystemet hade stora förluster i luftflödet. Det skulle innebära att luftflödet i experimentsskåpet var lägre än de 214 m³/h som antogs.

4.2 TEMPERATURER

Materialtemperaturen i behandlingslådorna ökade med antal behandlingsdagar i experiment I (figur 16). I experiment I ökade också lufttemperaturen i behandlingslådorna med tiden, men det gjorde även inluftstemperaturen (figur 12). Resultaten indikerar att lufttemperaturen i behandlingslådorna var mer beroende av inluftstemperaturen än materialtemperaturen. I experiment II minskade lufttemperaturen i behandlingslådorna med antal behandlingsdagar (figur 13). Materialtemperaturen i behandlingslådorna visade ett mycket svagt ökande samband med antal behandlingsdagar (figur 17). I båda experimenten minskade skillnaden mellan inluftstemperaturen och materialtemperaturen med antal behandlingsdagar. Det kan förklaras av att larverna var större och frigjorde mer värme mot slutet av behandlingen. Temperaturen i materialet i behandlingslådorna blev då högre mot slutet av behandlingen och därmed närmare inluftstemperaturen. Teoretiskt sett borde en högre materialtemperatur leda till ökad evaporation. I experimenten så minskade andelen vatten som evaporerade per dag under experiments gång (bilaga D, figur 3). Det tyder på att andra faktorer än temperatur påverkade evaporationen.

Den genomsnittliga temperaturen i materialet i behandlingslådorna var högre i experiment II än i experiment I (tabell 4). Detta trots att den genomsnittliga temperaturen i inluften var ungefär densamma, 31 °C, i båda experimenten (tabell 5). I studien av Cheng et al. (2017) observerades att en högre TS-halt, det vill säga större mängd torrsbstans och mindre mängd vatten per larv, ledde till en högre temperatur i materialet. En högre materialtemperatur kan leda till mer evaporation av vatten och som en konsekvens högre

luftfuktighet ovanför behandlingslådorna. Det kan förklara både de högre temperaturerna och relativa luftfuktigheterna i experiment II (tabell 4). Trots de högre relativa luftfuktigheterna i experiment II evaporerade en mindre total mängd vatten per behandlingslåda än i experiment I. Det tyder på att även andra faktorer än TS-halten, temperaturer och luftfuktigheten påverkat evaporationen och lett till skillnaderna mellan experimenten.

I båda experimenten var temperaturen i utluften lägre än inluften (figur 12, figur 13). Det innebär att luften förlorade energi på sin väg genom experimentetskåpet. Det krävs energi för att evaporera vatten (Haug, 1993), vilket kan förklara varför den utgående luften hade lägre temperatur. En del av energin i inluften användes för att evaporera vatten eller värma behandlingslådorna. En signifikant skillnad observerades i lufttemperaturen på de olika nivåerna i staplarna (tabell 4), för båda experimenten. En lufttemperaturgradient observerades i båda experimenten, med högst medeltemperatur på nivå två (näst högst upp i staplarna) och lägst på nivå nio (lägst i staplarna). Dessa skillnader i lufttemperatur var dock betydligt lägre än vad som observerades under behandling i staplar utanför experimentetskåpet, samt i förförsöket. Förutom lufttemperaturen så påverkar också temperaturen i materialet och relativ luftfuktighet hur mycket vatten som evaporerar. Dessutom påverkar larverna genom att med sina rörelser blanda om materialet vilket ökar evaporationen. Utöver detta frigörs värme i fluglarvskomposteringsprocessen som även det ökar evaporationen (Lardé, 1989). Således leder inte nödvändigtvis skillnader i lufttemperatur, materialtemperatur eller relativ luftfuktighet i och runt behandlingslådorna till ett ojämnt behandlingsresultat i olika behandlingslådor i en stapel. Ingen signifikant skillnad i massan av vatten som evaporerat eller massan av VS som respirerats på olika nivåer erhöles i experimenten. De signifikanta skillnaderna i lufttemperatur, relativ luftfuktighet och materialtemperatur i behandlingslådorna gav alltså inte upphov till signifikanta skillnader i behandlingsresultatet. Målet var att nå en TS-halt i behandlingsresten som möjliggjorde enkel separering med sikt. Det är möjligt att separeringen fungerar tillfredställande även fast alla behandlingslådor inte har samma TS-halt, så länge alla är siktbara. Det beror dock på utrustningen som används för att separera larver från behandlingsrest och är ett ämne att undersöka i fortsatta studier.

Den ingående luften hade en genomsnittlig temperatur på 31 °C under experimenten (tabell 5). Resultaten indikerar att detta är en lämplig temperatur eftersom den genomsnittliga materialtemperaturen var 27-30 °C, vilket är inom det föredragna temperaturintervallet enligt Tomberlin *et al.* (2009). Dock tolererar larverna högre temperatur, och vid högre temperatur evaporerar mer vatten. En något högre materialtemperatur kan därför vara fördelaktig. Det finns dock fler sätt att uppnå det förutom att höja inluftstemperaturen. En högre larvdensitet och högre TS-halt har också visat sig påverka materialtemperaturen (Paz *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2017). Även resultaten från experiment I och II indikerar att TS-halten påverkar materialtemperaturen, då materialtemperaturen i genomsnitt var högre i experiment II än I (tabell 4). I experiment I användes matavfall med en genomsnittlig TS-halt på 15,4 % medan det i experiment II hade 17,2 % TS.

4.3 BEHANDLINGSKAPACITET OCH PROCESSPARAMETRAR

Att prepupporna sökte sig ifrån behandlingslådorna i slutet av experiment I var ett naturligt beteende då prepuppor söker sig till ett jordliknande material för att genomgå

omvandlingen till puppa och sedan fluga (Sheppard *et al.*, 1994; Diener *et al.*, 2011a). Materialet i behandlingslådorna dag 18 bestod till 82,5 % av vatten, vilket drev prepupporna ut ur behandlingslådorna.

I en storskalig behandlingsanläggning kan migration av stora mängder prepuppor bli problematiskt, och bör därför undvikas. Främst bör processparametrar väljas så att vattenhalten inte är så hög som i experiment I (88 %) när larver börjar omvandlas till prepuppor. Det kan uppnås genom med reglering av vattenhalt i matavfallet eller ökad ventilation. Migration av prepuppor kan även ske på grund av en för hög matningsdos av VS per larv. Om för stor mängd VS tillsätts per larv kan larverna utvecklas till prepuppor innan behandlingsresten är tillräckligt nedbruten och torr för att de ska vilja stanna kvar i den. Baserat på antagandet om samma *BOF* på VS-basis, var VS-dosen per överlevande larv 263 mg i experiment I vilket är högre än det rekommenderade 200 mg VS/larv för matavfall (Lalander *et al.*, 2017a). I dessa experiment användes luftspaltsbackar med en glipa där handtaget satt, genom vilken de flesta prepupporna som rymde tog sig ut. Dock blockerades dessa med silvertejp i slutet av experiment I, varvid en del tog sig ut genom luftningshålen istället. Har materialet i behandlingslådan en vattenhalt som i experiment I är det alltså svårt att förhindra att larver kryper ut i slutet av behandlingen. Larver kan krypa ut ur behandlingslådorna om kanterna på insidan av dem är fuktiga. Fukt på insidan av behandlingslådan kan uppstå under behandlingen, varför även små larver kan krypa ut under behandlingens gång. Eftersom även små larver tenderar att vilja lämna materialet i början av, och under, behandlingen kan med fördel behandlingslådor och luftspaltsbackar som hindrar migrerande larver användas. Alternativt samla upp dem på något sätt under behandlingsstapeln.

Variationer i vattenhalt i matavfallet beror på variationer i det matavfall som inkommer till Eskilstuna avfallsanläggning (Ermolaev *et al.*, 2017). I fluglarvskompostering av substrat med hög vattenhalt kan initial avvattning av substratet vara aktuellt för att höja TS-halten (Dortmans *et al.*, 2017; Salomone *et al.*, 2017). Avvattning av matavfallet i Eskilstuna är möjligt. Alternativt kan torrare matavfall väljas ut till fluglarvskomposteringsbehandlingen, något som är möjligt när en liten andel av inkommande matavfall ska fluglarvkomposteras. Matavfallet bör dock inte heller vara för torrt. Enligt Banks *et al.* (2014) innebär en torrsubstanshalt på 35 - 40 % i ingående material att det blir för torrt för larverna och behandlingskapaciteten minskar. Anläggningen och ventilationssystemet ska byggas, medan hanteringen av matavfallet är befintlig. Därför kan det vara mest fördelaktigt att designa ventilationen för att torka ut materialet för att nå önskat behandlingsresultat. Något som bör tas i beaktning i det fall stark ventilation används, är att ytan på matavfallet kan torka ut och bilda en skorpa. Skorpbildning och torrt material observerades i experiment 0, troligen ett resultat av för höga temperaturer och högt luftflöde. Att reglera ventilationen och temperaturen i behandlingscontainern utifrån vattenhalten i inkommande matavfall skulle kunna möjliggöra evaporation av mer vatten utan att torka ut materialet för mycket eller för lite, ifall avvattning inte görs. Viss reglering kan vara nödvändig oavsett om vattenhalten i matavfallet regleras eller inte. Luftningsbehovet beror även av mängden material i behandlingslådan. Eftersom matning ska göras tre gånger under behandlingstiden finns det risk att torka ut materialet innan andra och tredje matningen. Eftersom materialet bryts ned och vatten evaporerar kontinuerligt finns det då mindre material i behandlingslådan.

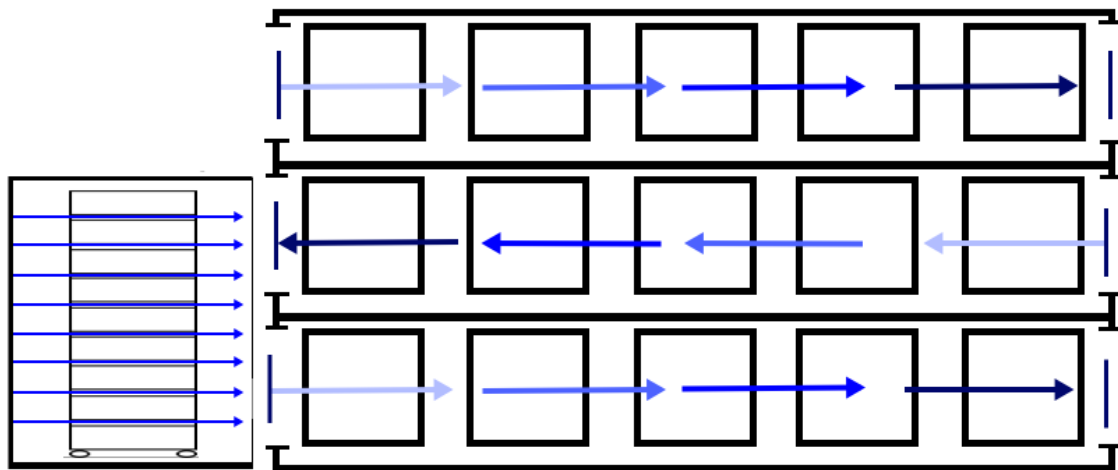
Om samma luftflöde ges till de behandlingslådorna finns en risk att materialet torkar ut för mycket och larvernas överlevnadsgrad sjunker.

Baserat på massbalansen av torrsubstans och förhållanden i experimentskåpet som erhöles i experiment II samt 15 kg tillsatt matavfall behöver 10 till 12 kg vatten evaporera för att nå en TS på 50 % i behandlingsresten, om TS i matavfallet är 15–25 %. Detta motsvarar ett luftflöde av mellan 8,4 och 7,0 m³/h per behandlingslåda. Dessa luftflöden är den luft som faktiskt ska strömma genom luftspaltsbacken. Något som dock bör tas i beaktning är att stark ventilation kan skapa en ogynnsam miljö för larverna i behandlingslådan. Temperaturen är av stor vikt, och behöver övervakas för att den inte ska sjunka så lågt att larverna blir inaktiva eller så hög att de försöker rymma eller inte överlever. Fortsatta studier behövs i första hand för att avgöra om högre luftflöden faktiskt leder till att behandlingsresten torkas ut till önskad grad, TS-halt på 50 %. Det behöver även undersökas hur de luftflödena som krävs påverkar själva behandlingen, främst med avseende på temperatur och behandlingstid. Alternativt kan mängden matavfall minskas eller antal behandlingsdagar ökas. Om 11 kg matavfall med en TS på 15 % används krävs ett luftflöde på 6,1 m³/h. Dock innebär det att behandlingsskapaciteten för anläggningen minskar, eftersom en mindre mängd matavfall behandlas per behandlingslåda.

4.4 VENTILATION – DESIGN OCH STYRKA

Resultaten från dessa experiment indikerar att det vertikala ventilationssystemet (figur 4) inte kunde förse de mittersta behandlingslådorna med lika stort luftflöde som de övre och nedre behandlingslådorna. En lösning på detta skulle kunna vara att skärma av staplarna från golv och väggar, den enda vägen luften kunde ta skulle då vara genom luftspaltsbackarna. Det skulle även vara möjligt att ha flera luftinlopp på olika nivåer i skåpet, vilket skulle fördela luften bättre mellan luftspaltsbackarna. I förförsöket uppstod större materialtemperaturskillnader mellan de övre och de nedre behandlingslådorna, vilket indikerar att ett nedåtriktat luftflöde bör användas (figur 7).

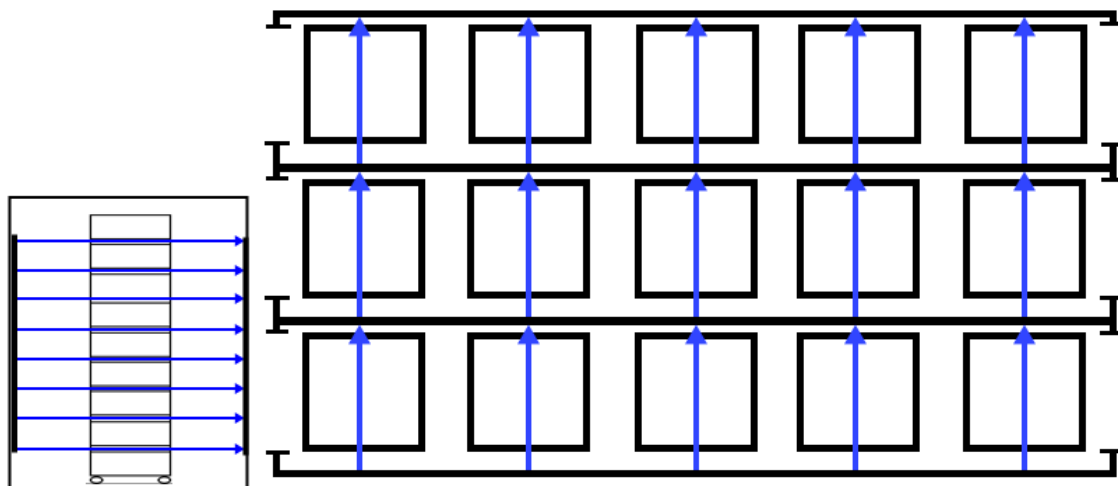
I större skala kan det vara mer lämpligt med ett horisontellt luftflöde. Ett sådant ventilationssystem bör ge upphov till mindre skillnader i relativ luftfuktighet och lufttemperatur än de signifikanta skillnader som observerades i experimenten (tabell 4). I denna typ av ventilationsdesign skulle enligt resultaten från experiment II totalt 76 m³/h per stapel behöva fördelas jämnt mellan luftspaltsbackarna, om varje behandlingsstapel har nio behandlingslådor och 15 kg matavfall med 15 % TS används. Ventilationsdesignen kan bestå av ett horisontellt luftflöde riktat genom kortsidan av luftspaltsbackarna, längs med sektionerna (figur 18). Samtliga behandlingslådor i varje sektion får då samma luftflöde. Luftflödet kan regleras mellan de olika sektionerna, så att ett högre luftflöde ges till de behandlingsstaplar som fått fler matningar. På så vis är luftflödet grovt reglerat med avseende på hur mycket material som finns i behandlingslådorna, vilket är något som påverkar luftningsbehovet.



Figur 18. Alternativ ventilationsdesign med horisontellt luftflöde längs med sektionerna i containern. De blå pilarna illustrerar luftflödets riktning och mörkare blå representerar högre och ljusare lägre relativ luftfuktighet. I vänstra hörnet illustreras luftflödet genom kortsidan på en stapel.

I ett ventilationssystem enligt figur 18 får samtliga behandlingslådor lika stort luftflöde, men den relativa luftfuktigheten är inte densamma. Luften bör bli fuktigare på vägen genom sektionen, då den strömmar genom luftspaltsbackarna och tar upp vatten som evaporerat från behandlingslådorna. Det finns en risk för att kondens bildas i de sista behandlingsstaplarna i sektionen om den relativa luftfuktigheten är för hög. Detta är något som bör undersökas inför implementering av luftflöde längs med sektionerna (figur 18).

Ett annat alternativ är att ha frånluft på ena sidan om staplarna och inluft på den andra och således föra luften genom långsidan av luftspaltsbackarna (figur 19). Luftflödet kan då regleras i detalj och således optimeras för att uppnå önskat behandlingsresultat.



Figur 19. Alternativ ventilationsdesign med horisontellt luftflöde tvärs över sektionerna i containern. Blå pilar illustrerar luftflödets riktning. I vänstra hörnet illustreras luftflödet genom långsidan på en stapel.

En ventilationsdesign enligt figur 19 bygger på att staplarna alltid placeras så att luftspaltsbackarna hamnar i luftflödet. Alternativt kan ventilationsöppningarna spridas ut jämnt över hela väggarna. Det innebär dock att en del av luften går rakt förbi staplarna vilket inte är energieffektivt. Det finns goda möjligheter att reglera luftflödena inom varje sektion med en design enligt figur 19. Ett högt luftflöde kan torka ut materialet i behandlingslådan för mycket, vilket kan minska överlevnadsgraden hos larverna. Exempelvis kan det göras antaganden om massan vatten som evaporerar mellan matningarna och utifrån data från experimenten uppskatta hur stort luftflöde som krävs vid olika tidpunkter efter matning. Det är även möjligt att reglera lufttemperatur och luftfuktighet för olika behandlingsstaplar. Risker för att torka ut materialet för mycket, eller för lite, samt risken för kondensbildning blir mindre om luftflödet kan regleras i större utsträckning.

5. SLUTSATS

Enligt resultaten av experimenten kan torrsubstansen av matavfallet reduceras med runt 60 % och runt 32 % av torrsubstansen i matavfallet kan omvandlas till larvbiomassa under behandlingstiden. Inget av experimenten uppnådde de önskade behandlingsresultaten vilket till viss del förklaras av en lägre kapacitet på ventilationen än förväntat. Resultaten visade att runt 50 % av det ursprungliga vattnet i matavfallet evaporerade under behandlingstiden. En temperatur på ingående luft på 31 °C resulterade i en materialtemperatur på 27–30 °C. Den ingående luften hade en genomsnittlig relativ luftfuktighet på 34–38 % och den utgående luften 59–67 %. Under liknande förhållanden som under dessa experiment krävs därmed ett luftflöde på runt 8 m³/h per behandlingslåda om ingående mängd matavfall är 15 kg med en TS-halt på 15 %. En högre TS-halt resulterar i ett lägre luftflöde och en mindre mängd matavfall per behandlingslåda sänker luftflödet som krävs ytterligare.

Det observerades en större gradient i materialtemperatur på olika nivåer i behandlingsstaplarna då luftflödet var uppåtriktat än när det var nedåtriktat. Således tyder resultaten på att ett nedåtriktat luftflöde är att föredra framför uppåtriktat i de fall ett vertikalt luftflöde används i ventilationsdesignen. Det observerades ingen signifikant skillnad i behandlingsresultatet i olika behandlingslådor. Detta trots att det var en signifikant skillnad i lufttemperatur, materialtemperatur och relativ luftfuktighet mellan olika behandlingslådor i en stapel. Det indikerar att det vertikala luftflödet inte försåg alla behandlingslådor med samma luftflöde. På grund av detta kan ett horisontellt luftflöde vara lämpligare i containern i vilken behandlingen ska ske.

Matavfallet som användes hade en hög vattenhalt och under experimenten kunde inte tillräckligt mycket vatten evaporera för att nå önskat behandlingsresultat. Därför kan det finnas behov av att reglera vattenhalten i matavfallet. Luftningsbehovet beror bland annat på vattenhalten i matavfallet och mängden matavfall i behandlingslådorna. Vattenhalten i matavfallet varierade och tillsätts flera gånger under behandlingen. Således kan luftflödet behöva regleras efter vattenhalten i matavfallet och var i behandlingen behandlingslådorna befinner sig.

Inför val av ventilationsdesign som kan evaporera den mängd vatten som krävs rekommenderas fortsatta studier av hur höga luftflöden påverkar behandlingen. Vidare är det av intresse att se hur högre materialtemperatur påverkar behandlingsresultatet och överlevnadsgraden av larver i ett sådant här system.

6. REFERENSER

6.1 PUBLICERADE REFERENSER

- Banks, I. J., Gibson, W. T. & Cameron, M. M. (2014). Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation. *Tropical medicine & international health: TM & IH*, 19(1), pp 14–22.
- Cheng, J. Y. K., Chiu, S. L. H. & Lo, I. M. C. (2017). Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion. *Waste Management (New York, N.Y.)*.
- Čičková, H., Newton, G. L., Lacy, R. C. & Kozánek, M. (2015). The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste Management*, 35, pp 68–80.
- Diener, S., Solano, N. M. S., Gutierrez, F. R., Zurbrugg, C. & Tockner, K. (2011a). Biological Treatment of Municipal Organic Waste using Black Soldier Fly Larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 2(4), pp 357–363.
- Diener, S., Zurbrugg, C. & Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 27(6), pp 603–610.
- Diener, S., Zurbrugg, C., Roa-Gutiérrez, F. & Tockner, K. (2011b). Black soldier fly larvae for organic waste treatment - prospects and constraints. *Proceedings of WasteSafe 2011, 2nd International Conference on Solid Waste Management in Developing Countries*, Khulna, Bangladesh, 2011. Khulna, Bangladesh. ISBN 978-984-33-2705-5.
- Dortmans, B. M. ., Diener, S., Verstappen, B. . & Zurbrugg, C. (2017). *Black Soldier Fly Biowaste Processing - A Step-by-Step Guide* [online]. Dübendorf, Switzerland: Eawag - Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Available from: http://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/BSF_Biowaste_Processing_HR.pdf. [Accessed 2017-08-14].
- Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. CRC Press. ISBN 978-0-87371-373-3.
- Jensen, C. & Johansson, M. (2014). *Uppföljning av etappmålet för ökad resurshushållning i livsmedelskedjan* [online]. Norrköping: SMED Svenska MiljöEmissionsData. (155 2014).
- Lalander, C., Diener, S., Magri, M. E., Zurbrugg, C., Lindström, A. & Vinnerås, B. (2013). Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) — From a hygiene aspect. *Science of The Total Environment*, 458, pp 312–318.
- Lalander, C. H., Fidjeland, J., Diener, S., Eriksson, S. & Vinnerås, B. (2015). High waste-to-biomass conversion and efficient *Salmonella* spp. reduction using black soldier fly for waste recycling. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), pp 261–271.
- Lalander, C., Nordberg, Å. & Vinnerås, B. (2017b). A comparison in product-value potential in four treatment strategies for food waste and faeces – assessing composting, fly larvae composting and anaerobic digestion. *GCB Bioenergy*, p n/a-n/a.

- Lalander, C., Senecal-Smith, J., Gros Calvo, M., Josefsson, S., Ahrens, L., Wiberg, K. & Vinnerås, B. (2016). Fate of pharmaceuticals and pesticides in fly larvae composting. *Science of The Total Environment*, 565, pp 279–286.
- Lardé, G. (1989). Investigation on some factors affecting larval growth in a coffee-pulp bed. *Biological Wastes*, 30(1), pp 11–19.
- Li, Q., Zheng, L., Cai, H., Garza, E., Yu, Z. & Zhou, S. (2011a). From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible. *Fuel*, 90(4), pp 1545–1548.
- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J. K. & Yu, Z. (2011b). Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 31(6), pp 1316–1320.
- Myers, H. M., Tomberlin, J. K., Lambert, B. D. & Kattes, D. (2008). Development of black soldier fly (Diptera : Stratiomyidae) larvae fed dairy manure. *Environmental Entomology*, 37(1), pp 11–15.
- Mörtstedt, S.-E. (1976). *Data och diagram*. Esselte studium. ISBN 978-91-24-26595-3.
- Newby, R. (1997). Use of Soldier Fly Larvae in Organic Waste Management. *Proceedings of Proceedings of the "Compost 97" conference*, Griffith University, Brisbane Hilton, 1997. Griffith University, Brisbane Hilton.
- Newton, G. L., Sheppard, D. C., Watson, D. W., Burtle, G. J., Dove, C. R., Tomberlin, J. K. & Thelen, E. E. (2005). The Black Soldier Fly, *Hermetia Illucens*, as a Manure Management / Resource Recovery Tool. *Proceedings of Symposium on the state of the science of Animal Manure and Waste Management*, 2005. pp 5–7.
- Nguyen, T. T. X., Tomberlin, J. K. & Vanlaerhoven, S. (2015). Ability of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae to Recycle Food Waste. *Environmental Entomology*, 44(2), pp 406–410.
- Nordling, C. & Österman, J. (2006). *Physics handbook for science and engineering*. 8:6. Lund: Studentlitteratur AB. ISBN 978-91-44-04453-8.
- Oliveira, F., Doelle, K., List, R. & O'Reilly, J. . (2015). Assessment of Diptera: Stratiomyidae, genus *Hermetia illucens* (L., 1758) using electron microscopy. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 2015(3(5)), pp 147–152.
- Paz, A. S. P., Carrejo, N. S. & Rodríguez, C. H. G. (2015). Effects of Larval Density and Feeding Rates on the Bioconversion of Vegetable Waste Using Black Soldier Fly Larvae *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae). *Waste and Biomass Valorization*, 6(6), pp 1059–1065.
- Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S. & Savastano, D. (2017). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, 140, pp 890–905 (Towards eco-efficient agriculture and food systems: selected papers addressing the global challenges for food systems, including those presented at the Conference “LCA for Feeding the planet and energy for life” (6-8 October 2015, Stresa & Milan Expo, Italy)).
- Sheppard, D. C., Newton, G. L., Thompson, S. A. & Savage, S. (1994). A value added manure management system using the black soldier fly. *Bioresource Technology*, 50(3), pp 275–279.

- Surendra, K. C., Olivier, R., Tomberlin, J. K., Jha, R. & Khanal, S. K. (2016). Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming. *Renewable Energy*, 98, pp 197–202 (Special Issue: New Horizons in Biofuels Production and Technologies).
- Tomberlin, J. K., Adler, P. H. & Myers, H. M. (2009). Development of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Temperature. *Environmental Entomology*, 38(3), pp 930–934.
- Tomberlin, J. K., Sheppard, D. C. & Joyce, J. A. (2002). Selected Life-History Traits of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) Reared on Three Artificial Diets. *Annals of the Entomological Society of America*, 95(3), pp 379–386.

6.2 INTERNETREFERENSER OCH MUNTliga REFERENSER

- Att sluta kretsloppet – en EU-handlingsplan för den cirkulära ekonomin* (2015). [online]. Bryssel: Europeiska Kommissionen. (COM/2015/0614 final).
- Biologisk återvinning*. [online] (2017) (Avfall Sverige). Tillgänglig: <http://www.avfallsverige.se/avfallshantering/biologisk-atervinning/>. [Hämtad 2017-08-19].
- Ermolaev, E., Vinnerås, B., Björk, B. & Lalander, C. [Muntlig källa] (April 2017). Detaljer kring pilotanläggningen för fluglarvskompostering i Eskilstuna.
- Lalander, C., Ermolaev, E. & Vinnerås, B. (2017a). Opublicerad data från fluglarvskomposteringsbehandling vid SLU. Uppsala.
- Ökad återvinning av matavfall*. [online] (2016) (Naturvårdsverket). Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Avfall/Atervinning-av-matavfall/>. [Hämtad 2017-08-18].

BILAGOR

A - LUFTEMPERATUR

Tabell 1. Dygnsmedelvärden av lufttemperaturen i respektive behandlingslåda samt in- och utluft i °C under experiment I.

Datum	Dag	A2	A6	A9	B2	B6	B9	C2	C6	C9	Inluft	Utluft
12-maj	0	23,1	21,7	21,4	23,3	21,3	21,3	22,9	22,0	23,0	29,3	24,7
13-maj	1	24,3	23,4	23,8	24,6	23,4	23,7	24,4	23,9	24,7	29,0	25,8
14-maj	2	24,7	24,3	24,5	24,9	24,3	24,4	24,8	24,5	25,1	28,9	26,0
15-maj	3	25,2	25,1	24,9	25,2	25,0	24,9	25,3	25,2	25,6	29,5	26,4
16-maj	4	25,4	25,1	24,8	25,2	25,0	24,8	25,5	25,1	25,6	29,8	26,5
17-maj	5	24,5	23,6	23,3	24,4	23,9	23,6	24,6	24,0	24,5	29,7	25,5
18-maj	6	26,5	25,9	25,4	26,0	25,7	25,4	26,3	25,6	26,4	30,6	27,4
19-maj	7	28,1	27,8	27,5	27,4	27,9	27,3	28,1	27,6	28,1	32,0	28,8
20-maj	8	27,8	27,7	27,8	27,0	28,0	27,6	27,8	27,9	28,0	31,5	28,4
21-maj	9	27,6	27,7	27,1	27,0	27,5	27,1	27,5	27,0	27,5	31,0	28,1
22-maj	10	27,5	27,6	27,4	26,9	27,5	27,0	26,9	26,9	27,1	30,0	27,3
23-maj	11	27,2	27,0	26,4	27,2	27,3	26,3	27,0	27,2	26,7	30,6	27,2
24-maj	12	29,6	29,6	29,2	29,1	29,6	29,0	29,3	29,2	29,3	32,3	29,6
25-maj	13	29,1	29,0	28,8	28,7	29,4	28,6	28,9	28,8	28,9	31,1	29,0
26-maj	14	28,4	28,4	28,1	28,1	28,6	28,0	28,2	28,0	28,3	31,4	28,8
27-maj	15	30,5	30,3	30,1	30,3	30,1	29,8	30,1	30,1	30,1	33,9	30,9
28-maj	16	30,1	29,8	29,5	30,2	29,8	29,1	29,6	29,5	29,5	32,4	30,0
29-maj	17	28,6	28,1	28,0	29,4	28,0	27,4	28,0	27,9	27,5	31,5	28,3
30-maj	18	29,0	28,3	27,9	30,6	27,6	27,4	27,6	27,1	27,1	31,9	27,9

Tabell 2. Dygnsmedelvärden av lufttemperaturen i respektive behandlingslåda samt in- och utluft i °C under experiment II.

Datum	Dag	A2	A6	A9	B2	B6	B9	C2	C6	C9	Inluft	Utluft
12-jun	0	25,9	25,2	24,5	26,0	25,1	24,4	25,9	25,8	24,5	29,3	25,4
13-jun	1	25,3	24,3	23,8	25,3	24,2	23,7	25,4	25,5	23,9	30,0	25,5
14-jun	2	27,7	26,9	26,3	27,6	26,6	26,3	27,8	28,0	26,2	32,4	27,9
15-jun	3	29,1	28,5	28,1	28,8	28,3	28,3	28,7	29,1	27,6	32,2	28,8
16-jun	4	28,5	28,4	27,6	29,3	28,6	28,1	28,7	29,1	27,9	31,4	28,4
17-jun	5	29,3	29,5	28,8	28,6	29,2	28,5	28,9	29,5	28,4	31,5	29,0
18-jun	6	31,1	31,8	30,7	30,9	31,4	30,2	30,7	30,9	29,8	31,4	29,7
19-jun	7	31,1	32,0	31,0	31,0	31,4	30,4	30,7	30,9	30,1	31,7	29,7
20-jun	8	29,2	29,3	28,7	29,5	28,9	28,3	28,5	28,9	27,9	30,2	27,7
21-jun	9	27,5	27,2	26,7	27,7	26,8	26,5	26,9	27,1	26,4	29,8	26,9
22-jun	10	29,3	29,9	28,9	29,8	28,9	28,9	28,8	29,1	28,6	29,9	28,6
23-jun	11	29,8	30,3	29,6	30,4	29,5	29,5	29,4	29,8	29,4	30,9	29,5
24-jun	12	29,4	29,8	29,2	30,2	29,1	29,3	28,9	29,5	28,9	30,3	28,9
25-jun	13	28,6	28,6	28,2	29,2	28,0	28,2	28,1	28,6	28,1	29,7	28,2
26-jun	14	28,9	28,5	28,2	29,0	28,1	28,4	28,2	28,7	28,1	30,2	28,2

B – RELATIV LUFTFUKTIGHET

Tabell 3. Dygnsmedelvärden av den relativa luftfuktigheten i respektive behandlingslåda samt in- och utluft i % under experiment I.

Datum	Dag	A2	A6	A9	B2	B6	B9	C2	C6	C9	Inluft	Utluft
12-maj	0	49,3	64,3	59,0	51,3	59,3	58,8	49,1	57,0	48,4	33,9	44,7
13-maj	1	45,6	59,6	52,4	48,1	57,3	52,6	44,9	54,8	44,7	30,9	41,5
14-maj	2	49,3	61,7	53,7	52,3	61,6	55,1	49,0	59,0	48,3	34,6	45,3
15-maj	3	52,1	66,4	57,0	56,0	63,4	58,3	52,1	60,9	50,9	37,0	48,1
16-maj	4	45,1	55,1	53,5	50,0	53,0	52,3	44,4	55,6	43,9	29,4	40,9
17-maj	5	52,5	65,3	61,0	55,4	62,3	61,3	51,9	62,1	52,3	36,5	48,6
18-maj	6	57,7	77,8	61,8	62,3	73,9	64,1	56,0	66,4	57,3	39,6	52,3
19-maj	7	55,1	76,2	58,7	62,2	72,3	57,1	53,4	63,3	55,4	37,0	51,1
20-maj	8	55,7	71,4	57,1	67,2	79,0	52,4	54,0	62,8	55,5	35,4	49,9
21-maj	9	51,5	76,7	53,1	60,0	76,6	51,3	49,6	60,5	52,0	32,1	46,3
22-maj	10	54,0	77,3	58,8	63,2	76,0	57,7	52,2	61,3	53,8	33,0	48,8
23-maj	11	53,0	60,8	55,9	60,0	75,8	53,7	49,9	62,1	50,3	31,7	47,3
24-maj	12	54,7	52,7	52,5	64,6	74,8	49,5	53,9	62,7	50,6	31,0	48,1
25-maj	13	57,4	53,0	52,8	68,9	75,0	50,8	57,4	63,6	51,0	32,7	50,1
26-maj	14	56,2	53,0	52,5	64,7	76,4	51,0	55,3	62,4	50,9	32,2	48,9
27-maj	15	58,4	59,4	56,8	66,1	75,6	56,4	56,6	63,3	53,3	33,5	51,9
28-maj	16	62,5	64,5	60,3	68,7	82,1	65,2	62,2	66,5	57,9	37,5	61,1
29-maj	17	57,4	76,2	56,8	60,6	79,2	59,2	55,7	59,1	54,6	33,1	53,9
30-maj	18	63,7	88,7	66,4	59,4	88,7	78,6	61,1	67,9	60,8	37,3	61,7

Tabell 4. Dygnsmedelvärden av den relativa luftfuktigheten i respektive behandlingslåda samt in- och utluft I % under experiment II.

Datum	Dag	A2	A6	A9	B2	B6	B9	C2	C6	C9	Inluft	Utluft
12-jun	0	52,8	67,9	61,0	53,1	63,2	61,6	52,0	52,3	56,3	41,7	54,4
13-jun	1	54,5	81,3	70,9	56,6	78,4	65,3	53,5	53,8	62,6	37,2	53,1
14-jun	2	50,0	73,6	63,9	52,9	67,5	56,8	48,6	48,8	59,1	32,8	47,5
15-jun	3	57,0	82,8	70,3	60,2	74,6	64,8	57,5	55,6	63,8	40,0	58,1
16-jun	4	59,3	79,3	67,1	62,7	74,4	67,2	58,6	59,2	59,1	41,6	61,7
17-jun	5	58,2	81,3	74,0	65,6	72,3	77,6	60,5	58,0	58,8	40,4	57,8
18-jun	6	59,3	83,3	71,6	69,6	76,8	75,1	63,9	62,5	59,1	39,0	57,1
19-jun	7	57,6	86,0	72,7	68,2	79,8	81,7	62,4	61,4	57,9	36,4	56,2
20-jun	8	59,1	86,5	82,4	70,0	82,2	93,0	66,3	61,5	59,7	38,8	68,5
21-jun	9	55,1	78,5	73,3	60,7	68,8	73,6	57,3	57,2	56,9	34,2	55,2
22-jun	10	63,5	86,9	75,2	57,7	63,5	73,1	59,9	67,3	56,6	35,4	56,4
23-jun	11	60,8	87,2	79,4	58,8	68,0	83,2	61,1	71,2	59,8	37,3	66,5
24-jun	12	66,7	90,1	81,4	62,8	71,7	90,9	65,6	77,8	66,7	43,4	80,1
25-jun	13	58,7	85,9	73,8	57,6	65,8	81,8	59,7	73,0	60,4	38,3	68,4
26-jun	14	59,5	86,2	75,4	59,4	67,6	86,0	61,0	72,0	61,6	40,2	75,5

C – MATERIALTEMPERATUR

Tabell 5. Dygnsmedelvärden av temperaturen i materialet i respektive behandlingslåda i °C under experiment I.

Datum	Dag	A2	A6	A9	B2	B6	B9	C2	C6	C9
15-maj	3	24,2	25,4	24,8	25,0	24,7	25,4	24,8	24,8	25,2
16-maj	4	24,1	24,5	24,4	24,8	24,0	25,0	24,0	24,2	24,8
17-maj	5	23,0	22,4	23,1	23,2	22,9	23,4	23,2	23,1	23,6
18-maj	6	24,7	25,3	24,7	25,3	25,0	25,5	24,8	24,9	26,1
19-maj	7	26,7	27,7	26,9	27,4	27,4	27,0	26,8	27,6	28,0
20-maj	8	27,1	26,8	27,7	27,0	28,4	27,4	27,2	28,3	27,8
21-maj	9	27,6	28,3	25,9	26,8	27,0	26,6	26,2	27,4	27,7
22-maj	10	28,6	28,3	28,1	27,7	27,7	27,9	26,6	26,5	27,3
23-maj	11	26,4	26,4	26,1	27,2	27,6	26,3	27,0	27,5	26,5
24-maj	12	30,3	29,5	29,4	30,3	30,1	29,3	29,1	29,3	29,6
25-maj	13	29,8	28,9	28,9	30,4	29,8	29,1	29,0	28,7	29,0
26-maj	14	29,3	28,1	28,2	29,3	29,1	28,5	28,1	28,4	28,3
27-maj	15	31,1	30,1	30,1	31,0	30,5	29,9	29,8	30,4	30,0
28-maj	16	31,3	29,8	29,7	30,8	30,3	29,6	29,9	29,6	29,7
29-maj	17	30,0	28,4	28,0	28,9	28,3	27,6	28,2	27,5	27,4
30-maj	18	30,6	28,6	28,1	29,1	28,0	27,8	27,9	27,0	27,0

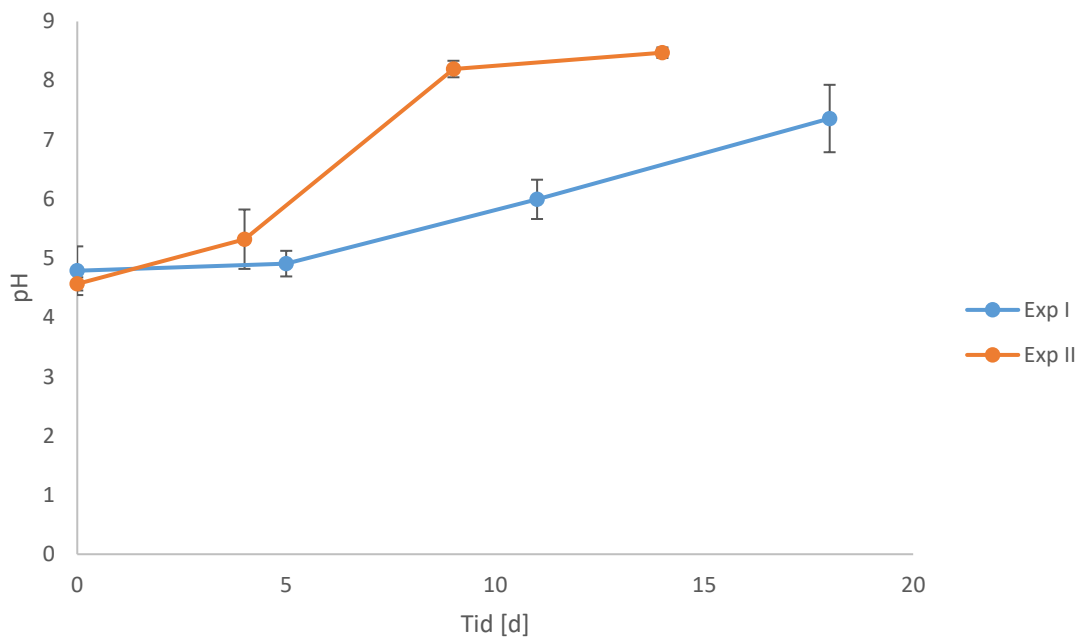
Tabell 6. Dygnsmedelvärden av temperaturen i materialet i respektive behandlingslåda i °C under experiment II.

Datum	Dag	A2	A6	A9	B2	B6	B9	C2	C6	C9
12-jun	1	24,0	23,7	23,8	24,3	23,8	23,5	24,4	24,6	23,9
13-jun	2	25,8	25,4	25,1	25,9	25,1	25,0	25,5	26,1	25,1
14-jun	3	30,4	30,8	27,0	31,0	30,5	31,6	30,9	29,0	29,3
15-jun	4	27,6	28,3	25,9	29,9	28,7	27,8	27,9	29,2	27,1
16-jun	5	29,4	30,0	29,5	30,0	29,7	29,1	28,8	29,8	28,1
17-jun	6	32,3	32,7	30,6	31,5	32,7	30,9	31,3	30,7	30,3
18-jun	7	32,8	33,6	31,0	32,0	32,2	30,7	31,2	31,3	30,9
19-jun	8	30,9	30,9	29,0	29,5	30,1	29,3	29,8	29,6	28,8
20-jun	9	28,4	27,8	27,0	27,4	26,9	27,6	27,4	27,4	26,8
21-jun	10	31,3	31,0	29,7	30,9	30,2	30,2	30,2	30,0	28,8
22-jun	11	31,7	31,6	30,3	31,4	30,9	31,0	30,4	30,8	29,7
23-jun	12	31,2	31,2	30,2	31,3	30,6	30,7	30,3	30,6	29,4
24-jun	13	30,4	29,8	29,0	30,0	29,4	29,6	29,2	29,7	28,5
25-jun	14	30,8	29,5	29,1	30,5	29,4	29,9	29,7	29,7	28,4

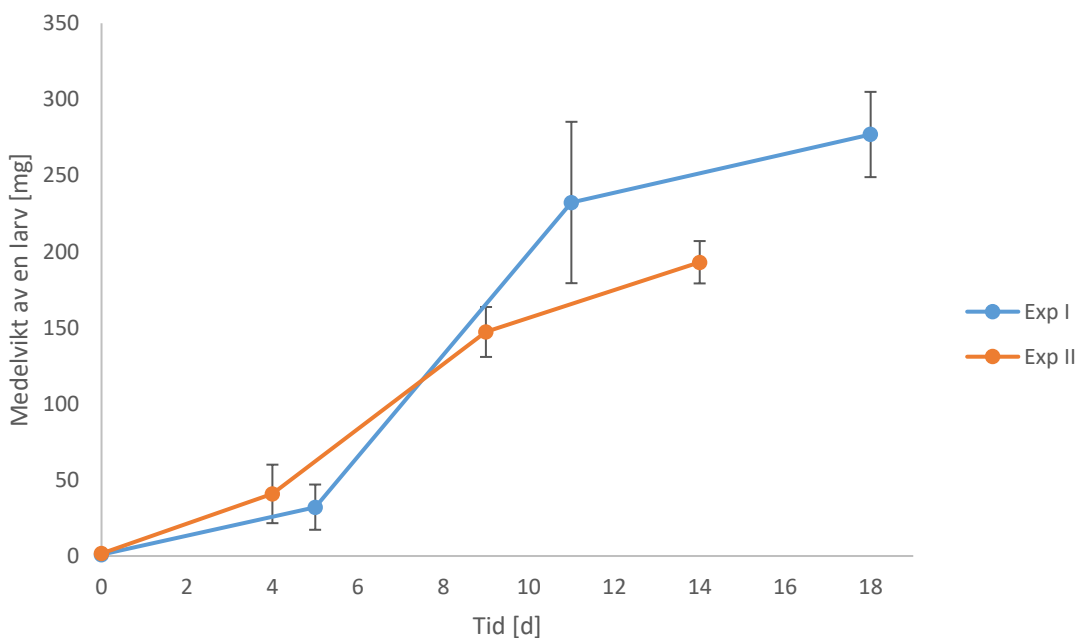
D – DATA FRÅN PROVTAGNING

Tabell 7. Andelen TS och VS samt standardavvikelse (SD) i behandlingsresten sista dagen av experiment I respektive II i de provtagna behandlingslådorna 1, 2, 6 och 9 i stapel A, B samt C. Det är ingen signifikant skillnad mellan behandlingslådorna i TS eller VS inom varje experiment.

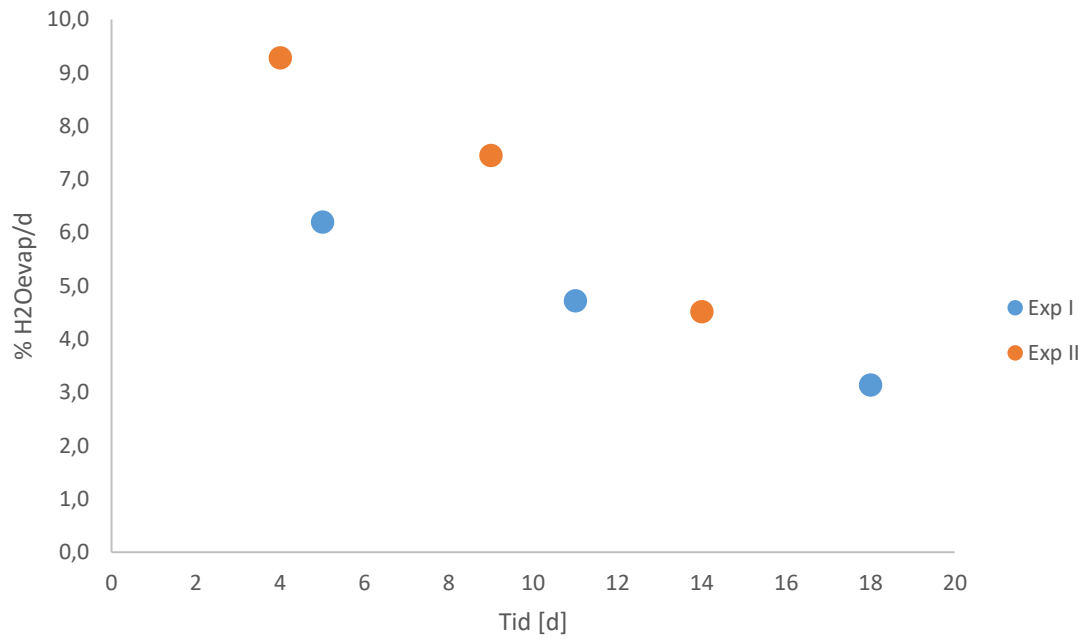
	Experiment I				Experiment II			
	TS	SD	VS	SD	TS	SD	VS	SD
A1	18,0	1,37	78,3	2,49	21,9	0,372	80,7	0,904
A2	23,6	1,11	82,2	1,72	22,5	0,161	81,3	1,05
A6	18,0	2,13	76,7	3,70	19,6	0,864	78,6	4,22
A9	15,2	0,97	80,8	1,17	19,5	0,620	81,2	1,11
B1	30,3	1,33	81,4	0,433	26,8	0,241	78,4	0,931
B2	15,7	0,139	82,0	1,09	23,4	0,714	76,5	3,12
B6	12,8	0,715	79,7	2,13	18,0	0,344	82,3	1,25
B9	14,2	0,338	79,1	2,46	21,4	0,361	79,8	1,47
C1	16,1	1,20	81,1	1,12	19,7	0,601	82,6	1,52
C2	15,9	1,21	78,3	3,34	21,5	1,12	79,1	2,77
C6	13,9	0,545	81,3	0,734	23,0	1,16	74,6	1,61
C9	16,7	1,82	77,2	5,08	20,4	0,330	81,9	0,528



Figur 1. Förändringen i pH under experiment I (blå) samt II (orange) samt standardavvikelse. pH dag 0 är genomsnittliga pH-värdet i ingående matavfall baserat på samtliga matningar. Dag 5, 11 och 18 är genomsnittliga pH-värdet i de 12 provtagna behandlingslådorna.



Figur 2. Förändringen i medelvikten per larv i mg under experiment I (blå) samt II (orange) samt standardavvikelse. Dag 5, 11 och 18 är den genomsnittliga medelvikten i de 12 provtagna behandlingslådorna.



Figur 3. Den genomsnittliga, procentuella, evaporationen per dag under experiment I (blå) respektive II (orange). Värdena är baserade på massan vatten som lämnat behandlingslådorna mellan matningarna, för det sista värdet mellan matning och behandlingslut.