



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Livsløpsvurdering av tomatproduksjon i Norge

- Hvordan vil klima- og miljøpåvirkninger endres ved bruk av biogassressurser?

Life cycle assessment of tomato production in Norway

- How will climate and environmental impacts change when using biogas resources?

Hanna Gjessing

Fornybar energi

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på den toårige masteren i Fornybar energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven er gjennomført som del av prosjektet Bærekraftig Biogass der Greve Biogass er prosjekteier og Østfoldforskning er prosjektleder. Det er her inspirasjonen til problemstillingen er hentet fra.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min hovedveileder Professor Ole Jørgen Hanssen som gjennom hele semesteret har bidratt med konstruktive tilbakemeldinger og god veiledning i arbeidet. I tillegg ønsker jeg å takke de ansatte i Østfoldforskning, spesielt Simon Saxegård, for bidrag til kunnskap og data om fagområdet. En stor takk rettes også til Grønt Skifte AS, BBBL Solutions AS, Norsk Gartnerforbund og Greve Biogass som har bidratt med viktige data og innføring i hvordan produksjonen foregår i praksis.

Til slutt ønsker jeg å takke familie og venner som har bidratt med motivasjon og støtte gjennom prosessen. En spesielt stor takk rettes til Charlotte Fagnæs for oppmuntrende ord og korrekturlesing av oppgaven.

Ås, 12.05.2018

Hanna Gjessing

Sammendrag

Produksjon av biogass gir energi i form av biogass og et næringsrikt gjødselprodukt i form av biogjødsel. I tillegg arbeides det med å finne aktuelle bruksområder for CO₂, som er et biprodukt fra oppgraderingen av biogass til drivstoffkvalitet. Et pilotveksthus er nå under oppføring i Tønsberg. Her vil det gjøres forsøk på å bruke CO₂ fra biogassproduksjonen i veksthuset der det skal dyrkes tomater. I tillegg har biogass og biogjødsel egenskaper som gjør at de kan fungere som substitutt for fossile innsatsfaktorer i tradisjonell veksthusproduksjon. I denne masteroppgaven vil jeg ta for meg hvordan klima- og miljøpåvirkninger endres ved å gå fra et tradisjonelt dyrkingssystem for tomater i veksthus til et system der biogassressurser utnyttes i størst mulig grad. I tillegg vil tekniske valg i veksthusbygningen analyseres.

Det tradisjonelle systemet for tomatproduksjon er i denne oppgaven basert på utnyttelse av naturgass, mineralgjødsel og fossil CO₂ som innsatsfaktorer. I den biogassbaserte produksjonen vil biogass erstatte naturgass, flytende fraksjon av avvannet biogjødsel vil dekke nitrogenbehovet og fossil CO₂ vil erstattes av biogen CO₂. Analysene er gjennomført i henhold til metodikken for livsløpsanalyser. Gjennomføringen av analysene er gjort ved hjelp av dataverktøyet SimaPro med tilhørende databaser. For å danne et sammenligningsgrunnlag mellom de fossile innsatsfaktorene og de biogassbaserte innsatsfaktorene er det foretatt en allokering av utslippene fra biogassproduksjonen. Allokeringen er gjort med hensyn på massefordelingen av tørrstoffet mellom biogass, CO₂ og biogjødsel.

Resultatene fra analysene viser at sesongbasert produksjon har et forholdsvis lavt utslipp av klimagasser knyttet til bygningen. Utslippene fra produksjonen er derimot betydelig høyere, hovedsakelig på grunn av oppvarming. For helårsproduksjon utgjør veksthusbygningen en lavere andel av utslippene på grunn av en høyere årlig produksjon. Da elektrisitet dekker en del av behovet for oppvarming er klimagassutslippene fra driftsfasen lavere enn de er for sesongproduksjon. Ved produksjon i BBBL pilotveksthuset er klimagassutslippene fra bygningen vesentlig høyere enn de er ved de to andre produksjonsformene. Dette forklares i stor grad av lokale grunnforhold som gjorde at forbruket av stål og armert betong ble høyere enn det vil bli i framtidige veksthus av denne typen. De lave utslippene knyttet til driftsfasen gjør allikevel at dette systemet gir lavere akkumulerte utslipp enn begge de to alternative systemene over tid. I løpet av det syvende driftsåret er utslippene fra BBBL systemet lavere enn begge alternativene når biogassbaserte ressurser brukes i produksjonen.

Abstract

Biogas production is an effective treatment method for organic waste. It produces energy in terms of biogas and a nutritious fertilizer in terms of digestate. In addition, possible relevant uses for CO₂ are studied. CO₂ is a byproduct from the upgrading process of biogas to fuel quality. A pilot greenhouse is now under construction in Tønsberg. Here they will try to use this CO₂ in the greenhouse where tomatoes will be grown. Biogas and digestate also have properties that enable them to function as a substitute for fossil resources in traditional greenhouse production. In this master thesis I will assess how environmental impacts change when traditional resources are substituted by resources from biogas production. Technical choices related to the greenhouse building will also be assessed.

The traditional cultivation system for tomato production is based on utilizing natural gas, mineral fertilizer and fossil CO₂ as inputs. In the production based on biogas resources, biogas will replace natural gas, liquid fraction of digestate after dewatering will cover the nitrogen demand and fossil CO₂ will be replaced by biogenic CO₂. The analyses were done according to the methodology of life cycle assessments. The assessments are done using SimaPro and associated databases. To make a basis for comparison between the fossil inputs and the biogas-based inputs, an allocation of emissions from biogas production has been made. The allocation has been made based on the mass distribution of dry matter content between biogas, CO₂ and digestate.

The results indicate that seasonal production has a relatively low emission of greenhouse gases caused by the building. Emissions associated with the production phase, on the other hand, are significantly higher. For full-year production, the building makes up a lower proportion of the emissions due to a higher yield. As electricity covers a part of the heating demand, greenhouse gas emissions from the production phase are lower than they are for seasonal production. When producing in the BBLS pilot greenhouse, greenhouse gas emissions from the building are significantly higher than they are in the other two production systems. A part of the difference is explained by local conditions, which demanded an extended use of steel and reinforced concrete. However, the low emissions associated with the production phase gives this system lower cumulative emissions than both of the alternative systems.

Figurliste

Figur 1: Skisse over hovedsystemet for ressursene fra biogassproduksjonen	14
Figur 2: Innsatsfaktorer og utslipp som er inkludert i analysen av tomatproduksjon.	15
Figur 3: Klimagassutslipp per kWh energi produsert ved forbrenning av biogass og naturgass	32
Figur 4: Klimagassutslipp knyttet til gjødsel, beregnet per kilo nitrogen.	32
Figur 5: Klimagassutslipp knyttet til bruk av biogen og fossil CO ₂ per kg CO ₂	33
Figur 6: Totale klimagassutslipp ved produksjon av ett tonn tomat ved sesongproduksjon ..	34
Figur 7: Bidrag til forsuring ved produksjon av ett tonn tomat ved sesongproduksjon.	35
Figur 8: Bidrag til eutrofiering ved produksjon av ett tonn tomat ved sesongproduksjon.	36
Figur 9: Bidrag til klimagassutslipp ved produksjon av ett tonn tomat ved helårsproduksjon.	37
Figur 10: Bidrag til klimagassutslipp ved produksjon av ett tonn tomat ved helårsproduksjon.	37
Figur 11: Bidrag til eutrofiering fra produksjon av ett tonn tomat ved helårsproduksjon.	38
Figur 12: Klimagassutslipp per kvadratmeter veksthus når kun materialforbruket ved konstruksjonen er analysert per år av levetiden til materialene.	39
Figur 13: Klimagassutslipp ved ulik produktivitet i BBLS veksthuset per tonn tomat produsert.	40
Figur 14: Samlede akkumulerte utslipp fra de ulike produksjonssystemene over tid. Startpunktet på y-aksen tilsvarer utslipp fra veksthuskonstruksjonen delt på forventet produksjon.	41
Figur 15: Akkumulerte utslipp ved bruk av biogassbaserte ressurser som innsatsfaktorer. Startpunktet på y-aksen tilsvarer utslipp fra veksthuskonstruksjonen delt på forventet produksjon.	42

Tabelliste

Tabell 1: Forutsetninger for energiinnhold og tetthet for biogass og karbondioksid	20
Tabell 2: Fordeling av TS-innhold mellom produktene etter oppgradering og allokeringsnøkler for to ulike allokeringer.	21
Tabell 3: Produktene fra utråtningen av ett tonn TS ved DMF.....	21
Tabell 4: Fordeling av klima- og miljøpåvirkninger mellom de ulike produktene ved en masseallokering.....	22
Tabell 5: Alternativ allokering basert på en teoretisk økonomisk verdi av produktene.	22
Tabell 6: Innsatsfaktorer ved sesongproduksjon av ett tonn tomat. Forbruk per m ² er for ett år/en sesong med produksjon.	24
Tabell 7: Innsatsfaktorer ved helårsproduksjon av ett tonn tomat.....	25
Tabell 8: Antagelser knyttet til driften av BBLS pilotveksthuset.....	27
Tabell 9: Materialforbruk og levetid for et eksempel på en tradisjonell veksthusbygning (Verheul & Thorsen 2010).	28
Tabell 10: Materialforbruk og levetid for BBLS konstruksjonen.....	29
Tabell 11: Mengde innsatsfaktorer nødvendig for å dekke ressursbehovet til ett tonn tomat.	30
Tabell 12: Årlig produksjon av tomater i Norge gitt i tonn.	30
Tabell 13: Klimagassutslipp knyttet til transport av biogass ved transport på lastebil.	44
Tabell 14: Klimagassutslipp knyttet til transport av biogjødsel med Euro 5 lastebil.	44

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	III
Figurliste	IV
Tabelliste	V
1. Innledning	1
2. Problemstilling og forskningsspørsmål	3
2.1 Problemstilling	3
2.2 Forskningsspørsmål	3
2.3 Forutsetninger	4
3. Bakgrunn	5
3.1 Veksthusproduksjon i Norge	5
3.2 Biogassproduksjon	8
4. Metodikk	11
4.1 Valg av metode	11
4.2 Livsløpsanalyse	11
4.3 Valg av dataverktøy	13
4.3.1 SimaPro	13
4.3.2 Organic Waste Substrate Treatment Tool	13
4.4 Hensikt og omfang for det analyserte systemet	13
4.4.1 Funksjonell enhet og referansestrøm	13
4.4.2 Systemgrenser	14
4.5 Valg av påvirkningsindikatorer og metode i SimaPro	15
4.6 Karbon med biologisk opprinnelse	16
4.7 Allokering	17
5. Systembeskrivelse og datagrunnlag for analysene	19
5.1 Den magiske fabrikken	19
5.2 Ressursbruk i veksthus	23
5.2.1 Alternativt produksjonssystem 1: Sesongbasert produksjon	23
5.2.2 Alternativt produksjonssystem 2: Helårsproduksjon	24
5.2.3 Alternativt produksjonssystem 3: BBLS produksjon	26
5.3 Veksthusbygning	28

5.3.1	Tradisjonelt veksthus i glass	28
5.3.2	BBBLS pilotveksthus	28
5.4	Data for oppskalering	30
5.4.1	Transport	30
5.4.2	Samlet norsk tomatproduksjon.....	30
6.	Resultater	31
6.1	Forskningsspørsmål 1	31
6.1.1	Klimagassutslipp for hver av innsatsfaktorene	31
6.1.2	Resultater for sesongproduksjon	33
6.1.3	Resultater for helårsproduksjon	36
6.2	Forskningsspørsmål 2	39
6.2.1	Utslipp per kvadratmeter veksthus.....	39
6.2.2	Bidrag til utslipp fra ulike innsatsfaktorer	40
6.2.3	Veksthusbygningen og innsatsfaktorer over tid	41
6.3	Forskningsspørsmål 3	43
6.3.1	Transport	43
6.3.2	Energiforbruk.....	45
7.	Diskusjon	46
7.1	Tolkning og diskusjon av resultater	46
7.2	Robusthet i datagrunnlag og beregninger	48
7.3	Realistisk anvendelse av resultatene.....	49
8.	Konklusjon.....	51
9.	Videre arbeid.....	52
10.	Referanser	53

1. Innledning

Gjennom Parisavtalen, som trådte i kraft i november 2016, har Norge forpliktet seg til å redusere klimagassutslippene med 40 % innen 2030, sammenlignet med 1990 nivå (Regeringen 2016). For å nå dette målet må det gjøres kraftige kutt i en rekke sektorer. I tillegg bør ressursbruken optimaliseres gjennom blant annet økt bruk av produkter som i dag regnes som avfall eller biprodukter. Biologiske avfallsprodukter inneholder en rekke næringsstoffer som gjennom biogassproduksjon kan resirkuleres og bli gjødsel for ny matproduksjon. Resirkulering av næringsstoffer bidrar til at færre jomfruelige ressurser må hentes ut av naturen og gir dermed en redusert miljøpåvirkning.

Klima- og miljødepartementet har utviklet en nasjonal tverrsektoriell biogasstrategi der det slås fast at produksjon og bruk av biogass vil være et viktig bidrag til reduksjoner i klimagassutslipp fram mot målene for 2020 (Klima- og miljødepartementet 2014). I dag brukes biogass hovedsakelig som substitutt for fossil energi i transportsektoren og biogjødsel brukes som gjødselprodukt i landbruket. Ved en ytterligere økning av produksjonen kan det bidra til å redusere klimagassutslippene i andre sektorer som eksempelvis veksthusproduksjon. Norsk veksthusproduksjon er stadig økende og har vært utsatt for stort press når det gjelder utslipp av klimagasser. Produksjonen av veksthusprodukter i Norge er energikrevende og forholdsvis kostbar. Dette kommer av det kjølige klimaet, som gir et økt behov for infrastruktur og oppvarming. Tomater er varmekjære vekster og trives best ved forholdsvis høye temperaturer. En tradisjonell tomatproduksjon krever derfor betydelige mengder energi til oppvarming. Ved bruk av fossile energibærere gir det i neste rekke utslag i de totale klimagassutslippene per kilo produkt produsert (ZERO 2009).

I dag er det en rekke prosjekter som arbeider med løsninger for å kunne bruke veksthusproduksjon som del av et karbonnøytralt system. Avfallsbasert råstoff i form av produkter fra biogassproduksjon eller kompost inngår som innsatsfaktorer i produksjonen. Et prosjekt som arbeider med dette er Food to waste to food, der Lindum AS og BBBL Solution AS er to av samarbeidspartnerne. Prosjektet skal illustrere hvordan et lukket kretsløp fra organisk avfall kan dekke behovet for energi, vann, gjødsel og karbondioksid i veksthuset (Eco-innovation 2012).

Til tross for at det arbeides med nye innovative løsninger dyrkes fortsatt majoriteten av veksthusprodukter i tradisjonelle veksthus. For å redusere klimagassutslippene til disse produsentene må alternative energikilder vurderes. Ettersom produktene fra biogassproduksjonen kan dekke store deler av behovet for innsatsfaktorer i veksthusproduksjon er det interessant å se hvordan dette vil endre klima- og miljøpåvirkningene. Med utgangspunkt i ressursene som produseres ved biogassanlegget Den Magiske Fabrikken vil denne masteroppgaven undersøke miljøpåvirkningene ved ulike produksjonssystemer for dyrking av tomat i veksthus. Gjennom oppgaven vil to mulige fordelingsprinsipper mellom de tre produktene man får fra biogassproduksjonen illustreres. Produktene som produseres ved Den Magiske Fabrikken er i dag energi med biogass som energibærer og biogjødsel. På sikt kan trolig også CO₂-gass fra oppgraderingsprosessen av biogass brukes i større grad. CO₂ er derfor regnet som et produkt fra produksjonen. Oppgaven vil også undersøke mulighetene for oppskalering og utvidet bruk av ressurser fra biogassanlegg i norsk veksthusnæring, som vil inkludere transport og salg av biogass og biogjødsel til eksterne kunder.

Oppgaven vil bygges opp slik at problemstilling og forskningsspørsmål presenteres i kapittel 2, før bakgrunnskunnskap knyttet til veksthus- og biogassproduksjon vil bli gjennomgått i kapittel 3. Deretter følger kapittel 4 der det vil bli redegjort for metodiske tilnærminger. Systembeskrivelser og data presenteres i kapittel 5 og resultater i kapittel 6. Resultatene og usikkerhet knyttet til metodiske tilnærminger blir deretter diskutert i kapittel 7, før oppgaven avsluttes med en konklusjon i kapittel 8.

2. Problemstilling og forskningsspørsmål

2.1 Problemstilling

Hovedproblemstillingen i oppgaven favner vidt og er derfor brutt ned i et sett av mer konkrete forskningsspørsmål. En bred problemstilling har gitt mulighet til å undersøke en rekke aspekter ved det valgte temaet. Problemstillingen som skal undersøkes er som følger:

Hvordan vil netto klima- og miljøpåvirkning endres ved å gå fra et tradisjonelt dyrkingssystem for tomat i veksthus i Norge, til et system der biogassressurser utnyttes i størst mulig grad, og hvordan påvirker tekniske valg knyttet til selve veksthusbygningen miljøregnskapet?

2.2 Forskningsspørsmål

- Skifte i ressursbruk: Hvordan vil klima- og miljøpåvirkningene fra veksthusproduksjon endres dersom biogass, biogjødsel og CO₂ brukes framfor de tradisjonelle innsatsfaktorene i veksthus med sesong- eller helårsproduksjon av tomater?
- Skifte av infrastruktur: Hvordan vil ressursbruk og klimapåvirkninger endres dersom produksjonen av tomater foregår i et semilukket veksthus framfor i et tradisjonelt veksthus, der materialforbruk og konstruksjon av veksthuset inkluderes i analysen?
- Oppskalering: Hvilken påvirkning har transportavstand mellom biogassanlegget og veksthuset på klimanytten ved å bruke biogassbaserte ressurser fremfor fossile og i hvilken grad vil oppvarmingsbehovet til norsk tomatproduksjon kunne dekkes gjennom bruk av biogass?

2.3 Forutsetninger

Studiet vil ta for seg klima- og miljøpåvirkninger knyttet til ressursbruken som dekker plantenes behov for oppvarming, belysning, gjødsel og tilførsel av CO₂. I tillegg vil det gjøres en analyse av to ulike veksthuskonstruksjoner.

Med klima- og miljøpåvirkning menes i denne oppgaven utslipp omfattet av påvirkningsindikatorene global oppvarming, forsuring og eutrofiering. Utslipp knyttet til produksjon og bruksfase er inkludert for oppvarming og CO₂ gjødsling. På grunn av et manglende datagrunnlag er utslipp fra bruksfasen til gjødselproduktene utelatt i analysen. Det vil si at kun utslipp fra produksjonen er inkludert. Produktene fra biogassproduksjonen omtales i denne oppgaven som biogassressurser når de inngår som innsatsfaktorer i veksthusproduksjonen.

Utgangspunktet for biogassressursene er hentet fra biogassanlegget Den Magiske Fabrikken (DMF) i Tønsberg. Det betyr at det er spesifikke data fra dette anlegget som danner analysegrunnlaget. Analysen vil derfor ikke gjelde på generell basis for all biogassproduksjon, men resultatene vil kunne gi en indikasjon på hvor de største bidragene til utslipp kommer fra.

Analysene tar utgangspunkt i et sett av forutsetninger for hvordan dyrkingen av tomater foregår og en forventning om produksjon ved de forutsetningene. Det har ikke vært mulig å undersøke faktiske sammenhenger mellom produktivitet og tilførsel av ulike innsatsfaktorer. Data for BBBLS veksthuset er basert på et pilotveksthus og sier derfor ikke direkte noe om hva utslippene knyttet til en fullskala bygning av samme type vil være.

3. Bakgrunn

3.1 Veksthusproduksjon i Norge

Norsk veksthusproduksjon er stadig økende både i areal og produktivitet. I 2017 var det registrert 347 veksthusprodusenter der 266 av veksthusene var over 500 m² (Hanssen & Stensgård 2018). Produksjonen omfatter potteplanter, grønnsaker, blomster og noe bær. Det totale veksthusarealet var i 2006 på 2022 dekar, som er en økning fra 1999. Det er hovedsakelig arealet til produksjon av grønnsaker og bær som har økt (Statistisk sentralbyrå 2008)

De viktigste innsatsfaktorene i norsk veksthusproduksjon er energi til oppvarming og belysning. Den totale energibruken i norske veksthus er i dag omtrent 850 GWh, hvorav 73 % av dette er basert på elektrisitet eller bioenergi. De resterende 27 % stammer fra fossil energi. Fossil energi utgjør dermed 232 GWh av totalforbruket (Huso et al. 2018). Det er dette forbruket som på sikt bør byttes ut med fornybare energibærere.

I 2010 gjennomførte daværende Bioforsk en rekke livsløpsanalyser av veksthusprodukter, blant annet produksjon av tomater. Resultatene viste at klimagassutslippet fra produksjon av 1 kg tomat varierte fra 3,79 til 5,82 kg CO₂-ekvivalenter (ekv.) for veksthusene som ble analysert. Bruk av naturgass og propan til oppvarming og CO₂ gjødsling stod i gjennomsnitt for 93 % av klimagassutslippene. Elektrisitet bidro til 1 % av utslippene, det samme gjaldt emballasje. Bygging av selve veksthuset og annet produksjonsmaterieell utgjorde 2 % av utslippene (Verheul & Thorsen 2010). Livsløpsanalyser av tomatproduksjon i Iran viser også at produksjon og forbrenning av naturgass gir det største bidraget til utslipp per tonn tomat for en rekke av de analyserte påvirkningskategoriene, blant annet global oppvarming, forsuring og eutrofiering (Zarei et al. 2017).

Tilførsel av CO₂ har en positiv effekt på planteveksten. Dette skyldes at CO₂ er utgangspunktet for alt karbonet i plantene, som igjen utgjør omtrent halvparten av tørrstoffet i planten. Karbonet bindes ved hjelp av fotosyntesen der CO₂ blir tatt opp gjennom spalteåpningene og omdannet til sukkerforbindelser ved hjelp av energi fra lyset. Nedbrytning av karbonforbindelsene gir energi for næringsopptak og vekst (Bævre et al. 2006). Dette er en kortvarig binding av CO₂ og effekten av dette regnes derfor ikke som en lagringseffekt. All tilført CO₂ vil i løpet av forholdsvis kort tid ende opp i atmosfæren igjen (Almeida et al. 2014).

Den positive effekten av CO₂ har vært kjent i godt over 200 år, men ble først tatt i bruk som innsatsfaktor i veksthusproduksjon i større skala på 1970-80-tallet. Mens konsentrasjonen av CO₂ i uteluft er i overkant av 400 ppm (University of California San Diego 2018), etterstrebes det å få en CO₂ konsentrasjon på omtrent 600-1000 ppm inne i veksthuset. CO₂ kan tilføres ved forbrenning av naturgass eller propan. I tillegg er det mulig å kjøpe flytende CO₂ som stammer fra industriprosesser til dette formålet (Bævre et al. 2006). Utnyttelse av naturgass i veksthus gir en høyeffektiv anvendelse av naturgass da den både tilfører varme og beriker veksthusklimaet med CO₂. En høyere konsentrasjon av CO₂ gir en økning i produktiviteten og reduserer dermed energiforbruket per kg produkt. På den måten blir den positive effekten av CO₂ regnet med gjennom det reduserte energiforbruket (Bævre et al. 2006). Behovet for tilført CO₂ avhenger først og fremst av hvor tett veksthusbygningen er og hvor mye det luftes. Omtrent 80 % av behovet for tilført CO₂ skyldes tap gjennom utskifting av luft, mens de resterende 20 % kompenserer for opptak gjennom plantenes fotosyntese ved normal drift av veksthuset (Blom et al. 2002).

Næringsstoffene plantene har behov for blir tilsatt i vanningsvannet. I næringsfattige vekstmedier har man derfor, gjennom vanning, full kontroll på hva planten har tilgang til. Tomatplantene har behov for tilført nitrogen, fosfor, kalium, kalsium og magnesium som de viktigste næringsstoffene. Høye konsentrasjoner av kalium bidrar til fin farge og god smak på tomatene. pH og forholdet mellom nitrogen og kalium er de faktorene som varierer mest i gjødslingsproduktene. Det er mulig å resirkulere gjødselfvannet, men det øker risikoen for spredning av sykdomssmitte. Hvis det skal gjøres på en trygg måte krever det investeringer i rensesystemer. Per i dag er det lite brukt og regnes å være for dyrt til at det skal kunne anbefales til produsentene (Maessen & Verheul 2017).

Et tradisjonelt veksthus er en forholdsvis enkel konstruksjon bygget i stål med glassplater som dekke. Vanlig glass har dårlig isolerende egenskaper og har typisk en U-verdi på rundt 6,4 W/m²K. Byttes glass ut med andre materialer som polykarbonat eller akryl, oppnår man U-verdier på 3-4 W/m²K. I eksisterende bygg kan isolerende energigardiner være et effektivt tiltak for å redusere varmetapet. De kan gi en reduksjon i energiforbruk på 25 % (Norsk Gartnerforbund).

På pilotstadiet finner man også mer avanserte systemer for klimaregulering i veksthus, såkalte semi-lukkede veksthus. Disse er utstyrt med systemer som kjøler og varmer opp veksthuset

etter behov. Kjølesystemet er koblet opp mot varmelagre og reduserer derfor behovet for lufting. Framfor å slippe overskuddsvarme rett ut i lufta lagres den i grunnen eller i vanntanker. Det fører til at varmen som både produseres av plantene og oppstår som følge av solinnstråling kan utnyttes bedre, noe som i neste rekke reduserer behovet for annen oppvarming.

I et slikt system vil tilført CO₂ bli utnyttet bedre, da mindre vil slippes direkte ut gjennom lufting. Forsøk har vist at over fire ganger så mye CO₂ må tilføres i et tradisjonelt system som i et lukket for å oppnå den samme konsentrasjonen. Dette viser at styringen av veksthusklimaet gjennom lufting er avgjørende for behovet for tilført CO₂. Graden av lufting er i neste rekke avhengig av klimatiske forhold som solinnstråling som bidrar til temperaturøkning i veksthuset. Om veksthuset ikke er utstyrt med andre tekniske installasjoner som kan senke temperaturen er det nødvendig å lufte (Qian et al. 2009).

En utfordring når lufting skal reduseres er luftfuktigheten. Det er derfor svært viktig å ha gode systemer for avfukting. Et miljø med for mye fuktighet vil gi økt risiko for sykdom på plantene. Et forsøk gjennomført i Nederland viste en økning i produktivitet på 14 % ved dyrking i et lukket veksthus med høy CO₂ konsentrasjon. Hovedutfordringen ved denne driften viste seg å være luftfuktighet som gjorde at plantene ble angrepet av sopp, det førte i neste rekke til at produktiviteten samlet sett endte opp med en økning på 4 % sammenlignet med tradisjonell produksjon. Modellberegninger viste at økningen i produktivitet kunne forklares av den økte CO₂ konsentrasjonen (Qian et al. 2009).

Produksjonssystemet og energibruk er forholdsvis likt hos de fleste produsenter. Det er i hovedsak produktiviteten som gjør at noen produsenter får et bedre miljøregnskap enn andre. Utvidelse av sesongen vil gi en totalt større produksjon og dermed også flere kg produsert vare å fordele utslippene på (Williams et al. 2006). Tomatproduksjon har tradisjonelt sett foregått på sesongbasis med oppstart av produksjon i midten av februar og avslutning og tømning av veksthuset midt i oktober. Det gir en samlet årlig produksjon over omtrent 36 uker. Denne produksjonsformen gjør at lyset fra sola utnyttes best mulig, noe som gjør at det er mulig å produsere uten tilleggsbelysning. I et slikt dyrkingssystem er naturgass og gjødsel de viktigste innsatsfaktorene (Sand 2018).

Gartnerier med tomatproduksjon på helårsbasis er gjerne store og har flere sett med planter de kan sette inn gjennom sesongen. Ettersom produksjonen foregår gjennom vinteren er tilleggsbelysning helt avgjørende for at plantene skal vokse godt. På dager med lite innstråling kan gartneren fortsatt gi plantene det lyset de trenger for en optimal vekst gjennom hele året. Dette gjør at produktiviteten til helårsprodusenter ofte er høyere enn den er for sesongprodusenter. I tillegg foregår dyrkingen over hele året og gir derfor produksjon over en større del av året. Vekstlyset som brukes i helårproduksjon avgir varme som reduserer behovet for annen oppvarming. Typisk for denne produksjonsformen er relativt høyt forbruk av elektrisitet og tilsvarende lavere forbruk av naturgass. Ekstra CO₂ i flytende form brukes ofte for å berike veksthusklimaet og øke konsentrasjonen av CO₂.

Moderne veksthus er utstyrt med klimareguleringssystemer som til enhver tid måler de klimatiske forholdene i veksthuset. Lys, lufting, oppvarming og tilførsel av CO₂ er derfor svært dynamiske prosesser. Uten spesifikke og detaljerte data om lufting og plantevekst i veksthuset er det vanskelig å si noe om hva oppnådd konsentrasjon av CO₂ blir (Blom et al. 2002).

3.2 Biogassproduksjon

Biogass produseres av organiske substrater som matavfall, husdyrgjødsel og slam. Råstoffene føres inn i reaktoren der nedbrytningsprosessen foregår. Oppholdstiden, temperatur, sammensetning og næringsinnhold i substratene som brukes avgjør kvaliteten på biogassen og biogjødsel fra prosessen. Lang nedbrytningstid gir biogjødsel med lavt innhold av tørrstoff (TS) og en høy utnyttelse av gasspotensialet i råstoffet. En kortere oppholdstid i reaktoren gir derimot ofte et høyere innhold av TS i biogjødsel og et lavere gassutbytte per tonn TS sammenlignet med en lengre oppholdstid (Luostarinen et al. 2011). Det nedbrytbare TS-innholdet dannes av karbonforbindelser i form av karbohydrater, proteiner og fett i substratet (Morken et al. 2007).

Biogass fra en reaktor inneholder vanligvis omtrent 65 % metan og 35 % karbondioksid. Den kan også inneholde mindre mengder av gassene karbonmonoksid, nitrogen, ammoniakk, oksygen, hydrogen og hydrogensulfid. Sammensetningen av gassen avhenger av innholdet i råstoffene som inngår i prosessen. Noe avhenger også av de fysiske og kjemiske forholdene i reaktoren under utråtningsprosessen (Raadal et al. 2008). All gassen går gjennom en rensing der vanddamp og H₂S fjernes. Deretter kan den oppgraderes til drivstoffkvalitet ved å fjerne

CO₂. I oppgraderingsprosessen renses metangassen til en renhet på omtrent 98 %. Oppgraderingen fører til at man fjerner 35-40 % av volumet av gassen (Bauer et al. 2013).

Biogjødsla består av det organiske materialet som ikke blir nedbrutt og næringsstoffene fra substratene. De viktigste næringsstoffene i biogjødsla er nitrogen, fosfor og kalium. Fosfor bindes til tørrstoffet, mens de to andre næringsstoffene er løst i vann. Den er derfor godt egnet som gjødsel. Gjennom biogassanlegget kan biogjødsla videre distribueres slik at bønder som vanligvis ikke har tilgang på husdyrgjødsel eller annet organisk materiale får tilgang til dette. Innholdet av tungmetaller og krav til sammensetning av næringsstoffer i biogjødsel er regulert gjennom *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav*.

Omgjøringen av organisk karbon til metan er en effektiv prosess og bioresten vil derfor ha et lavere innhold av karbon enn det substratet inn i prosessen i utgangspunktet hadde. I ulike studier har det blitt observert en reduksjon på omtrent 70-94 % av karboninnholdet i biogjødsla sammenlignet med substratet inn. (Massé et al. 2007; Perez et al. 2006; Schievano et al. 2011). Det karbonet som ikke blir brutt ned følger med biogjødsla og kan bidra til karbonlagring. Karbonlagringseffekten avhenger av lokale forhold som type jord, nedbør og temperatur. Hvordan det organiske avfallet behandles vil også påvirke i hvilken grad karbonet fra biogjødsla vil lagres i jorda (Smith et al. 2014).

Biogjødsla kan bearbeides og raffineres til gjødselprodukter, men det vanligste er å bruke den direkte. Avvanning er en behandlingsform som brukes til en viss grad. Ved avvanning får man en flytende fraksjon og en fast fraksjon. Den faste fraksjonen har et høyt innhold av TS og fosfor, mens den flytende fraksjonen kjennetegnes av høyt innhold av nitrogen og kalium. Den flytende fraksjonen går som regel med avløpet til et renseanlegg for gjenvinning av nitrogen og den faste fraksjonen tilføres i kompost, men her finnes det en rekke muligheter for videreforedling. Begge fraksjonene kan brukes som gjødslingsprodukter. (Möller & Müller 2012).

Behandling og håndtering av biogjødsel er årsaken til en stor del av utslippene knyttet til biogassprosessen, hovedsakelig i form av metan og nitrogenoksid. Noen undersøkelser har vist at de negative effektene knyttet til bruk av biogjødsel er større enn ved bruk av mineralgjødsel. Dette gjaldt for påvirkningsindikatorerne forbruk av primær energi, global oppvarming, forsuring, eutrofiering og tilførsel av kadmium, mens forbruk av fosfor kom bedre

ut for biogjødselen. Sensitivitetsanalysene viste riktignok at biogassprosessen ble sammenlignbar med produksjon av mineralgjødsel dersom prosessen ble optimalisert i større grad. Da ble klimagassutslippene lavere for biogjødsel sammenlignet med mineralgjødsel (Chiew et al. 2015).

Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav også kalt Gjødselvarereforskriften er for tiden på høring. En rekke aktører har kommet med positive innspill til en revidert forskrift, med større muligheter for bruk av avløpsslambaserte produkter. Endringer som skal gjøres er blant annet å redusere intervallene for når det er lov til å gjødsle med avløpsslambaserte produkter. Samtidig blir perioden etter bruk hvor det ikke er tillatt å dyrke grønnsaker, poteter, frukt og bær redusert fra 3 år til 10 måneder. Ved bruk av avløpsslam i biogassproduksjon gjør disse endringene at det blir lettere å finne bruksområder for denne typen biogjødsel. (Mattilsynet 2017).

Biogjødsel er mest brukt til spredning på jorder. Vekster som vokser utendørs er mer robuste enn vekster som dyrkes i veksthus. Dersom biogjødsel skal brukes i veksthusproduksjon er det svært viktig at gjødsla har en stabil og god kvalitet med tanke på innhold av tungmetaller og andre forurensninger. For tomater er det spesielt viktig at innholdet av ammoniumnitrogen ikke blir for høyt. Det kan være utfordrende å få til ved bruk av biogjødsel. Til tross for det har biogjødsel vist seg å fungere like godt som tradisjonell gjødsel når formene for nitrogen ble korrigert fra ammonium nitrogen til nitrat nitrogen og med tilføring av ekstra magnesium. I ett av forsøkene, gjennomført av Liedl et al. (2004), bestod substratet kun av fjørfegjødsel, det gav derfor et veldig rent og homogent produkt også ut av prosessen, da substratet selv var av høy kvalitet. Stoknes et al. (2016) har også vist at i kompost med meitemark kan man få den dominerende typen nitrogen over på nitratform. Den flytende fraksjonen av avvannet biogjødsel fungerte i forsøkene like godt som mineralgjødsel for vekster som salat og urter med et kort livsløp. For planter med lengre produksjonssyklus og høye krav til næring er den faste fasen av biogjødsel også nødvendig for å dekke behovet for fosfor. På grunn av behovet for å modifisere næringsstoffene fungerte dette kun i sammenheng med et aktivt mikrobiologisk system. Disse resultatene tyder på at biogjødsel ikke vil kunne brukes direkte, men vil måtte gå gjennom en behandlingsprosess før det er egnet som et gjødselprodukt i veksthusproduksjon.

4. Metodikk

4.1 Valg av metode

Metodevalget er basert på problemstillingen og forskningsspørsmålene som retter seg mot undersøkelser av klima- og miljøpåvirkninger av ulike produksjonssystemer for tomat. Et naturlig valg er derfor å gjøre livsløpsanalyser av systemer med ulik ressursbruk, for å identifisere og kvantifisere klima- og miljøpåvirkningene de ulike valgene gir. I tillegg har mye av arbeidet bestått av å samle inn data både gjennom litteratur og direkte kommunikasjon.

4.2 Livsløpsanalyse

Livsløpsanalyse (LCA) er en anerkjent og internasjonalt standardisert metode for å identifisere, kvantifisere og vurdere miljø- og ressurspåvirkninger av en bestemt aktivitet eller produksjon. ISO14040 er den generelle standarden for alle forhold rundt LCA, mens mer praktiske retningslinjer for gjennomføring dekkes av ISO14044 (Curran 2015, s. 20-21). Per definisjon skal en LCA beskrive og dokumentere miljøaspekter og potensielle påvirkninger gjennom et produkts livsløp. Det er en helhetlig tankegang der uttak av råvarer, produksjon, bruk og avfallshåndtering alle er trinn i livsløpet og skal inkluderes i analysen. En LCA består av fire obligatoriske trinn.

Første trinn i analysen er fastsettelse av hensikt og omfang, det inkluderer definisjon av den funksjonelle enheten, fastsettelse av systemgrenser og metoder for allokering. Den funksjonelle enheten er et viktig element i enhver LCA. Den skal gi en kvantifisert beskrivelse av kravene man stiller til systemet. Alle analysene gjøres relativt til den funksjonelle enheten, noe som gir mulighet for sammenligning mellom ulike alternativer. Det gir også mulighet til å analysere effektene av endringer i ulike parametere (Curran 2015, s. 22-25).

Ved analyse av et enkelt produksjonssystem må det settes grenser mot tilgrensende systemer eller systemer som har prosesser som inngår i flere produktsystem. Slike problemstillinger er viktig å ta til vurdering når systemgrensene skal settes. Dersom man ikke er i stand til å løse problemet ved grensesetting kan det løses ved allokering basert på økonomisk verdi eller masse (Curran 2015, s. 28-29).

Trinn 2 i analysen er livsløpsregnskapet. Der skal alle utgående og inngående masse- og energistrømmer identifiseres og kvantifiseres. Inngående strømmer er materialer og energi, mens utgående strømmer er produkter, avfall og utslipp til jord, luft og vann. Datakvalitet er

også svært viktig for troverdigheten og bruksmulighetene for analysen. For å gjøre en vurdering av dette skilles det mellom forgrunns og bakgrunnsdata. Forgrunnsdata er data som stammer fra prosessen som undersøkes eller nærmeste ledd oppstrøms det analyserte systemet. Bakgrunnsdata er data som stammer fra statistikk eller databaser og som brukes for ledd lenger oppstrøms i systemet. Dataene sin representativitet med tanke på tid, geografi og teknologi er viktig og bør argumenteres for (Curran 2015, s. 75-81).

Livsløpseffektvurdering er det tredje trinnet i analysen og tar for seg karakterisering av utslippene og valg av påvirkningskategorier som skal inngå i analysene. Valg av påvirkningskategorier avgjør hva resultatene kommer til å fortelle om ulike miljøpåvirkninger og hvilken tidshorisont de er over. Tidshorisonten har betydning for blant annet vektingen av klimagasser som har ulik oppholdstid i atmosfæren (Curran 2015, kap. 4). Et 100 års perspektiv er den mest brukte tidshorisonten for klimagasser (Lyng et al. 2011).

Det fjerde trinnet i analysen består av en tolkning av resultatene. Resultatenes robusthet kan testes ved følsomhetsanalyser eller statistiske simuleringer. Praktisk betydning av resultatene bør også komme fram her. Dersom analysen skal brukes i offentlig sektor er det krav om en kritisk gjennomgang av resultatene (Curran 2015, kap. 6).

Innenfor livsløpsanalyser skilles det mellom regnskapsmodellering (attributional) og konsekvensmodellering (consequential). En regnskaps-LCA beskriver et gjennomsnittlig produksjonssystem basert på observasjoner eller historiske data, mens en konsekvens-LCA beskriver hvordan endringer, ofte med bakgrunn i politiske avgjørelser påvirker systemet. Data bygger derfor ofte på antagelser om hvordan det vil være i framtida for en konsekvens-LCA (Rehl et al. 2012). Denne oppgaven vil bygge på regnskapsmodelleringsprinsippet.

Et resultat fra en LCA må ses i sammenheng med systemgrensene og den funksjonelle enheten som er brukt. Enhver LCA forsøker å besvare konkrete spørsmål og kan derfor ikke sammenlignes direkte mot andre analyser uten å gjøre en vurdering av forutsetningene som er valgt. Avhengig av hvem som er oppdragsgiver og hva som er målet med analysen vil definisjonen av systemet variere, noe som i neste rekke vil påvirke resultatene (Curran 2015, s. 22-31).

4.3 Valg av dataverktøy

4.3.1 SimaPro

Analysene er gjennomført i SimaPro som er et av de ledende verktøyene på markedet innenfor livsløpsanalyser. Programmet er koblet opp mot ulike databaser som gir tilgang til mye data og en rekke prosesser for ulike produksjoner og produkter (Curran 2015, s. 115). Dette dataverktøyet ble et naturlig valg ettersom det har vært brukt i undervisningen gjennom studiet og kjennskapen til det derfor var større enn for de andre alternativene. Andre programmer som kan utføre samme type analyser er blant annet GaBi og OpenLCA.

4.3.2 Organic Waste Substrate Treatment Tool

Organic Waste Substrate Treatment Tool (OWSTT) er et beregningsverktøy som brukes for å beregne produksjon og utbytte ved bruk av ulike substrater i biogassproduksjon. Karbohydrater, fettsyrer og aminosyrer i substratene danner til sammen TS-innholdet som er i stand til å reagere og danne produktene fra utråtningsprosessen. I denne modellen er det tatt utgangspunkt i at det kun er TS-innholdet i substratene som reagerer og danner karbondioksid og biogass. Den delen av TS som ikke omdannes i løpet av nedbrytningsprosessen danner TS-innholdet i biogjødsel. Vannet som er i substratene fungerer i beste fall som en katalysator, men deltar ikke direkte i de kjemiske reaksjonene. Summen av vann inn skal derfor være lik summen av vann ut. Total masse ut i form av biogjødsel er summen av vann pluss summen av TS som ikke reagerer. (Saxegård & Baxter 2016). Spesifikke data fra DMF er lagt inn for sammensetningen av ulike substrater og substratenes egenskaper, samt teknologivalg.

4.4 Hensikt og omfang for det analyserte systemet

Gjennom resultatene fra analysene skal det kunne gjøres en vurdering av hvorvidt bruk av biogassressurser i veksthus gir bidrag til reduksjoner i klima- og miljøpåvirkning og om biogass kan dekke tomatgartneriers behov for fornybar energi framover. Analysen vil ikke være en fullstendig LCA, men vil sammenligne ressursbruk og infrastruktur under ulike forutsetninger.

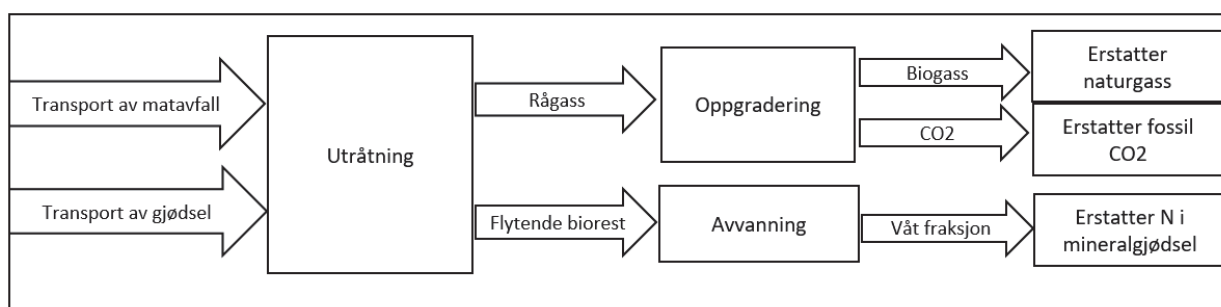
4.4.1 Funksjonell enhet og referansestrøm

Den funksjonelle enheten er en felles enhet som alle analysene vil gjøres i henhold til. I denne analysen er den funksjonelle enheten definert som: *produksjon av 1 tonn tomat av god kvalitet i veksthus under norske forhold.*

4.4.2 Systemgrenser

Den ytre systemgrensen for analysen inkluderer både biogassproduksjon og tomatproduksjon. Biogassproduksjon inkluderer innsamling og transport av substrater, utråtning og oppgradering av biogass til drivstoffkvalitet. Biogass danner grunnlag for energi til oppvarming som erstatter naturgass. Biogjødsel bidrar med tilførsel av nitrogen som erstatter deler av mineralgjødsla. Den avvannede fraksjonen av biogjødsel inneholder i tillegg andre næringsstoffer og består av mye vann. Ved bruk vil den derfor dekke mer enn kun behovet for tilført nitrogen. I denne analysen vil det ses bort ifra disse tilleggsfunksjonene. Samtidig antas det også at biogjødsel vil være i stand til å dekke plantenes behov for nitrogen til tross for at det kan være utfordringer knyttet til denne bruken. I tillegg benyttes utrenset CO₂ fra oppgradering av biogass som CO₂ gjødsel for tomatplantene. Ettersom noe av målet med undersøkelsene er å se på effekten av å bruke CO₂ fra biogassanlegget, er kun biogass oppgradert til drivstoffkvalitet vurdert. Det bygger også på at DMF er brukt som utgangspunkt for analysene, der all gassen oppgraderes til drivstoffkvalitet.

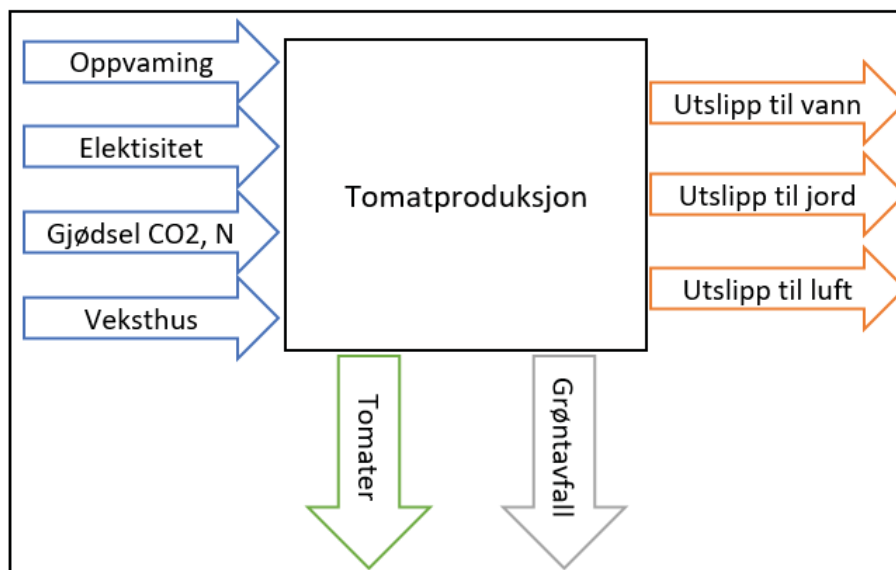
Det analyserte systemet består av to systemer der produksjon av biogass utgjør det ene og produksjon av tomater utgjør det andre. Produksjonen av tomater danner hovedsystemet, mens utslippene knyttet til produksjonen av biogass og biogjødsel danner grunnlaget for sammenligningen av utslipp ved ulik ressursbruk. Sammenligningen er gjort ressurs for ressurs for å sikre en rettferdig sammenligning og i tillegg unngå dobbelttelling. Figur 1 viser en skisse over hvordan produktene fra biogassproduksjonen fungerer som substitutt for de tradisjonelle innsatsfaktorene i veksthusproduksjon.



Figur 1: Skisse over hovedsystemet for ressursene fra biogassproduksjonen

Tomatproduksjonen krever energi til oppvarming, elektrisitet, gjødsel, et veksthus og eventuelt CO₂, som vist i Figur 2. Avhengig av hvilken type produksjonssystem som vurderes vil mengde og type substitusjon variere noe. Grøntavfall som oppstår i produksjonen kan

brukes som substrat i biogassproduksjonen. Dette substratet har ikke blitt tillagt noen klima- eller miljøpåvirkning, alt tillegges tomatene.



Figur 2: Innsatsfaktorer og utslipp som er inkludert i analysen av tomatproduksjon.

Alle utslippene regnes med i den delen av systemet der de oppstår. Det vil si at forbrenningen av naturgass og bruken av CO₂ fra røykgassen inn i veksthuset, vil bli belastet tomatproduksjonen. Dette til tross for at noe av karbonet bindes i plantemassen og frigjøres når tomaten spises og fordøyes eller råtner. Da det i denne oppgaven er valgt en helhetlig tilnærming, vil kortvarige karbonlagringseffekter ikke bli inkludert.

4.5 Valg av påvirkningsindikatorer og metode i SimaPro

Det er valgt tre påvirkningsindikatorer for analysene av ressursbruken. Disse tre er global oppvarming, forsuring og eutrofiering. Innenfor påvirkningskategorien global oppvarming er utslipp til luft i form av forbindelser som påvirker global oppvarming regnet i kg CO₂-ekv. inkludert. Klimagassutslipp dannes av drivhusgasser, det vil si gasser som absorberer langbølget stråling fra jorda og dermed bidrar til global oppvarming. Global oppvarming fører til endringer i temperatur som igjen gir mer ekstremvær i form av kraftig nedbør og tørke. Luftbårne forsurende kjemikalier som nitrogenoksider, svoveloksider og ammoniakk bidrar til forsuring. Utslippene knyttet til forsuring måles i kg SO₂-ekv. Eutrofiering gjelder både utslipp til jord, luft og vann og måles i kg PO₄³⁻-ekv. Økt håndtering av næringsstoffer gir en risiko for utslipp av nitrogenforbindelser til luft og vann, og fosfor til overflatevann. Denne påvirkningsindikatoren vurderer påvirkningen av plantetilgjengelig nitrogen og fosfor i

akvatiske og terrestriske økosystemer. Økt tilførsel av næringsstoffer vil gjøre at planter med et høyt behov for tilførsel av næring vil få en oppblomstring og potensielt utkonkurrere andre planter (European Commission 2010).

Indikatorene er av midpointtype, som vil si at de ikke sier noe direkte om hvilket skadeomfang utslippet gir. Endpointtype-indikatorer derimot, sier noe om skadeomfanget til ulike utslipp målt i menneskelig helse, skade på økosystemer og forbruk av ressurser (Curran 2015, s. 138-142). Analysene som er gjort i SimaPro bygger delvis på metoder og modeller utarbeidet av Østfoldforskning. I denne analysen er alle beregningene gjennomført ved å bruke metoden «LCA 2017 September 08». De mest relevante utslippene og påvirkningsindikatorene er inkludert i denne metoden. For klimagassutslipp er IPCC2013 GWP 100a v.1.03 brukt som utgangspunkt og for forsuring og eutrofiering danner CML-IA baseline v3.04 grunnlaget i denne metoden. Generiske data fra Ecoinvent versjon 3.4 danner grunnlaget for utslippsberegningene som er gjennomført.

4.6 Karbon med biologisk opprinnelse

Ved bruk av biomasse til energiformål er klimanøytraliteten til det aktuelle produktet viktig å ta til vurdering. Klimanøytralitet settes ofte som en forutsetning i studier som tar for seg klimagassutslipp fra forbrenningen av biomasse. Klimagassutslipp fra biologiske kilder omtales som biogent CO₂, da det er en del av det biologiske karbonkretsløpet på jorda. Tanken er at biogent CO₂ som slippes ut fra forbrenningen av biomasse bindes i voksende biomasse. Det gjør at nettoutslippet av CO₂ kan antas å være null fra forbrenningen (Brekke et al. 2017). Dette er en forenkling som ikke tar hensyn til at forskjellige typer biomasse vokser med ulik hastighet. Dersom tidshorisonten skal tas til betraktning bør veksthastigheten til ny biomasse inkluderes i beregningene. For biomassekilder med en rotasjonstid på inntil ett år regnes utslipp og opptak av CO₂ å foregå omtrent samtidig. Det gjør at antagelsen om null netto utslipp av klimagasser fra forbrenning bør være forholdsvis riktig for dette systemet (Guest et al. 2013). Substrater som brukes til biogassproduksjon stammer hovedsakelig fra biomasse med et kort kretsløp som jordbruksprodukter og husdyrgjødsel.

Bruk av fossile energikilder gjør at karbon som har vært lagret over lengre tid under jordskorpen frigjøres raskt. All CO₂ som frigjøres vil derfor gi bidrag til klimagassutslipp. CO₂

fra fossile kilder har et bidrag til global oppvarming på en, mens biogen CO₂ har null (Brekke et al. 2017).

4.7 Allokering

For å fordele utslippene fra biogassproduksjonen på de ulike produktene den gir, er det gjennomført en allokering av utslippene fra produksjonen. Ifølge ISO 14044 bør allokering i første rekke unngås ved å gjøre en systemutvidelse eller å splitte opp prosessene som undersøkes. Alternativt kan en allokering skje med hensyn på masse, volum eller økonomi. I denne sammenhengen er målet å gjøre en sammenligning mellom ulik ressursbruk i veksthusproduksjon og en allokering er derfor nødvendig.

Ved en fysisk allokering er fordelingen av masse mellom de ulike produkter en mye brukt sammenheng. Svakheten ved en slik allokeringsmetode er at den ikke tar hensyn til kvaliteten på produktene eller motivasjonen for å drive en slik produksjon. En økonomisk allokering vil inkludere dette i større grad, men på grunn av manglende markedspriser for en del av produktene er det knyttet stor usikkerhet til denne metoden. En økonomisk allokering vil variere med tid, men også med markedssituasjonen til de ulike produktene i ulike land eller regioner. Ettersom den ikke er stabil over tid, vil den heller ikke kunne danne et sammenligningsgrunnlag mot andre LCA resultater (Rehl et al. 2012).

En rekke studier har vist at biogassbehandling er en effektiv måte å redusere klimagassutslippene på (Cuéllar & Webber 2008; Holm-Nielsen et al. 2009; Modahl et al. 2016). Allikevel har metodiske antagelser mye å si for hvordan sammenligningen mellom ulik substitusjon blir (Rehl et al. 2012). Det finnes per i dag ingen standard for hvordan utslippene knyttet til biogassproduksjon fra ulike substrat skal behandles. En standard for dette er riktignok under utarbeiding i prosjektet Bærekraftig Biogass. Deler av arbeidet i prosjektet skal resultere i en Product Category Rule (PCR) som skal godkjennes av EPD Norge og bli en del av en nasjonal standard for hvordan denne problematikken skal håndteres (Greve Biogass 2017).

BioValueChain er den norske biogassmodellen for å beregne miljøpåvirkninger fra biogass og biogjødsel. Den ser på hele systemet samlet og unngår dermed allokering ved å bruke systemutvidelse. Produktene fra biogassproduksjonen danner grunnlag for substitusjon med blant annet fossile energibærere og mineralgjødsel. Analysen starter når avfall eller gjødsel

oppstår og avsluttes etter at unngåtte utslipp fra substitusjonen er inkludert (Modahl et al. 2016).

Utslipp og beregninger knyttet til biogassproduksjon er basert på verdier fra DMF. Følgeforskningsprosjektet som ble gjennomført av Østfoldforskning med partnere resulterte i et godt og veldokumentert datagrunnlag (Stensgård et al. 2017). Dette, sammen med verktøyet OWSTT, har vært brukt til å beregne masse- og energistrømmer fra biogasssystemet (Saxegård & Baxter 2016). I tillegg er beregningene for klima- og miljøpåvirkning gjort med utgangspunkt i BioValueChain-modellen. DMF har en veldig effektiv produksjon og andre biogassanlegg i Norge presterer trolig ikke på samme nivå. Allikevel er disse resultatene representative med tanke på framtidig produksjon av biogass, da nye anlegg med stor sannsynlighet vil være minst like effektive. Data og resultater for den valgte allokeringsmetodikken presenteres i kapittel 5.1.

5. Systembeskrivelse og datagrunnlag for analysene

5.1 Den magiske fabrikken

DMF har status som nasjonalt pilotanlegg og har mottatt støtte fra Innovasjon Norge for utbyggingen. I forbindelse med denne statusen har det vært gjennomført en rekke analyser og målinger av prestasjonen til anlegget. DMF leverte i 2017 57 GWh biogass av drivstoffkvalitet. Denne biogassen utnyttes som drivstoff for busser og renovasjonsbiler. Anlegget mottok totalt 113 410 tonn substrat og leverte ut 111 175 tonn biogjødsel. Biogjødsel inneholdt 4815 tonn TS, 442 tonn nitrogen og 51 tonn fosfor totalt sett i 2017 (Stensgård et al. 2017).

Oppgraderingsprosessen av biogass gjøres i dag ved hjelp av en vannscrubber. Denne prosessen gir ifølge Mariann Hegg i Greve Biogass en blanding av luft og CO₂, med en konsentrasjon av CO₂ på 11-15 %. Med denne oppgraderingsteknologien er lokal bruk av CO₂ det mest aktuelle. Det store volumet med luft bestående av en blanding av ulike gasser gjør den mindre attraktiv for distribusjon. Skal det være aktuelt å transportere CO₂ bør den være så ren som mulig, direkte fra oppgraderingsprosessen. Dersom CO₂ skal bli en ressurs biogassanlegget kan utnytte bedre er valg av oppgraderingsteknologi sentralt.

Biogjødsel vil som i de tradisjonelle analyser erstatte nitrogen i form av kunstgjødsel. Avvannet biogjødsel inneholder det meste av nitrogenet og er på en form som gjør at den lett kan brukes i eksisterende systemer i veksthus. Det er derfor kun effekten av bruk av denne fraksjonen som inkluderes. Utnyttelse av CO₂ i veksthus vil bidra til matproduksjon med biogen gjødsling, og derfor kunne erstatte jomfruelige karbonkilder. For biogassanlegget vil klima- og miljøeffekten knyttet til økt bruk av CO₂ komme i tillegg til nytten fra dagens bruk.

Med utgangspunkt i data som foreligger fra følgeforskningsprosjektet ved DMF har det blitt gjort egne beregninger for klima- og miljøpåvirkninger fra denne prosessen. Utslippene er allokert på de tre produktene biogass, CO₂ og biogjødsel. Allokeringemetodikken som er valgt er en masseallokering basert på fordelingen av TS-innholdet mellom produktene. I denne analysen har fokuset vært å følge de fysiske sammenhengene der datagrunnlaget også er sikrest. Dersom målet hadde vært å gjøre en samfunnsfaglig vurdering av dette, der drivere til økt forbruk skal stimuleres, kunne en økonomisk allokering vært av større interesse.

Valgt metodikk for allokering tar utgangspunkt i ett tonn substrat TS behandlet ved biogassanlegget.

1 tonn TS ved DMF hadde i 2017 en sammensetning som følger:

- 23,6 % gjødsel: 17,41 % fra storfe og 6,24 % fra svin
- 67,9 % matavfall
- 5,2 % næringsavfall
- 3,3 % flytende næringsavfall

Næringsavfall og flytende næringsavfall er behandlet som tradisjonelt matavfall i analysen. Total mengde matavfall er 76,4 % av total TS. Enkle forutsetninger for beregningen er presentert i Tabell 1.

Tabell 1: Forutsetninger for energiinnhold og tetthet for biogass og karbondioksid

Energiinnhold i biogass (oppgradert)	11 kWh/m ³
Energiinnhold i naturgass	11 kWh/m ³
Tetthet metan	0,7143 kg/Nm ³
Tetthet karbondioksid	1,9642 kg/Nm ³

Ved behandling av ett tonn tørrstoff går det totalt inn 6,94 tonn avfall til forbehandling der det tilsettes 1,39 tonn vann. Total masse inn i biogassreaktoren er 8,33 tonn. Dette gir 699 kg rågass og total masse biogjødsel ut av reaktor er derfor 7634 kg når tap ikke er medregnet. Kilo TS per produkt ut av utråtningsprosessen er beregnet med OWSTT med utgangspunkt i behandling av de gitte substratene med deres egenskaper og tekniske spesifikasjoner for DMF.

Trinn 1 i analysen innebærer lagring av husdyr- og svinegjødsel, neste trinn er transport av substrat til biogassanlegget, som gjelder for alle substratene. Deretter går matavfallet gjennom en forbehandlingsprosess der uønsket innhold renses ut og sendes til forbrenning før substratene mates inn i biogassreaktoren for utråtning. Neste trinn er oppgradering av biogass, før biogjødsel til slutt blir avvannet. I prosessen er det et tap av metan på 2,13 % (Stensgård et al. 2017). I denne analysen er dette tapet utelatt. Transport og behandling av sikterest er heller ikke inkludert i analysen. Det samme gjelder bygging og vedlikehold av selve anlegget. Grensene som er satt i forbindelse med allokeringen tar ikke hensyn til at deler av

prosessen tilhører avfallsbehandlings-systemet. Prosessene knyttet til transport og innsamling av matavfall kunne vært belastet avfallsbehandlingssystemet ved å sette grensen for avfallsbehandling ved forbehandling før biogassproduksjon. I denne analysen belastes alle utslippene knyttet til hele livsløpet til substratene produktene fra biogassproduksjonen.

Som vist i Tabell 2 belastes biogass med 27 % av de totale utslippene, mens biogjødsel får 31 % og CO₂ tillegges de resterende 43 %. Basert på hvordan en økonomisk allokering kunne sett ut, er det presentert en fordeling der biogass belastes med 90 % av utslippene og biogjødsel og karbondioksid med 5 % hver. Dette kunne vært en reell allokering dersom biogjødsel og CO₂ hadde en eksisterende, men liten markedsverdi.

Tabell 2: Fordeling av TS-innhold mellom produktene etter oppgradering og allokeringsnøkler for to ulike allokeringer.

	Kg TS	Alternativ 1: Massebasert	Alternativ 2: Økonomisk
Biogass	266	0,27	0,9
Biogjødsel	308	0,31	0,05
Karbondioksid	426	0,43	0,05
Totalt	1000	1	1

Behandling av ett tonn TS gir en biogassproduksjon tilsvarende 3569 kWh, i tillegg gir det 426 kg CO₂ og 17 kg plantetilgjengelig nitrogen, som vist i Tabell 3. Innholdet av nitrogen i biogjødsel er beregnet med hensyn på teoretisk innhold av plantetilgjengelig nitrogen i de ulike substratene som inngår i produksjonen ved DMF, med en antagelse om at 60 % av totalt nitrogen er på plantetilgjengelig form, i tråd med Lyng et al. (2011).

Tabell 3: Produktene fra utråtningen av ett tonn TS ved DMF.

Biogass	3569	kWh/tonn TS
CO₂	426	kg/tonn TS
Biogjødsel	17	kg N/tonn TS

Allokeringsnøkklene er videre brukt for å fordele utslippene på hver av produktene i henhold til det som er mest hensiktsmessige med tanke på substitusjonen. Utslippene for hver av produktene er vist i Tabell 4. Disse resultatene danner grunnlaget for sammenligning mellom ulike ressursbruk i tomatproduksjonen.

Tabell 4: Fordeling av klima- og miljøpåvirkninger mellom de ulike produktene ved en masseallokering.

	Biogass per kWh	CO ₂ per kg CO ₂	Biogjødsel per kg nitrogen
Klimagasser (kg CO₂-ekv.)	0,044	0,59	10,7
Forsuring (kg SO₂-ekv.)	15E-5	15E-4	0,028
Eutrofiering (kg PO₄³⁻-ekv.)	5E-5	55E-5	0,01

Resultatene av alternativ allokering 2 er presentert i Tabell 5. Illustrasjon av den alternative allokeringsmetodikken er gjennomført for å vise at resultatene avhenger sterkt av hvilken metodisk tilnærming som legges til grunn for allokeringen. Utslippene per kWh biogass blir over dobbelt så høye, mens utslippene knyttet til CO₂ og biogjødsel reduseres med over 80 %.

Tabell 5: Alternativ allokering basert på en teoretisk økonomisk verdi av produktene.

	Biogass per kWh	CO ₂ per kg	Biogjødsel per kg nitrogen
Klimagasser (kg CO₂-ekv.)	0,11	0,069	1,7
Forsuring (kg SO₂-ekv.)	29E-5	18E-5	45E-4
Eutrofiering (kg PO₄³⁻-ekv.)	10E-5	63E-6	16E-4

5.2 Ressursbruk i veksthus

5.2.1 Alternativt produksjonssystem 1: Sesongbasert produksjon

Per i dag finnes det ingen oppdatert offisiell statistikk for energiforbruk i norske veksthus og det er derfor laget et gjennomsnitt av fire representative gartnerier for å finne oppvarmingsbehovet. Sesongproduksjon i et veksthus med glass som tekkemateriale gir behov for oppvarming på 11 650 kWh/tonn tomat (Verheul & Thorsen 2010).

Dette forbruket dekkes av naturgass i det tradisjonelle produksjonssystemet. Oppgradert biogass har samme energiinnhold som naturgass og vil derfor fungere som et direkte substitutt både når det gjelder mengde og energi. Utslippene fra produksjon av naturgass ble beregnet ved hjelp av prosesser i SimaPro for produksjon og forbrenning av naturgass til oppvarmingsformål. Prosessene er hentet fra Ecoinvent 3.4 og korrigert for norske forhold.

Forsøk gjennomført av NIBIO har vist at en gjennomsnittlig tilføring av nitrogen på 7,4 g/kg tomat resulterer i at omtrent 2,6 g N/kg tomat følger med vanningsvannet ut som avrenning, som igjen gir et opptak hos plantene på 4,8 g/kg tomat. Det er utfordrende å treffe plantenes gjødselforbruk optimalt og noe tap må derfor medregnes, med de systemene som i dag brukes. Dette gjelder ved gjødsling med mineralgjødsel. For gjødsling med biogjødsel har det vært vanskelig å oppdrive data og avrenning gjennom vanningsvann er utelatt i analysene. Det er antatt et behov for tilført nitrogen på 7,4 kg/tonn tomat. Dette behovet dekkes enten gjennom bruk av mineralgjødsel eller biogjødsel. Utslipp fra disse to produksjonsprosessene vil derfor danne grunnlaget for sammenligningen. Da det er vannfasen av avvannet biogjødsel som brukes er karboninnholdet lavt. Det vil derfor ikke bli regnet med noen effekt av tilført karbon gjennom biogjødsel. Utslipp knyttet til produksjon av mineralgjødsel er basert på en prosess utarbeidet av Østfoldforskning som brukes for å vise effekten av substituert gjødsel når biogjødsel brukes framfor mineralgjødsel. Denne prosessen er basert på utslippsdata fra Yaras produksjon av mineralgjødsel.

CO₂ tilføres gjennom røykgassen fra forbrenningen av naturgass, det er derfor ikke behov for å tilføre ekstra CO₂ ved denne produksjonsformen. I følge Norsk Gartnerforbund er 50 kg CO₂/m² og år en tilførsel som gir et optimalt nivå av CO₂ for biomasseproduksjon ved produksjon gjennom hele året (Sand 2016). For sesongproduksjon, som foregår over ca. 36 uker, er behovet noe lavere. 1 m³ naturgass gir i teorien 1,8 kg CO₂ ved forbrenning (Blom et

al. 2002). Ved et samlet forbruk på 524 kWh/m² vil det gi en tilførsel på 85,4 kg CO₂/m² dersom alt føres inn i veksthuset. I utgangspunktet forbrennes naturgass for å dekke oppvarmingsbehovet. Da oppvarmingsbehovet og behovet for tilført CO₂ ikke er korrelert til enhver tid, vil det føre til at begge produktene ikke alltid blir utnyttet fullt ut. Naturgass som forbrennes på tider av døgnet der oppvarmingsbehovet er høyt og CO₂-behovet er lavt (eller motsatt) vil ha en lavere effektivitet i ressursutnyttelsen sammenlignet med naturgass som både dekker oppvarmingsbehovet og CO₂-behovet. En buffertank for lagring av overskuddsvarme gjør at varme fra naturgass som forbrennes kun for å dekke CO₂-behovet kan lagres til senere bruk. Uten en buffertank vil omtrent 2/3 av røykgassen fra forbrenningen føres inn, det vil tilsvare omtrent 55 kg/m² som er i tråd med Norsk Gartnerforbunds anbefaling (Blom et al. 2002). Oversikt over samlet ressursbruk er presentert i Tabell 6.

Tabell 6: Innsatsfaktorer ved sesongproduksjon av ett tonn tomat. Forbruk per m² er for ett år/en sesong med produksjon.

Innsatsfaktor	Per m ²	Per tonn tomat
Naturgass	524 kWh	11 650 kWh
Elektrisitet til styringssystemer	20 kWh	444 kWh
Tilført nitrogen		7,4 kg N

5.2.2 Alternativt produksjonssystem 2: Helårsproduksjon

Ved helårsproduksjon er det behov for ekstra belysning for at plantene skal vokse godt også i vinterhalvåret. Belysningen avgir en god del varme og reduserer dermed behovet for ekstra oppvarming. Elektrisitetsforbruket er dermed langt høyere enn ved sesongbasert produksjon. Datagrunnlaget for helårsproduksjon bygger på gjennomsnittlig energiforbruk for fire helårsprodusenter. Dette gir et forbruk av naturgass på 2689 kWh/tonn tomat. I tillegg brukes det 7826 kWh elektrisitet per tonn tomat. På grunn av den forlengede vekstsesongen og ekstra belysning er produksjonen per arealenhet langt høyere for sesongproduksjon. Basert på data fra disse gartneriene er produksjonen av tomater 115 kg/m² i året. Det er kun forutsetningene knyttet til energibruk og produksjon per kvadratmeter som endres sammenlignet med sesongproduksjon.

Redusert forbrenning av naturgass gir en lavere tilføring av CO₂ fra røykgassen. For at konsentrasjonen av CO₂ skal holdes på et høyt nok nivå kan flytende CO₂ tilføres. Da det største

tapet av CO₂ skyldes lufting og ikke plantens opptak, er denne faktoren mer arealavhengig enn produksjonsavhengig og utgjør derfor det samme per arealenhet i begge typer produksjoner (Blom et al. 2002).

For å danne et direkte sammenligningsgrunnlag for CO₂ fra biogassprosessen er det sammenlignet med flytende CO₂ fra industriprosesser. Klima- og miljøpåvirkningen per kg CO₂ er beregnet ut ifra en prosess for flytende CO₂ kjøpt fra det Europeiske markedet. Utslipet fra denne kan være noe høyere enn det det vil være fra norskprodusert CO₂-gass. Prosessen som er brukt i SimaPro er hentet fra Ecoinvent 3.4. Denne prosessen inkluderer kun produksjonen av flytende CO₂, derfor er det lagt på 1 kg CO₂ per kg CO₂ forbrukt, da hele utslippet skal tillegges tomatene. Flytende CO₂ brukes der hvor energibæreren ikke er egnet til å tilføre CO₂ som varmepumpe eller el-kjel, eller der forbruket av naturgass eller propan ikke er høyt nok til å dekke behovet. En fordel ved et slikt produksjonssystem er at ressursene tilføres hver for seg, noe som gjør at man unngår forbruk av begge ressursene når man kun har behov for en av dem.

Selv om sammenligningen er valgt i flytende CO₂ er det en vesentlig kvalitetsforskjell på flytende fossil CO₂-gass og den som kommer fra DMF. Luftblandingen som inneholder CO₂ inneholder også en rekke andre gasser. Det er antatt at ingen av de andre gassene i denne lufta vil gi negative effekter på plantene. CO₂ fra DMF er ikke uten videre lett å få solgt og det er derfor heller ikke å forvente at de kan få utnyttet hele CO₂ produksjonen. Det samlede ressursforbruket ved helårsproduksjon er presentert i Tabell 7.

Tabell 7: Innsatsfaktorer ved helårsproduksjon av ett tonn tomat

Naturgass	308000	kWh/da	2680	kWh/tonn
Elektrisitet	900000	kWh/da	7826	kWh/tonn
CO₂-behov	50	kg/m ²	435	kg/tonn
CO₂ tilført fra naturgass	308/11*1,8=50,4 50,4*2/3 =33,6	kg/m ²	439*2/3 =291	kg/tonn
Ekstra behov for CO₂	50-33,6 =16,6	kg/m ²	144	kg/tonn
Avling			115	kg/m ²

5.2.3 Alternativt produksjonssystem 3: BBLS produksjon

I tilknytning til biogassanlegget DMF i Tønsberg er det nytt pilotveksthus under bygging. Det skal nyttiggjøre seg av biogjødsel og CO₂ som stammer fra biogassproduksjonen. Dette systemet består av helårsproduksjon av tomater i et høyteknologisk veksthus, med et svært lavt behov for oppvarming. Materialforbruk knyttet til veksthuskonstruksjonen er beskrevet i kapittel 5.3.2. Det spesielle med veksthuset er isolasjonen i form av såpebobler som kan blåses opp som et isolerende lag mellom doble plater i veggene. Såpeboblene skaper et isolerende lag med stillestående luft og reduserer dermed varmetapet betydelig. Dette konseptet eies av BBBL Solutions AS heretter kalt BBLS. Anton Paardekooper i BBLS oppgir at med bruk av dette systemet vil U-verdien være 0,5 W/m²K. Dette er en reduksjon på omtrent 80 % av det det er i tradisjonelle veksthus. Det er videre forventet at 80-90 % av energien dekkes gjennom belysning i kombinasjon med den isolerende effekten fra såpeboblene, i tillegg produserer plantene selv noe varme.

Innstrålingen fra sola vil utnyttes bedre ved at klimareguleringssystemet sørger for at overskuddsvarme lagres i en buffertank for senere å kunne bidra med oppvarming når det er behov for det. I utgangspunktet skal det være et forholdsvis lukket system der det luftes lite direkte ut. Konsentrasjonen av CO₂ skal ligge på 1200 ppm, med mulighet for ytterligere økning. Ettersom CO₂ ikke har noen annen bruk i dag og produksjonen er lokal er det ingen ekstra kostnader knyttet til å ha en høy CO₂ konsentrasjon i veksthuset. I litteratur anbefales ofte en konsentrasjon på 800-1000 ppm, men dette er etter at man har tatt hensyn til det økonomiske aspektet som gartneren også står ovenfor (Bævre et al. 2006). På grunn av den høye konsentrasjonen av CO₂ er det ikke ønskelig å lufte mer enn høyst nødvendig, da dette vil føre til utslipp av CO₂ og dermed redusere konsentrasjonen i veksthuset. Allikevel er det dimensjonert med at man må regne med noe lufting på sommeren, i tillegg vil det være nødvendig i noen perioder for å regulere fuktigheten i veksthuset.

Energiforbruk knyttet til oppvarming er beregnet med bakgrunn i BBLS estimat på reduksjon i energiforbruk som er 80-90 % reduksjon sammenlignet med et tradisjonelt veksthus. Energibehovet i et småskala prosjekt testet ut i Drammen viste også at behovet for ekstra oppvarming kun var på 10-20 % sammenlignet med et typisk tradisjonelt veksthus (Stoknes et al. 2016). Det antas derfor at totalt energibehov er redusert med 85 % sammenlignet med det tradisjonelle systemet. Ved å anta at energiforbruket er 15 % av tradisjonell sesongproduksjon

gir det et oppvarmingsbehov på 79 kWh/m². Dette skal dekkes gjennom bruk av en varmepumpe. Det er videre antatt et samlet elektrisitetsforbruk på 316 kWh/m² som dekker belysning og andre tekniske systemer.

I likhet med de andre produksjonene er behovet for nitrogen antatt å være 7,5 kg/tonn tomat. Veksthuset, som skal produsere på helårsbasis er forventet å produsere p lik linje med andre helårsprodusenter med en produksjon på 115 kg/m². Veksthuset er enda ikke ferdig bygget og det foreligger derfor ikke data for hvordan veksthuset vil fungere i praksis. Analysene er derfor basert på teoretiske beregninger, estimer og datagrunnlag fra utbygger. Det samlede forbruket av innsatsfaktorer er presentert i Tabell 8.

Tabell 8: Antagelser knyttet til driften av BBLS pilotveksthuset.

Elektrisitet	316	kWh/m ²	2748	kWh/tonn
Oppvarming	79	kWh/m ²	687	kWh/tonn
CO₂-behov	50	kg/m ²	435	kg/tonn
Avling			115	kg/m ²

5.3 Veksthusbygning

5.3.1 Tradisjonelt veksthus i glass

Tradisjonelle veksthus i Norge har blitt bygget med hensikt å utnytte solinnstråling på best mulig måte. Enkle konstruksjoner med tekkematerialer med høy lysgjennomtrengning har derfor vært å foretrekke. Glass gir svært god lysgjennomtrengning, men det har samtidig svært dårlige isolerende egenskaper. Veksthuskonstruksjonen tar utgangspunkt i materialforbruk og levetid presentert i Tabell 9. I tillegg er gassbrenner og elektriske komponenter inkludert i analysen.

Tabell 9: Materialforbruk og levetid for et eksempel på en tradisjonell veksthusbygning (Verheul & Thorsen 2010).

	Mengde		Levetid	
Galvanisert stål	7,1	tonn	20	år
Ekstrudert aluminium	1,7	tonn	20	år
Armert betong	17,3	tonn	20	år
Glass	12	tonn	20	år

5.3.2 BBBL pilotveksthus

BBBL pilotveksthuset har en mer omfattende konstruksjon, som gir et høyere forbruk av materialer knyttet til bygningen. Glass som tekkemateriale er byttet ut med to ulike typer folie som skal gi omtrent tilsvarende lysgjennomtrengning og bedre isolerende egenskaper i kombinasjon med såpebobler. Materialforbruk knyttet til de tekniske løsningene for klimaregulering er ikke tatt med i analysen.

Begge typer plastfolie er lagt inn som PE folie i SimaPro da det var utfordrende å oppdrive data for F-clean folie. Tettheten til folien er antatt å være lik Polyvinylklorid plater (PVC) med en tetthet på $0,51 \text{ g/cm}^3$ (Verheul & Thorsen 2010). Materialforbruket og levetid for veksthuset med en grunnflate på 1000 m^2 er presentert i Tabell 10. Selv om det er antatt en levetid på 15 år i denne analysen vil den totale levetiden mest sannsynlig være lik tradisjonelle veksthus.

Tabell 10: Materialforbruk og levetid for BBLS konstruksjonen.

	Menge		Levetid	
Galvanisert stål	35	tonn	15	år
Ekstrudert aluminium	6	tonn	15	år
Armert betong	108	tonn	15	år
Plastfolie, F-clean	3500	m ²	10	år
Plastfolie, PE- folie	1500	m ²	5	år
Sandwichpanel (100 mmm)	150	m ²	15	år
Sandwichpanel (40 mmm)	100	m ²	15	år

Veksthuset er plassert på toppen av en landfylling, noe som gjør at behovet for armert betong og galvanisert stål er høyere enn det ville vært om veksthuset ble bygget på en mer stabil grunn. Framtidige veksthus av samme type vil ha et forbruk av armert betong på lik linje med tradisjonelle veksthus. Bruk av aluminium vil derimot trolig være høyere enn tradisjonelle hus også i framtiden på grunn av doble vegger. Disse dataene er spesifikke for byggingen av dette pilotveksthuset og materialforbruket er derfor ikke helt representativt for hvordan framtidige veksthus av BBLS typen vil være.

5.4 Data for oppskalering

5.4.1 Transport

En avgjørende faktor for distribusjon og bruk av biogassressurser utenfor umiddelbar nærhet til biogassanlegget vil være transportavstand mellom biogassanlegg og veksthus. Noen ulike transportdistanser for nødvendige ressurser til produksjon av 1 funksjonell enhet er derfor inkludert. Transporten foregår med Euro 5 lastebil der utslippsdata er hentet fra Ecoinvent 3.4. Det er kun vekten av selve produktene som transporteres som legges inn. Vekt av containere eller andre former for emballasjer er ikke medregnet.

Tabell 11: Mengde innsatsfaktorer nødvendig for å dekke ressursbehovet til ett tonn tomat.

Type ressurs	Mengde	
Biogass for sesong prod.	0,756	Tonn/tonn tomat
Biogass for helårsprod.	0,174	Tonn/tonn tomat
Biogjødsel	2,43	Tonn/tonn tomat
CO2 helårsprod.	0,143	Tonn/tonn tomat

5.4.2 Samlet norsk tomatproduksjon

Tomatproduksjon i Norge 2015-2017 (Landbruksdirektoratet)

Tabell 12: Årlig produksjon av tomater i Norge gitt i tonn.

	2015	2016	2017
Tomater i veksthus	11261	11767	13242

Som vist i Tabell 12 har total tomatproduksjon i Norge har vært stigende de siste årene. Omtrent halvparten av denne produksjonen foregår som sesongproduksjon, mens den resterende halvparten produseres gjennom hele året med ekstra belysning (Sand 2018).

6. Resultater

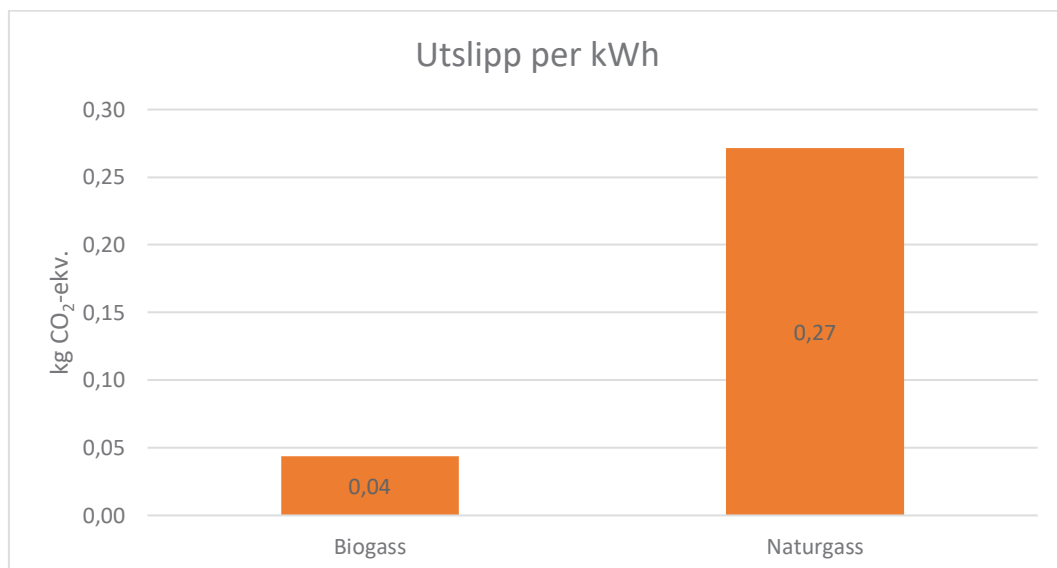
6.1 Forskningsspørsmål 1

Hvordan vil klima- og miljøpåvirkningene fra veksthusproduksjon endres dersom biogass, biogjødsel og CO₂ brukes framfor de tradisjonelle innsatsfaktorene i veksthus med sesong- eller helårsproduksjon av tomater?

6.1.1 Klimagassutslipp for hver av innsatsfaktorene

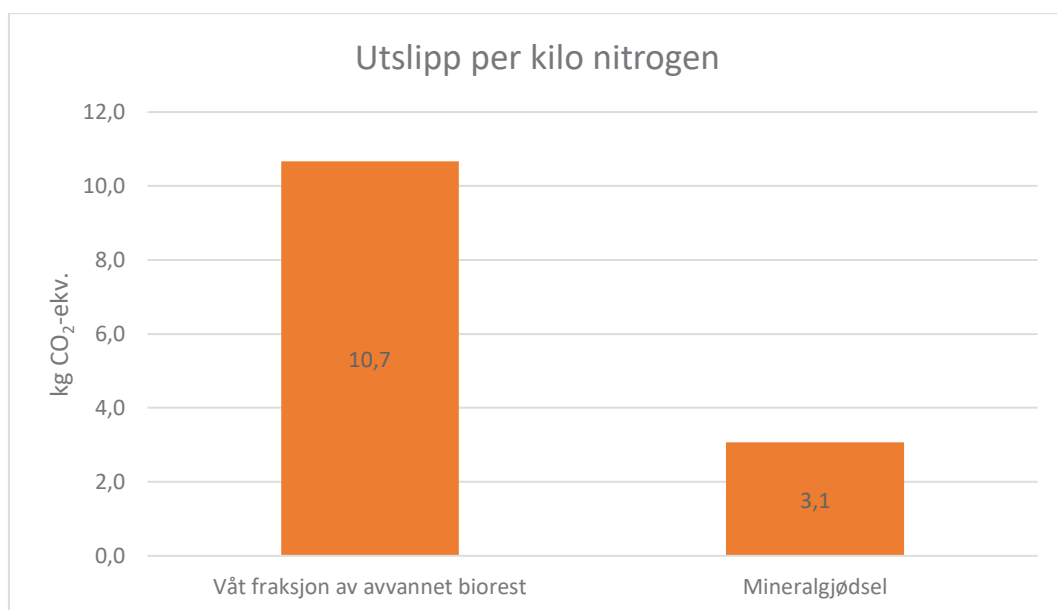
Hver av biogassressursene vil bli presentert med klimagassutslipp beregnet ut fra valgt metodikk for allokering og sammenlignet med utslipp fra bruk av fossile ressurser for hver enhet av produktene.

Biogass og naturgass er beregnet som fullverdige substitutter, da biogassen er oppgradert til drivstoffkvalitet. Utslippene knyttet til biogass skyldes hovedsakelig produksjonen. Kun 0,0005 kg CO₂-ekv./kWh kommer fra forbrenningen, mens 0,044 kg CO₂-ekv./kWh er knyttet til produksjonen. Grunnen til det lave utslippet fra forbrenningen skyldes at biogass regnes som en del av det biologiske kretsløpet og det gis derfor ingen belastning til de direkte CO₂ utslippene. Produksjon av naturgass bidrar med 0,051 kg CO₂-ekv./kWh, mens forbrenning av gassen bidrar med 0,22 kg CO₂-ekv./kWh. Det samlede utslippet fra naturgass gir dermed et klimagassutslipp på 0,27 kg CO₂-ekv./kWh. For biogass er den tilsvarende verdien 0,045 kg CO₂-ekv./kWh. Differansen er totalt på 0,23 kg CO₂-ekv./kWh, som utgjør en prosentvis reduksjon på ca. 84 % ved å bruke biogass framfor naturgass per kWh. Differansen er illustrert i Figur 3.



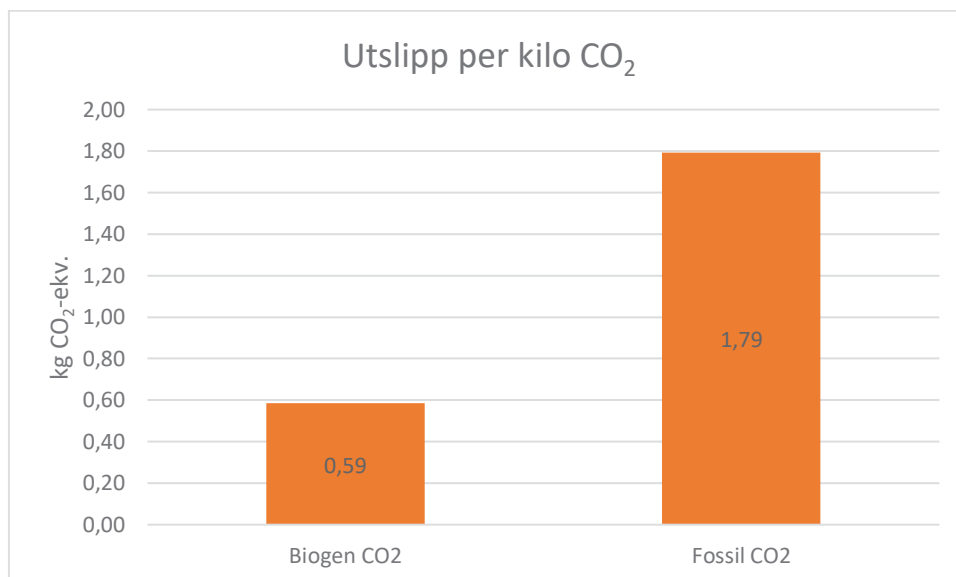
Figur 3: Klimagassutslipp per kWh energi produsert ved forbrenning av biogass og naturgass

Utslipp knyttet til bruk av gjødsel er beregnet per kg plantetilgjengelig nitrogen. Produksjon av flytende fraksjon av avvannet biorest gir et utslipp på 10,7 kg CO₂-ekv./kg nitrogen, dette resultatet bygger også på valgt metodikk for allokering. Til sammenligning gir produksjon av mineralgjødsel et utslipp på 3,1 kg CO₂-ekv./kg nitrogen, som vist i Figur 4. Utslippene ved produksjon av en kilo nitrogen i form av mineralgjødsel er 70 % lavere enn ved bruk av avvannet biogjødsel. Dette tyder på at den valgte allokeringsmetoden gir en påvirkning til biogjødsel som er svært høy, sammenlignet med den alternative kilden til nitrogen. Kun utslipp knyttet til produksjonen av hvert av produktene er inkludert.



Figur 4: Klimagassutslipp knyttet til gjødsel, beregnet per kilo nitrogen.

Produksjon og utslipp knyttet til bruk av CO₂ tillegges tomatproduksjonen (Figur 5). For biologisk CO₂ gir det et resultat på 0,59 kg CO₂-ekv. per kilo CO₂ fra oppgraderingsprosessen, basert på resultatet fra valgt metodikk for allokering. Biogen CO₂ tillegges ingen klimagassutslipp ved bruk, da den er av biologisk opphav. Fossil CO₂ kommer ut med et resultat på 1,79 kg CO₂-ekv./kg, der 0,79 kg CO₂-ekv. er utslipp knyttet til produksjonen og 1 kg CO₂-ekv. er knyttet til bruk. For hver kg CO₂ som tilføres veksthuset, vil den samme mengden CO₂ enten tapes gjennom lufting eller ved nedbrytning av plantematerialet. Dette skjer innenfor et forholdsvis kort tidsperspektiv og hele utslippet belastes derfor tomatproduksjonen. Biogen CO₂ har et utslipp som er 1,2 kg CO₂-ekv./kg lavere enn den fossile, det tilsvarer et redusert utslipp på 67 % per kg CO₂.



Figur 5: Klimagassutslipp knyttet til bruk av biogen og fossil CO₂ per kg CO₂.

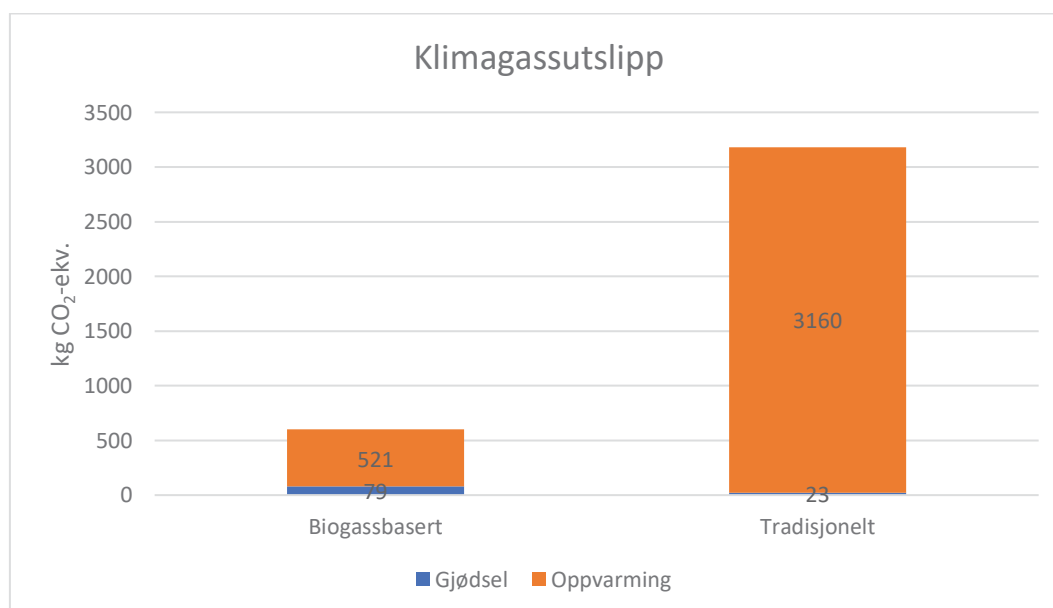
6.1.2 Resultater for sesongproduksjon

Klimagassutslipp

For en tomatprodusent med sesongproduksjon som definert i denne oppgaven vil en overgang til ressurser fra biogassproduksjonen bety et totalt utslipp av klimagasser knyttet til gjødsel og oppvarming på 600 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Med tradisjonelle innsatsfaktorer er utslippet på 3182 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Den samlede effekten av å bruke ressurser fra biogassproduksjon framfor fossile ressurser er illustrert i Figur 6. Av det samlede utslippet utgjør oppvarming ved bruk av naturgass 3160 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Det tilsvarende utslippet ved bruk av biogass er 521 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Dersom nitrogenbehovet til tomatplantene skal dekkes gjennom plantetilgjengelig nitrogen fra våt fraksjon av avvannet

biogjødsel, gir det et utslipp på 79 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Mineralgjødsel gir et utslipp på 23 kg CO₂-ekv./tonn tomat.

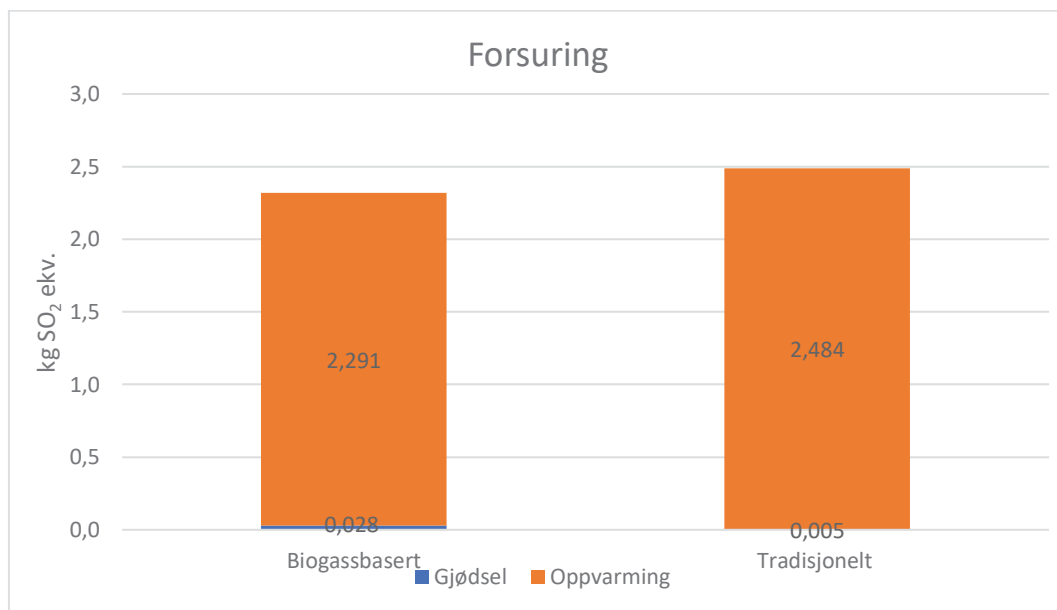
En overgang fra bruk av fossile ressurser til biogassbaserte ressurser vil gi en reduksjonen i klimagassutslipp på 2582 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Det utgjør en reduksjon på omtrent 81 % samlet sett. Som det kommer tydelig fram av Figur 6 skyldes dette forbrenning av biogass framfor naturgass for å dekke plantenes behov for oppvarming og tilførsel av CO₂ for økt plantevekst. Utslippene knyttet til gjødsla er høyere for biogjødsel enn den er for mineralgjødsel. På grunn av den store reduksjonen ved bruk av biogass gir det likevel totalt sett en stor besparelse i klimagassutslipp.



Figur 6: Totale klimagassutslipp ved produksjon av ett tonn tomat ved sesongproduksjon

Forsuring

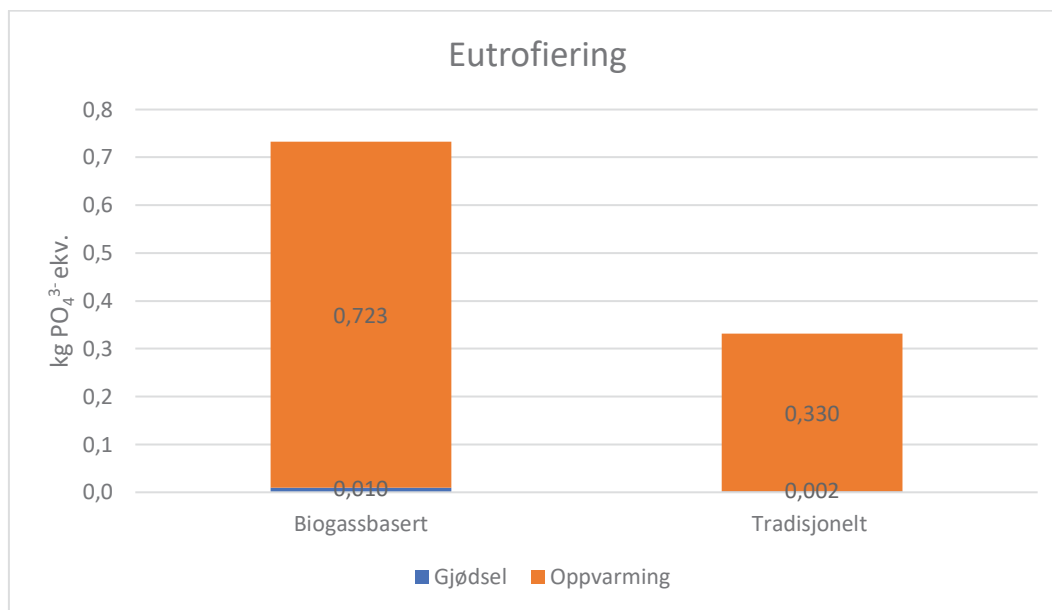
Det totale bidraget til påvirkningskategorien forsuring er 2,32 kg SO₂-ekv./tonn tomat ved en biogassbasert ressursbruk. Det tradisjonelle systemet gir et utslipp på 2,49 kg SO₂-ekv./tonn tomat. Også her kommer det største bidraget til utslipp fra oppvarming. Bruk av biogassbaserte ressurser gir en utslippsreduksjon på omtrent 7 %.



Figur 7: Bidrag til forsuring ved produksjon av ett tonn tomat ved sesongproduksjon.

Eutrofiering

Det biogassbaserte systemet gir et samlet utslipp på 0,73 kg PO₄³⁻-ekv./tonn tomat. Ved bruk av tradisjonelle ressurser er bidraget 0,33 kg PO₄³⁻-ekv/tonn tomat. Både innsatsfaktorer knyttet til oppvarming og gjødsling bidrar til at utslippene fra det biogassbaserte systemet blir høyere enn for det tradisjonelle. Biogassbasert ressursbruk gir 121 % høyere bidrag til eutrofiering enn det tradisjonelle gjør. De store utslippene fra oppvarming skyldes produksjonen av biogass med bakgrunn i valgt allokeringmetodikk. For det tradisjonelle systemet skyldes utslippene hovedsakelig produksjonen av naturgass til oppvarming, som vist i Figur 8.

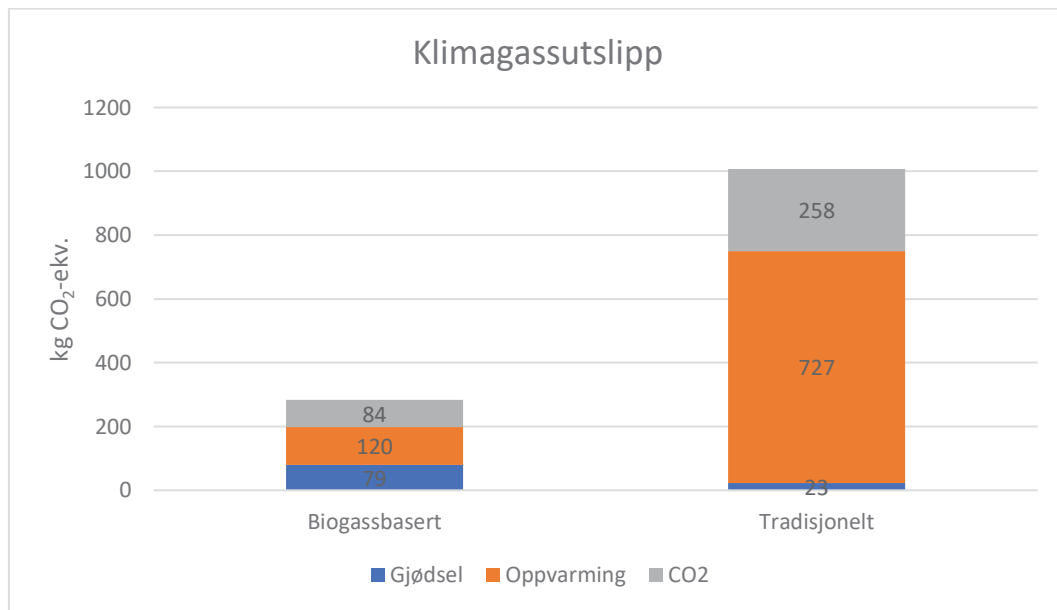


Figur 8: Bidrag til eutrofiering ved produksjon av ett tonn tomat ved sesongproduksjon.

6.1.3 Resultater for helårsproduksjon

Klimagassutslipp

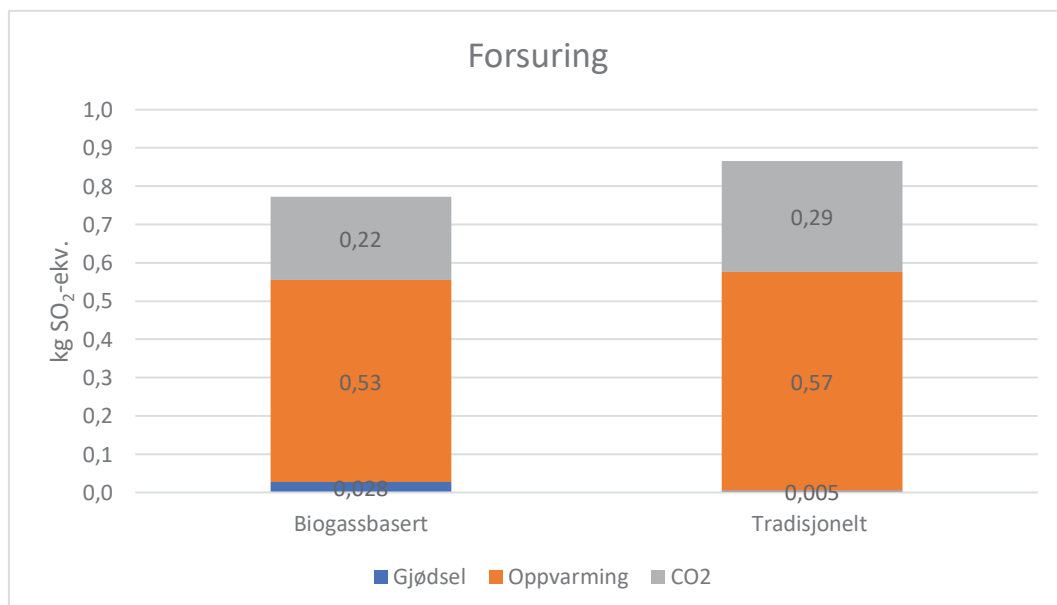
I produksjonsformer med behov for tilførsel av CO₂ utover det forbrenning av karbonholdig brensel gir, kan fossil flytende CO₂ erstattes med biogen CO₂ fra oppgraderingen av biogass til drivstoffkvalitet. I henhold til de definerte variablene for sesongproduksjon gir denne produksjonsformen et samlet utslipp på 1008 kg CO₂-ekv./tonn tomat ved bruk av fossile ressurser og 283 kg CO₂-ekv./tonn tomat for det biogassbaserte alternativet. Det gir en reduksjon i klimagassutslipp på 725 kg CO₂-ekv./tonn tomat ved bruk av biogassbaserte ressurser framfor tradisjonelle, som tilsvarer en reduksjon på 72 %, som vist i Figur 9. Gjødning utgjør den samme effekten per tonn tomat i dette systemet som det gjør for sesongproduksjon, mens CO₂ fra oppgraderingen av biogass og biogass til oppvarming bidrar til et lavere utslipp for det biogassbaserte systemet. Elektrisitet er ikke medregnet da det vil utgjøre det samme bidraget uavhengig om ressursbruken er biogassbasert eller tradisjonell.



Figur 9: Bidrag til klimagassutslipp ved produksjon av ett tonn tomat ved helårsproduksjon.

Forsuring

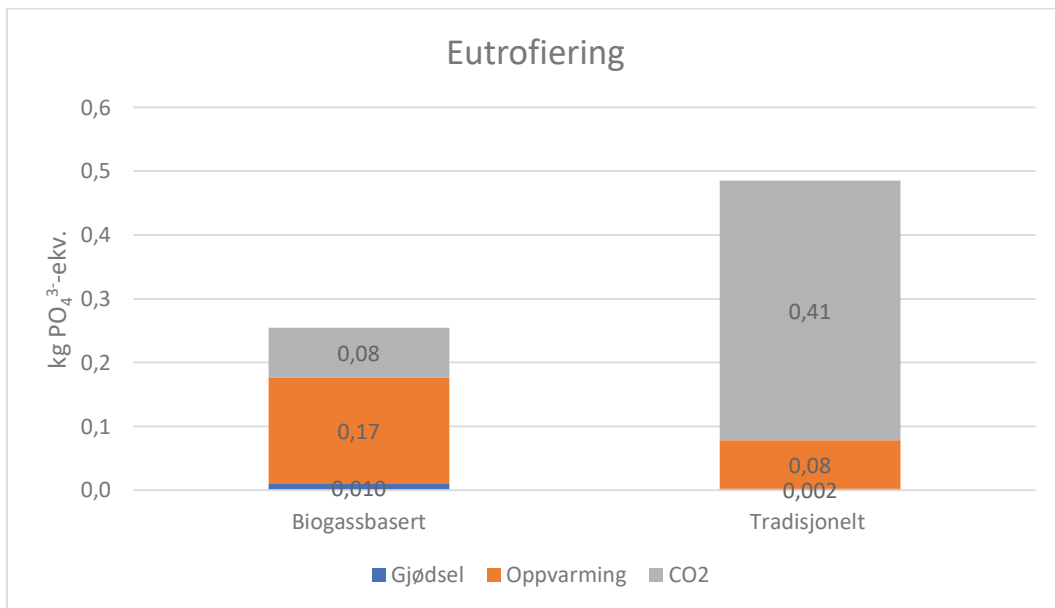
Resultatene for forsuring er presentert i Figur 10. I det tradisjonelle systemet er bidraget til forsuring på 0,87 kg SO₂-ekv./tonn tomat. For biogassbaserte ressurser er det tilsvarende utslippet 0,77 kg SO₂-ekv./tonn tomat. Biogassressurser har dermed et utslipp som er 11 % lavere enn ved tradisjonell ressursbruk. Biogjødsel gir et høyere utslipp, mens de resterende biogassressursene gir et lavere utslipp enn det tradisjonelle gjør.



Figur 10: Bidrag til klimagassutslipp ved produksjon av ett tonn tomat ved helårsproduksjon.

Eutrofiering

I det tradisjonelle systemet er det totale utslippet av PO_4^{3-} -ekv. 0,49 kg, mens det er 0,26 kg PO_4^{3-} -ekv. i det biogassbaserte. Utslipp fra produksjon av flytende CO_2 har det største bidraget med 0,41 kg PO_4^{3-} -ekv./tonn tomat ved tradisjonell produksjon, mot 0,08 kg PO_4^{3-} -ekv. i det biogassbaserte (Figur 11). Det biogassbaserte systemet gir 47 % lavere utslipp enn det tradisjonelle systemet gjør.



Figur 11: Bidrag til eutrofiering fra produksjon av ett tonn tomat ved helårsproduksjon.

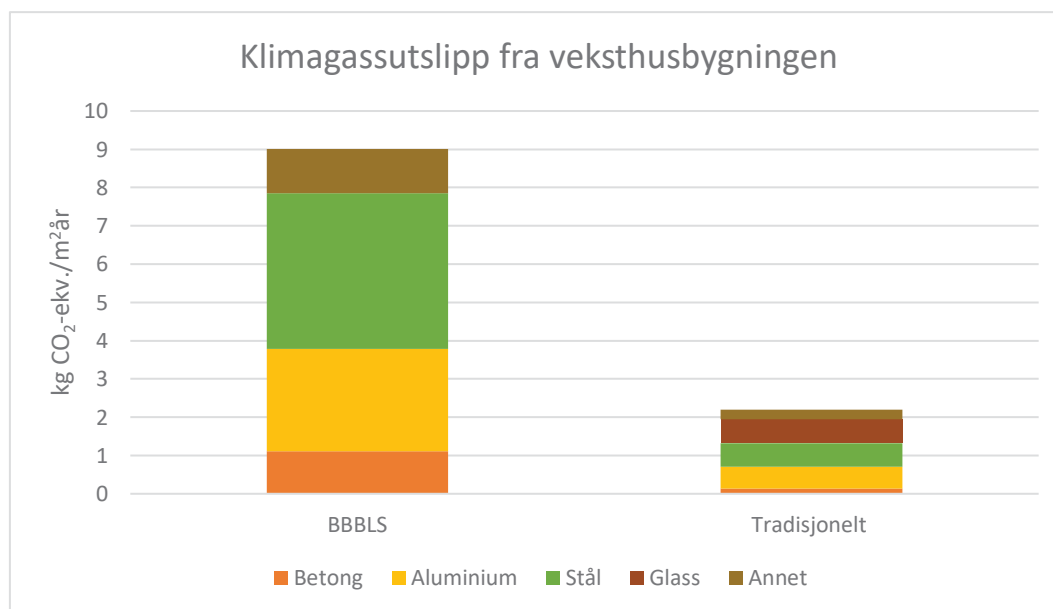
6.2 Forskningsspørsmål 2

Hvordan vil ressursbruk og miljøpåvirkninger endres dersom produksjonen av tomater foregår i et semilukket veksthus framfor i et tradisjonelt veksthus, der materialforbruk og konstruksjon av veksthuset inkluderes i analysen?

6.2.1 Utslipp per kvadratmeter veksthus

Resultatene for materialforbruk og konstruksjonen av selve veksthusbygningen viser at det semilukkede pilotveksthuset har omtrent fire ganger så store klimagassutslipp per kvadratmeter veksthus, sammenlignet med det tradisjonelle veksthuset. Utslippene er beregnet ut ifra materialforbruk ved konstruksjonen og forventet levetid for de ulike komponentene som spesifisert i kapittel 5.3.2. Den tradisjonelle bygningen gir et bidrag til utslipp på 2,2 kg CO₂-ekv./m²år veksthus, mens BBLS veksthus har et beregnet utslipp knyttet til bygningsmassen på 9,0 kg CO₂-ekv./m²år, som vist i Figur 12.

De største bidragene til utslipp fra selve konstruksjonen kommer fra stål, aluminium og betong i BBLS veksthuset. I det tradisjonelle veksthuset kommer de største bidragene fra aluminium, stål og glass.

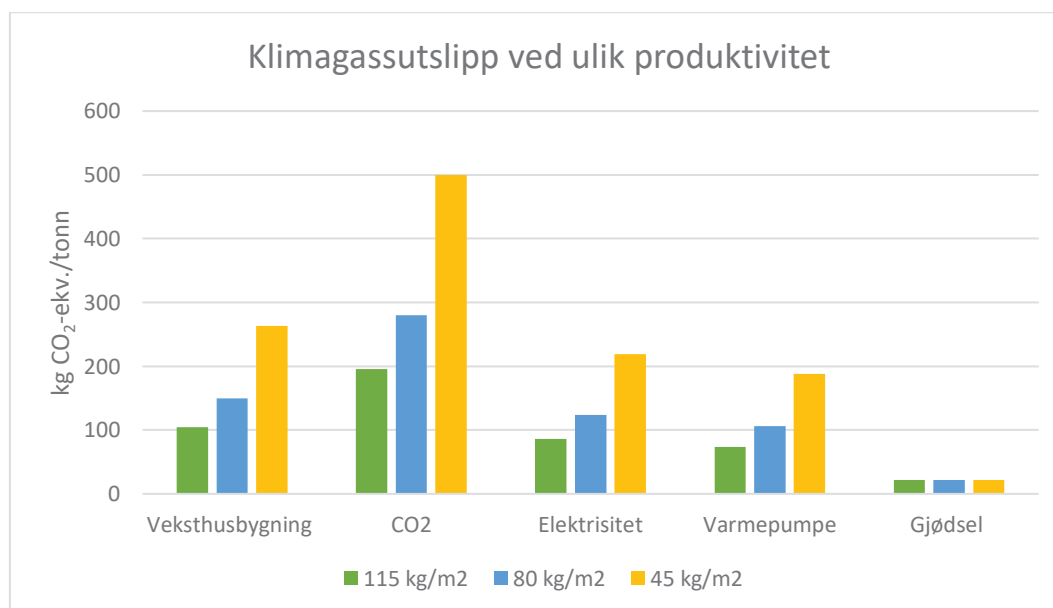


Figur 12: Klimagassutslipp per kvadratmeter veksthus når kun materialforbruket ved konstruksjonen er analysert per år av levetiden til materialene.

6.2.2 Bidrag til utslipp fra ulike innsatsfaktorer

Ressursbruk i BBBLS veksthuset ved ulik produktivitet er vist i Figur 13. Ved en produksjon på 45 kg/m² gir veksthusbygningen et bidrag til klimagassutslipp på 264 kg/tonn. Dersom produksjonen kan heves til nivå med de beste helårsprodusentene med en produksjon på 115 kg/m² er bidraget til klimagassutslipp fra veksthusbygningen 104 kg CO₂-ekv/tonn tomat. Det gir en reduksjon på omtrent 61 %, tilsvarende endringen i produksjon (fra 45 kg/m² til 115 kg/m²).

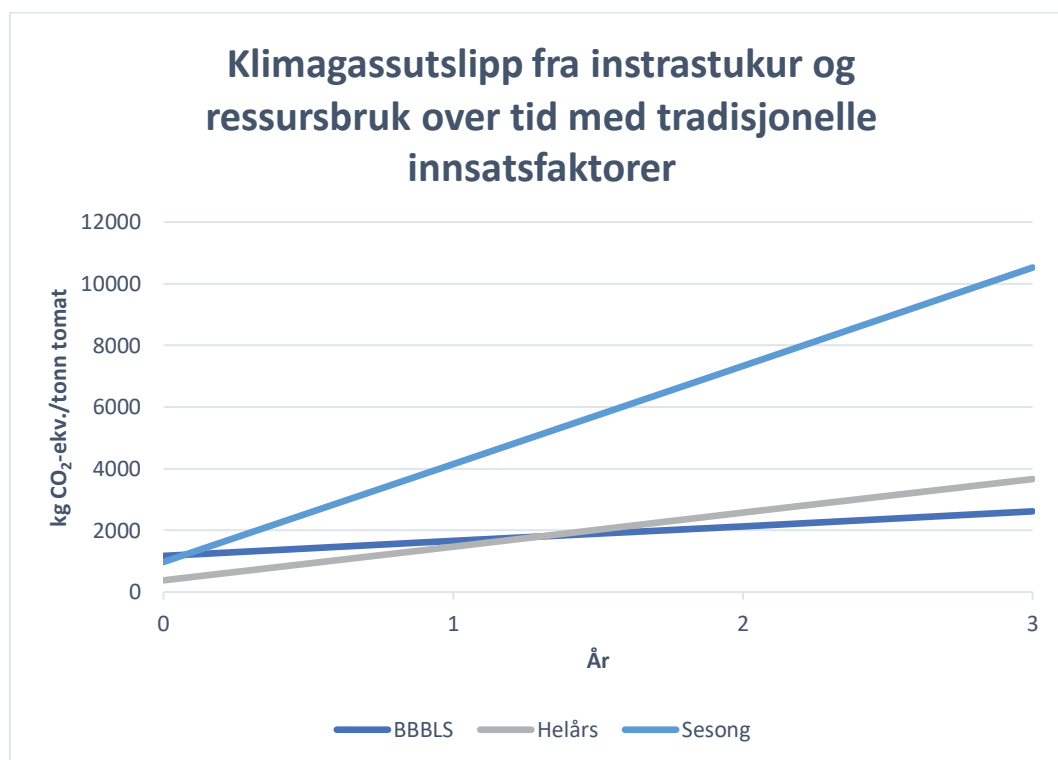
Den innsatsfaktoren som har det største bidraget til utslipp fra dette systemet er CO₂, her med klimagassutslipp fra fossil CO₂ for å illustrere potensialet for reduksjon ved å bruke biogen CO₂. CO₂ utgjør et utslipp på nærmere 500 kg CO₂-ekv./tonn tomat ved en produksjon på 45 kg/m². Ved en produksjon på 115 kg/m² gir det et klimagassutslipp like under 200 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Det gjelder med antagelsen om at samme mengde CO₂ tilføres per kvadratmeter uavhengig av produksjonen. Til tross for at behovet for tilført CO₂ er mer avhengig av veksthusarealet og dermed volumet med luft enn det er av avlingen, vil allikevel en økning i tilført CO₂ gi en positiv respons i avling. En økning i bruk av CO₂ trenger derfor ikke bidra til en økning i utslipp per tonn, da disse variablene er avhengige av hverandre. Denne effekten har det riktignok ikke vært mulig å få fram i denne oppgaven. Utslipptet knyttet til bruk av CO₂ vil dermed være langt mer dynamisk enn det framstilles her, da klimareguleringsverktøyet i veksthuset kontinuerlig kan justerer dette.



Figur 13: Klimagassutslipp ved ulik produktivitet i BBBLS veksthuset per tonn tomat produsert.

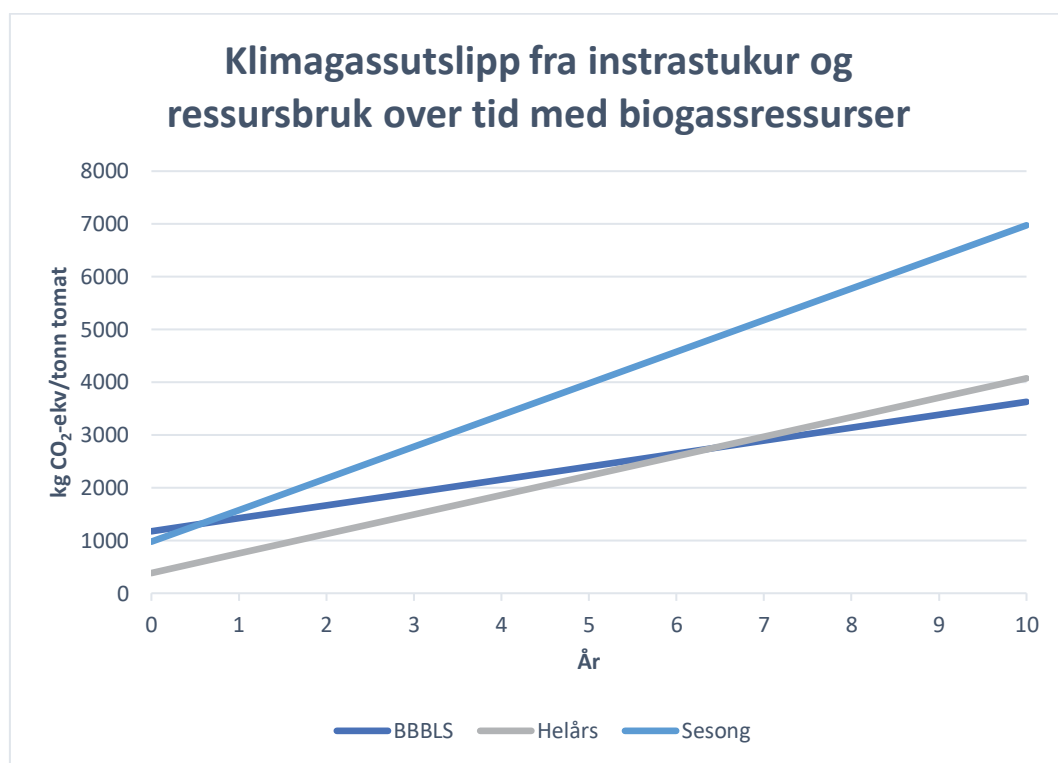
6.2.3 Veksthusbygningen og innsatsfaktorer over tid

Dersom utslippene til veksthusbygningen sees i sammenheng med ressursbruken gir BBBLS veksthusbygningen et utslipp på 1173 kg CO₂-ekv./tonn tomat ved en produktivitet på 115 kg/m². Da er det totale utslippet knyttet til bygningen fordelt på forventet produksjon per kvadratmeter. Den samlede ressursbruken inkludert bruk av fossil CO₂ gir et utslipp på 482 kg CO₂-ekv./tonn og år. Ved tradisjonell helårsproduksjon utgjør bygningen 383 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Utslipp knyttet til ressursbruk gir et klimagassutslipp på 1477 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Sesongproduksjon med en produksjon på 45 kg/m² gir et utslipp fra veksthusbygningen på 978 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Ressursbruken gir et utslipp på 3182 kg CO₂-ekv./tonn tomat og år. Som vist i Figur 14 har produksjon i BBBLS veksthuset et lavere klimagassutslipp enn sesongproduksjon ved bruk av fossile ressurser allerede før et år har gått. Etter omtrent 1,5 års drift i BBBLS veksthuset, vil produksjonen ha lavere utslipp enn det helårsbaserte systemet med fossile ressurser har. Med dagens ressursbruk i veksthus henter BBBLS veksthuset raskt inn de ekstra utslippene av klimagasser fra veksthusbygningen ved det vesentlig lavere behovet for oppvarming.



Figur 14: Samlede akkumulerte utslipp fra de ulike produksjonssystemene over tid. Startpunktet på y-aksen tilsvarer utslipp fra veksthuskonstruksjonen delt på forventet produksjon.

Ved bruk av biogassbaserte ressurser gir BBBLS veksthuset et samlet klimagassutslipp fra innsatsfaktorer på 245 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Reduksjonen kommer av at fossil CO₂ erstattes av biogen CO₂ fra biogassprosessen. Helårsproduksjon har et utslipp på 369 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Det sesongbaserte systemet har et utslipp på 600 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Med reduserte utslipp fra alle produksjonssystemene går det noe lengre tid før utslippene knyttet til BBBLS produksjonen er lavere enn tradisjonell helårsproduksjon. I løpet av det syvende året har utslippene fra BBBLS og helårsproduksjon blitt like, etter dette vil de akkumulerte utslippene fra BBBLS veksthuset gi et lavere bidrag til klimagassutslipp enn alternativene. Sesongbasert produksjon får allerede i løpet av det første året høyere utslipp enn BBBLS.



Figur 15: Akkumulerte utslipp ved bruk av biogassbaserte ressurser som innsatsfaktorer. Startpunktet på y-aksen tilsvarer utslipp fra veksthuskonstruksjonen delt på forventet produksjon.

6.3 Forskningsspørsmål 3

Hvilken påvirkning har transportavstand mellom biogassanlegget og veksthuset på klimanytten ved å bruke biogassbaserte ressurser fremfor fossile og i hvilken grad kan ressursbehovet til norsk tomatproduksjon dekkes gjennom ressurser fra biogassproduksjonen?

6.3.1 Transport

For at CO₂ og biogjødsel skal kunne bli ressurser for salg kreves det en investering i teknologi eller en utvikling av nye produkter som gjør disse produktene lettere kan håndteres og brukes. Spesielt for avvannet biogjødsel, som kommer ut med et høyere klimagassutslipp enn det mineralgjødsel gjør, vil det være lite vilje og ønske om å ta i bruk denne ressursen for eksterne produsenter.

Resultatene for klimagassutslipp viser at sesongproduksjon reduserer klimagassutslippene med 2583 kg CO₂-ekv./tonn tomat og helårsproduksjon reduserer den med 725 kg CO₂-ekv./tonn tomat ved å bruke biogassressurser før eventuell transport er medregnet. Dersom biogass-produktene skal transporteres vil det gi økte utslipp. Utslipp knyttet til transport er kun beregnet for biogass og biogjødsel. Det anses som lite praktisk og hensiktsmessig å transportere CO₂ gass fra oppgraderingsprosessen, den bør brukes lokalt. Klimagassutslipp fra transport av biogass som dekker oppvarmingsbehovet til de ulike produksjonssystemene er presentert i Tabell 13.

Sesongproduksjon av ett tonn tomater får et tillegg i klimagassutslipp på 90 kg CO₂-ekv./tonn tomat for transport av gass 150 km, det gjør at nettonytten reduseres fra 2583 kg CO₂-ekv./tonn tomat til 2493 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Dette utgjør en prosentvis reduksjon på 3,5 %. For helårsproduksjon som har et lavere behov for biogass til oppvarming, utgjør utslippene knyttet til den lengste transportavstanden 21 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Nettonytten reduseres dermed fra 725 kg CO₂-ekv./tonn tomat til 704 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Besparelsen i klimagassutslipp reduseres med 2,9 %. Resultatene for transport viser at biogass kan transporteres over lengre distanser før nettobesparelsen ved å bruke biogass framfor tradisjonelle ressurser er vesentlig redusert. De samlede resultatene er presentert i Tabell 13.

Tabell 13: Klimagassutslipp knyttet til transport av biogass ved transport på lastebil.

Distanse	Sesongproduksjon biogass	Helårsproduksjon biogass
50 km	41 kg CO ₂ -ekv./tonn	9 kg CO ₂ -ekv./tonn
100 km	66 kg CO ₂ -ekv./tonn	15 kg CO ₂ -ekv./tonn
150 km	90 kg CO ₂ -ekv./tonn	21 kg CO ₂ -ekv./tonn

Behovet for tilført biogjødsel er det samme per tonn tomat uavhengig av produksjonsformen. For å dekke behovet for tilført nitrogen for ett tonn tomat kreves det 2,43 tonn flytende fase av avvannet biogjødsel. Klimagassutslippene ved ulike transportdistanser er presentert i Tabell 14. Den lengste transportdistansen på 150 km gir et klimagassutslipp på 78 kg CO₂-ekv./tonn tomat.

Tabell 14: Klimagassutslipp knyttet til transport av biogjødsel med Euro 5 lastebil.

Distanse	Utslipp
50 km	26 kg CO ₂ -ekv.
100 km	52kg CO ₂ -ekv.
150 km	78 kg CO ₂ -ekv.

For sesongproduksjon vil en transportdistanse av ressursene på 150 km gi et samlet utslipp på 168 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Dette resulterer i at den samlede klimanytten ved biogassbasert ressursbruk reduseres med 6,5 % sammenlignet med tradisjonell ressursbruk uten transport. I helårsproduksjon vil den samme transportdistansen gi et klimagassutslipp fra transport på 99 kg CO₂-ekv./tonn tomat. Det gjør at nettoytten reduseres med 13,7 %. Disse resultatene viser at klimagassutslipp knyttet til transporten ikke har en vesentlig betydning for den samlede klimanytten. Når kun klimagassutslipp vurderes er det mulig å transportere ressursene lengre enn det som trolig vil være praktisk gjennomførbart og lønnsomt for produsentene. De tradisjonelle resursene krever også transport. Dersom transportdistansen er den samme, uavhengig av type ressursbruk vil det ikke bidra til en endring i sammenligningsgrunnlaget.

6.3.2 Energiforbruk

Total tomatproduksjon i Norge i 2017 var 13 242 tonn. Denne mengden inkluderer flere typer tomat, men beregningene er gjort med grunnlag i vanlige tomater.

Data oversendt fra Norsk Gartnerforbund viser at omtrent halvparten av tomatproduksjonen foregikk på helårsbasis i 2015 og den andre halvparten foregikk på sesongbasis. Med antagelse om at fordelingen mellom produksjonsformene er den samme i 2017 gir det at en oppskalering vil innebære et gassforbruk på 11 650 kWh/tonn for 6621 tonn tomat, som gir et samlet forbruk av gass tilsvarende 77 GWh. Helårsproduksjonen vil kreve 2680 kWh/tonn tomat for den resterende halvparten av produksjonen. Det smalede behovet for biogass vil da tilsvare 18 GWh. Samlet sett gir det et forbruk på 95 GWh biogass for hele tomatproduksjonen.

DMF produserte 57 GWh biogass av drivstoffkvalitet i 2017 (Stensgård et al. 2017). Det vil si at produksjonen fra dette biogassanlegget kunne dekket over halvparten av det samlede energibehovet til norsk tomatproduksjon. I denne oppgaven har kun biogass av drivstoffkvalitet blitt vurdert, men det er ikke en nødvendig forutsetning. Til tross for at det teoretiske energibehovet kan dekkes er det usikkert hvorvidt dette er en fornuftig bruk av biogassen. Det avhenger av hva alternativ bruk er. Biogass som erstatter drivstoff har vist seg å gi den største klimanytten i andre analyser (Modahl et al. 2016).

7. Diskusjon

7.1 Tolkning og diskusjon av resultater

Hovedmålet med denne oppgaven har vært å undersøke klima- og miljøpåvirkninger fra bruk biogassressurser som erstatning for tradisjonelle innsatsfaktorer i produksjon av tomater. Resultatene viser at klimagassutslippene reduseres mest i de systemene med et høyt forbruk av naturgass til oppvarming, som forventet i tråd med hva resultater fra tidligere analyser har indikert (Verheul & Thorsen 2010). Det er kun bidraget til eutrofiering ved sesongproduksjon som gir et høyere utslipp for biogassbasert ressursbruk. For å kunne sammenligne ulike typer utslipp med hverandre er det nødvendig å gjøre en normalisering eller vekting. Utslippene fra de ulike påvirkningsindikatorene kan ikke sammenlignes direkte per kilo ettersom de har ulike virkninger og forekommer naturlig ved ulike konsentrasjoner. En liten mengde av et stoff kan ha en lagt større samlet skadevirkning eller samfunnsøkonomisk kostnad enn store utslipp av et annet stoff. Det vil derfor ikke være mulig å si hva denne økningen betyr sammenlignet med reduksjon i bidrag til klimagassutslipp og forsurening, da det ikke er gjennomført en normalisering eller vekting (European Commission 2010).

Biogjødsel får et høy utslipp i denne analysen fordi det utgjør en stor andel av massen. Samtidig er innholdet av nitrogen som er det som danner grunnlaget for erstatning av andre produkter lavt sammenlignet med den totale massen med TS. Tidligere analyser har også vist at biogjødsel kan gi et høyt bidrag til klimagassutslipp, men at resultatet var sensitivt til endringer i parameterverdier og optimalisering av biogassproduksjonen (Chiew et al. 2015).

Utnyttelse av biogen CO₂ gir også en stor positiv effekt. Det skyldes hovedsakelig ulike utslipp fra bruksfasen. Mens biogen CO₂ ikke tillegges noen utslipp som klimagass, vil fossil CO₂ tillegges et utslipp på 1 kg CO₂ per kg CO₂ brukt. I prinsippet er det det samme molekylet med den samme funksjonen. Ettersom hele utslippet knyttet til forbrenning av naturgass belastes tomatproduksjonen må det samme gjøres for CO₂ når det tilføres separat.

Dersom fornybare energibærere erstatter de fossile vil det gi et lavere bidrag til klimagassutslipp. Det gjør at tekniske valgt knyttet til veksthusbygningen vil få en større betydning for de samlede klimagassutslippene. Pilotveksthuset av BBBLS type kan levere produkter med et lavere utslipp av klimagasser enn de tradisjonelle systemene godt innenfor levetiden til bygningen. Det viser at det er et godt tiltak, med tanke på klimagassutslipp å gjøre

betydelige investeringer i en bygning med lavt energiforbruk, slik at utslippene knyttet til produksjonsfasen reduseres. Selv om utslippene fra produksjonsfasen er lave, viser resultatene at det bør arbeides for å få et lavere materialforbruk i kommersielle BBLS veksthus. Ved samarbeid med kommersielle aktører innenfor veksthuskonstruksjon vil en optimalisering av materialforbruket gjøre at BBLS veksthuset på sikt kan få et vesentlig lavere klimagassutslipp fra bygningen. Produsentene av BBLS veksthuset er allerede i gang med dette arbeidet.

Lukkede veksthus har i tidligere studier vist seg å gi en betydelig økning i produksjon, noe som i neste rekke vil redusere utslippene per produserte enhet. Analysene som ble gjennomført i denne oppgaven baserte seg på en høy produksjon. En vesentlig mye bedre produksjon enn 115 kg/m² er ikke lett å oppnå. Da den produksjonen er brukt som utgangspunkt for både helårsproduksjon og produksjon i BBLS veksthuset vil en sammenligning med lavere produksjon i begge systemene gi et tilsvarende forhold som resultatene fra denne analysen. Når energiforbruket reduseres viser CO₂ seg som en av de største bidragene til utslipp i BBLS systemet. Det viser at pilotprosjektet i tilknytning til DMF, der fossile CO₂ ressurser skal erstattes med biologiske, bidrar til å redusere utslippene fra det som hadde blitt den innsatsfaktoren med høyest utslipp ved tradisjonell ressursbruk. Utnyttelse av CO₂ fra biogassanlegget kan gi et betydelig bidrag til reduksjon av klimagassutslipp dersom større mengder av gassen kan brukes til dette formålet.

Den store klimanytten ved å erstatte naturgass med biogass gjør at biogass kan transporteres over store avstander før klimanytten reduseres vesentlig. Til tross for at biogjødsel i seg selv gir en økning i klimagassutslipp, er begge ressursene behandlet sammen. Det gjør at den samlede klimanytten er stor. Dersom hver av ressursene vurderes for seg selv gjør det at biogjødsel får et stort negativt resultat, sammenlignet med mineralgjødsel, og ikke kan forsvare transport av noe slag.

Det finnes mange måter å drive både sesong og helårsproduksjon av tomater, både forbruket av innsatsfaktorer og produktiviteten varierer fra produsent til produsent. I denne oppgaven er det derfor tatt utgangspunkt i en realistisk type sesongproduksjon og det samme for helårsproduksjon. For å gi en større tyngde i resultatene kunne flere varianter av dette vært undersøkt, men på grunn av nødvendige begrensninger for å få gjennomført oppgaven har ikke det blitt gjort.

En hake ved produkter fra biogassproduksjon basert på matavfall er at det kan forekomme urenheter i form av substrater som kan være skadelig for plantene. Veksthusprodukter er langt mer følsomme for skader enn det utendørs vekster er. I tillegg er sårbarheten større da dette er et system som baserer seg på høy produksjon. Det gjør at kvaliteten på produktene må være svært høy og stabil for at veksthusprodusenter skal kunne ta de i bruk.

7.2 Robusthet i datagrunnlag og beregninger

Beregningene er gjennomført per tonn tomat, noe som gjør at produktiviteten og ressursbruk per produserte enhet er kritiske faktorer i beregningene. Produktiviteten i systemene kan påvirkes av uforutsette hendelser som sykdom eller andre forhold som gjør at plantene mistrives og reduserer produksjonen.

Det har vært utfordrende å få tilgang til gode data for gjødsling og tap av næringsstoffer gjennom gjødslingsvannet. Dette har derfor blitt utelatt fra analysene. I en fullverdig analyse er dette noe som burde vært inkludert. Det kan gi store utslipp av nitrogenforbindelser spesielt i form av lystgass og ammoniakkutslipp, som igjen kan gi store påvirkninger på alle de analyserte påvirkningsindikatorene.

Datagrunnlaget for ressursbruk i produksjonen er basert på data fra norske veksthus og tidligere analyser av norske veksthus. Norsk veksthusproduksjon skiller seg fra produksjonen ellers i Europa på grunn av andre klimatiske forhold og med tiden også flere energieffektiviserende tiltak. For data knyttet til gjødselforbruk er variasjonene mindre.

Beregningene gjennomført for biogassproduksjonen bygger på data fra følgeforskningen ved DMF. I den utarbeidede rapporten for analysene påpekes det usikkerhet knyttet til en del av datagrunnlaget, men det er vurdert sammen med Greve Biogass for å få et best mulig estimat. Noen av verdiene er rimelig sikre, som hvor mye substrat som går inn og TS-innholdet i det, i tillegg er mengde oppgradert biogass som selges forholdsvis sikker. For denne analysen er spesielt TS-innholdet og gassproduksjonen sentral.

Alle de beregnede utslippene fra bruk av biogassressurser bygger på den valgte allokeringemetodikken. Dersom den økonomiske allokeringen der 90 % av utslippene tillegges biogass hadde blitt brukt, ville det gitt et betydelig høyere utslipp for påvirkningsindikatorene forsurening og eutrofiering i dyrkingssystemer med høyt forbruk av biogass til oppvarming. Oppvarming er det største bidraget til utslipp for disse påvirkningsindikatorene og selv med

en vekting på 27 % til biogass er disse utslippene tett oppunder (forsuring) eller over (eutrofiering) det de er ved tradisjonell ressursbruk i den sesongbaserte produksjonen. Utslippene som bidrar til global oppvarming er vesentlig lavere ved bruk av biogassressurser, med unntak av for biogjødsel. Det lave forbruket av gjødsel gjør at det har liten betydning for de samlede klimagassutslippene fra produksjonen. Selv ved bruk av en økonomisk allokering vil klimagassutslippene være lavere enn ved tradisjonell ressursbruk i de to analyserte systemene. I systemer med et lavere forbruk av biogass vil den økonomiske allokeringen gi et bedre resultat da en mindre klima- og miljøpåvirkning tillegges biogjødsel og CO₂ som vist i resultatene for forskningsspørsmål 1 for helårsproduksjon. Dette indikerer at resultatene for klimagassutslipp med ganske stor sikkerhet er vesentlig lavere ved bruk av biogassbaserte ressurser. For påvirkningsindikatorene forsuring og eutrofiering er det derimot mer usikkert hvordan resultatet blir.

Til tross for at SimaPro er et anerkjent og mye brukt dataverktøy kan det oppstå feil i beregningsverktøyet. Et studie gjennomført av Herrmann og Moltesen (2015) påviste vesentlig forskjeller mellom bruk av SimaPro og GaBi i de samme analysene. Med tanke på at dette er to anerkjente dataverktøy som brukes i stor grad, er det urovekkende at det ble oppdaget store forskjeller i resultatene. LCA blir stadig et mer brukt verktøy i beslutningsprosesser og feil i dataverktøyet kan gi store konsekvenser dersom resultatene brukes som beslutningsgrunnlag i innkjøpsprosesser (Herrmann & Moltesen 2015).

Analysen er ikke gjennomført som en fullstendig LCA og den avdekker derfor ikke om bruk av biogassressurser i veksthusproduksjon fører til et problemskifte framfor en problemløsning. Ved å unngå utslipp i en del av verdikjeden kan økte utslipp oppstå andre steder, men effekter av disse valgene er ikke analysert. Det kan også føre til reduksjon i en miljøpåvirkning og økning i en annen (Brekke et al. 2017).

7.3 Realistisk anvendelse av resultatene

Dataene i denne analysen er basert på et enkelt biogassanlegg og tre ulike systemer for veksthusproduksjon. Det gjør at resultatene har en begrenset gyldighet utover de analyserte systemene. Med mål om at en større andel av husdyrgjødsel skal behandles i biogassanlegg vil tilgjengelig biogass også øke. Manglende stabilitet i distribusjonskjeden kan gjøre at det er behov for å øke anvendelsen og bruke biogass til nye typer formål. Med høyere avgifter på fossile brensler vil også biogass bli mer konkurransedyktig prismessig sammenlignet med

andre alternativer også til oppvarmingsformål (Norsk Gartnerforbund 2018). Det kan derfor tenkes at det vil være av interesse for både veksthusnæringen og biogassprodusenter å se på mulighetene for et samarbeid. Bruk av biogass og CO₂ gir i denne analysen de største reduksjonen i klimagassutslipp. Ved bruk er det også disse ressursene som vil gi produksjonen den største reduksjonen i utslipp. For å kunne gi konkrete anbefalinger bør klima- og miljøpåvirkninger fra flere energibærere og systemer vurderes.

Resultatene kan gi veksthusprodusenter en indikasjon på hvordan de kan forente at klima- og miljøpåvirkningene fra produksjonen vil endre seg dersom de tar i bruk biogassressurser. I praksis vil bruk av biogass trolig være den mest interessante ressursen da det kan fungere som et direkte substitutt for naturgass. Denne analysen kan også danne grunnlag for videre og mer detaljerte analyser. I tillegg viser resultatene at BBBLS pilotveksthuset har et forbedringspotensial når det gjelder materialforbruket. Med lukkede veksthus er veien muligens kort til konsepter som urbant landbruk der matproduksjon bryter med en del av de tradisjonelle forutsetningene. For alle slike systemer vil materialforbruket i bygningen være viktig for de samlede utslippene.

8. Konklusjon

Resultatene fra forskningsspørsmål 1 viser at klimagassutslippene fra norsk tomatproduksjon kan reduseres betraktelig dersom naturgass som energibærer byttes ut med biogass. CO₂ fra biogassproduksjonen gir også en stor besparelse i klimagassutslipp. I tillegg gir biologisk CO₂ et lavere bidrag til eutrofiering og forsuring. Bruk av biogjødsel derimot gir høyere klimagassutslipp enn tradisjonell gjødsling med mineralgjødsel. Det samlede bidraget til eutrofiering øker for sesongproduksjon ved bruk av biogassressurser.

I forskningsspørsmål 2 ble effekter av en alternativ veksthusbygning tatt til vurdering. Resultatene indikerer at en økt ressursbruk knyttet til infrastruktur er fornuftig i et klimaperspektiv, da det reduserer behovet for oppvarming som bidrar med større utslipp per produserte tonn tomat sammenlignet med det konstruksjonsmaterialene gjør. Ved bruk av biogassressurser i veksthuset vil det økte materialforbruket knyttet til BBBLS pilotveksthuset være inntjent i løpet av det syvende produksjonsåret. Andre produksjonsalternativ har i løpet av kortere tid et akkumulert utslipp som overgår BBBLS produksjonens utslipp.

Biogassressursenes potensiale for å kunne dekke en større andel av oppvarmingsbehovet og behovet for gjødsel i tomatproduksjon ble vurdert i forskningsspørsmål 3. Resultatene for transport viser at transportdistansen for biogassressursene ikke vil være en begrensning for klimanytten til et slikt system. I tillegg viser resultatene at det samlede behovet for biogass til oppvarming er 95 GWh som tilsvarer omtrent dobbelt så mye biogass som den totale produksjonen ved DMF.

9. Videre arbeid

Først og fremst bør det gjøres en økonomisk analyse av kostnadene knyttet til biogassbasert ressursbruk. Både med tanke på prisen på produktene, men også kostnader knyttet til transport og eventuelle endringer som må gjøres i veksthusbygningen. Her vil forventning om framtidig pris på biogassressurser og transport være viktig. Samtidig bør praktiske løsninger for gjennomføring av logistikk kartlegges. Muligheter som gårdsbaserte biogassanlegg og økt produksjon av biogass til gassnettet kan begge være mulige alternativer. Småskala biogassanlegg i tilknytning til et gartneri vil få et overskudd av gass på sommerstid. Det er derfor viktig med praktiske løsninger for utnyttelse av biogass sommerstid om dette skal bli en realitet.

I tillegg bør det gjøres analyser som ser på flere biogassanlegg for å danne et mer generelt resultat som kan brukes for å se på oppskalering med større sikkerhet. Da bør også flere metodiske tilnærminger for allokering gjennomføres og sammenlignes. En mer detaljert analyse som inkluderer flere påvirkningsindikatorer og en form for vekting eller normalisering vil kunne gi en bedre helhetsvurdering av ressursbruken.

For å kunne gjøre en vurdering av om dette er den beste bruken av produkter fra biogassproduksjonen bør det gjennomføres en analyse som sammenligner klima- og miljøpåvirkningen ved å bruke biogass i veksthus framfor i transportsektoren. En slik analyse bør også gjennomføres for CO₂ og biogjødsel, da utslipp knyttet til nitrogen og fosfor er spesielt viktig å ta i betraktning. I tillegg bør det gjøres forsøk i veksthus for å kartlegge hvordan utslippene knyttet til bruksfasen av gjødsel er i veksthus kontra ved bruk på andre jordbruksarealer. I den sammenheng bør effekten av disse endringene vurderes opp mot biogassanleggenes samlede miljøpåvirkning knyttet til produksjonen av produktene og alternative muligheter for substitusjon. Det bør gjøres analyser som sammenligner bruk av flere ulike energibærere i veksthusproduksjon. Det vil da være mulig å avgjøre om biogass er den energibæreren som egner seg best.

10. Referanser

- Almeida, J., Achten, W. M., Verbist, B., Heuts, R. F., Schrevens, E. & Muys, B. (2014). Carbon and water footprints and energy use of greenhouse tomato production in Northern Italy. *Journal of industrial ecology*, 18 (6): 898-908.
- Bauer, F., Persson, T., Hulteberg, C. & Tamm, D. (2013). Biogas upgrading—technology overview, comparison and perspectives for the future. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7 (5): 499-511.
- Blom, T. J., Straver, W. A., Ingratta, F. J., Khosla, S. & Brown, W. (2002). *Carbon Dioxide In Greenhouses*. Ontario: Ministry of agriculture, food and rural affairs. Tilgjengelig fra: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-077.htm#> (lest 24.01.17).
- Brekke, A., Soldal, E., Saxegård, S., Svanes, E. & Raadal, H. L. (2017). *Klimavirkninger av ikke-skogbasert bioenergi*. Oslo. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2017/rapport2017_48.pdf (lest 26.03.18).
- Bævre, O. A., Bø, Ø. L., Jelsa, R., Randeberg, E. & Verheul, M. (2006). *Energi til norske veksthus*. Tilgjengelig fra: http://www.bioforsk.no/ikbViewer/Content/26188/r_1_119_bevre.pdf (lest 07.02.18).
- Chiew, Y. L., Spångberg, J., Baky, A., Hansson, P.-A. & Jönsson, H. (2015). Environmental impact of recycling digested food waste as a fertilizer in agriculture—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 95: 1-14.
- Cuellar, A. D. & Webber, M. E. (2008). Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas. *Environmental Research Letters*, 3 (3): 034002.
- Curran, M. A. (red.). (2015). *Life Cycle Assessment Student Handbook*. New Jersey: Sciner Publishing LLC.
- Eco-innovation. (2012). *Project Information Sheet*. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/environment/eco-innovation/projects/sites/eco-innovation-projects/files/projects/documents/f2w2f_pis.pdf (lest 29.04.18).
- European Commission. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Greve Biogass. (2017). *Bærekraftig Biogass - Et Forskningsprosjekt finansiert av Forskningsrådet*. Tilgjengelig fra: <http://www.grevebiogass.no/media/1065/171204-prosjekt-baerekraftig-biogass.pdf> (lest 04.03.18).
- Guest, G., Bright, R. M., Cherubini, F. & Strømman, A. H. (2013). Consistent quantification of climate impacts due to biogenic carbon storage across a range of bio-product systems. *Environmental Impact Assessment Review*, 43: 21-30.
- Herrmann, I. T. & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86: 163-169.
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T. & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100 (22): 5478-5484.
- Huso, B., Kvalevåg, M., Rød, L. M., Reiersgård, I. A., Estenstad, E., Agerup, P. H., Kismul, A. H. & Furuberg, M. (2018). *Klimatiltak i jordbruket - gjennomgang av ordninger med støtte til klimatiltak på gårdsbruk*. Oslo. Tilgjengelig fra: https://www.regjeringen.no/contentassets/c3d8783f382e4df7bbe6bf7054be071a/klimatiltak-i-jordbruket_ferdig-rapport_220218.pdf (lest 14.04.18).

- Klima- og miljødepartementet. (2014). *Nasjonal tverrsektoriell biogasstrategi*. Tilgjengelig fra:
<https://www.regjeringen.no/contentassets/255fa489d18d46feb3f8237bc5c096f0/t-1545.pdf> (lest 23.02.18).
- Liedl, B. E., Cummins, M., Young, A., Williams, M. L. & Chatfield, J. M. (2004). *Liquid effluent from poultry waste bioremediation as a potential nutrient source for hydroponic tomato production*.: International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. 647-652 s.
- Luostarinen, S., Normak, A. & Edström, M. (2011). Overview of biogas technology. *Overview of Biogas Technology. Baltic manure WP6 Energy potentials*: 47.
- Lyng, K.-A., Modahl, I. S., Morken, J., Briseid, T., Vold, B. I., Hanssen, O. J. & Sørby, I. (2011). *Modeller for beregning av klimanytte- og verdikjedeøkonomi for biogassproduksjon*. . Tilgjengelig fra: <https://www.ostfoldforskning.no/media/1177/2511.pdf> (lest 18.02.18).
- Maessen, H. & Verheul, M. (2017). *Vurdering av avrenningsvann i veksthusgrønnsaker*. Særheim NIBIO. Tilgjengelig fra:
https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2441050/NIBIO_RAPPORT_2016_2_90.pdf?sequence=1&isAllowed=y (lest 14.03.18).
- Massé, D. I., Croteau, F. & Masse, L. (2007). The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 98 (15): 2819-2823.
- Mattilsynet. (2017). *Revidering av gjødselforskriften – endringer som gjelder omsetning og bruk av enkelte avløpsslamprodukter*. Tilgjengelig fra:
https://www.mattilsynet.no/planter_og_dyrking/gjodsel_jord_og_dyrkingsmedier/organisk_gjodsel_jordforbedringsmidler_og_dyrkningsmedier/revidering_av_gjodselva_reforskriften_endringer_som_gjelder_omsetning_og_bruk_av_enkelte_avlopsslamp_produkter.26701 (lest 04.04.18).
- Modahl, I. S., Lyng, K.-A., Stensgård, A., Saxegård, S. A., Hanssen, O. J., Møller, H., Arnøy, S., Morken, J., Briseid, T. & Sørby, I. (2016). *Biogassproduksjon fra matavfall og møkk fra ku, gris og fjørfe. Status 2016 (fase IV) for miljønytte for den norske biogassmodellen BioValueChain*.: Østfoldforskning Tilgjengelig fra:
<https://www.ostfoldforskning.no/media/1703/or-3416-bvc-biogassmodell-fase-iv-2016-versjon-3-aapen.pdf> (lest 11.04.18).
- Morken, J., Sørby, B., Sørby, I., Birkeland, K. & Sakshaug, S. (2007). Bruk av bioenergi i landbruket . Er det lønnsomt å bygge gårdsbiogassanlegg, og hvilke fordeler kan bonden og samfunnet oppnå?
- Möller, K. & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12 (3): 242-257.
- Norsk Gartnerforbund. *Veksthuset* Tilgjengelig fra: <http://www.ngfenergi.no/veksthuset> (lest 07.05.18).
- Norsk Gartnerforbund. (2018). *Avgiftshopp svært alvorlig for gartner næringen*. Tilgjengelig fra: <http://www.gartnerforbundet.no/frykter-kraftig-avgiftshopp-for-gartner-naeringen/> (lest 20.04.18).
- Perez, M., Rodriguez-Cano, R., Romero, L. & Sales, D. (2006). Anaerobic thermophilic digestion of cutting oil wastewater: effect of co-substrate. *Biochemical Engineering Journal*, 29 (3): 250-257.

- Qian, T., Dieleman, J., Elings, A., De Gelder, A., Marcelis, L. & Van Kooten, O. (2009). *Comparison of climate and production in closed, semi-closed and open greenhouses*. International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys2009 893. 807-814 s.
- Raadal, H. L., Schakenda, V. & Morken, J. (2008). *Potensialstudie for biogass i Norge*. Tilgjengelig fra: <http://www.biogassostfold.org/wp-content/uploads/Potensialstudie-for-biogass-i-Norge.pdf> (lest 20.03.18).
- Regjeringen. (2016). *Norge har ratifisert Parisavtalen*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-har-ratifisert-parisavtalen/id2505365/> (lest 29.03.18).
- Rehl, T., Lansche, J. & Müller, J. (2012). Life cycle assessment of energy generation from biogas—Attributional vs. consequential approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (6): 3766-3775.
- Sand, A. (2016). *CO2 behov*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngfenergi.no/node/196> (lest 17.02.18).
- Sand, A. (2018). *Norsk veksthusproduksjon* (13.03.18).
- Saxegård, S. & Baxter, J. (2016). *Resource recovery and life cycle assessment in co-treatment of organic waste substrates for biogas versus incineration value chains in Poland and Norway*. Tilgjengelig fra: <https://www.ostfoldforskning.no/media/1139/or0616-biotenmare-wp4-and-the-owstt-model.pdf> (lest 01.04.18).
- Schievano, A., D'Imporzano, G., Salati, S. & Adani, F. (2011). On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance. *Bioresource technology*, 102 (17): 7737-7744.
- Smith, J., Abegaz, A., Matthews, R. B., Subedi, M., Orskov, E. R., Tumwesige, V. & Smith, P. (2014). What is the potential for biogas digesters to improve soil carbon sequestration in Sub-Saharan Africa? Comparison with other uses of organic residues. *Biomass and Bioenergy*, 70: 73-86.
- Statistisk sentralbyrå. (2008). *Veksthus og planteskoler, 2006. I: Statistisk sentralbyrå* Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/statistikker/veksthus/aar/2008-05-15#content> (lest 26.01.18).
- Stensgård, A. E., Saxegård, S. A., Lyng, K.-A. & Hanssen, O. J. (2017). *Følgeforskning Den Magiske Fabrikken: Miljø- og økonomianalyse*, OR.24.17
- Stoknes, K., Scholwin, F., Krzesiński, W., Wojciechowska, E. & Jasińska, A. (2016). Efficiency of a novel "Food to waste to food" system including anaerobic digestion of food waste and cultivation of vegetables on digestate in a bubble-insulated greenhouse. *Waste Management*, 56: 466-476.
- University of California San Diego. (2018). *The keeling curve*. Tilgjengelig fra: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/> (lest 16.03.18).
- Verheul, M. J. & Thorsen, S. M. (2010). *Klimagassregnskap for norske veksthusprodukter*. Tilgjengelig fra: <https://www.landbruksdirektoratet.no/no/dokumenter/publikasjoner/attachment/12587?ts=12d08b3c820&download=true> (lest 17.01.18).
- Williams, A., Audsley, E. & Sandars, D. (2006). *Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities: Main Report*. Defra Research Project IS020. Bedford: Cranfield University and Defra.

- Zarei, M. J., Kazemi, N. & Marzban, A. (2017). Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.
- ZERO. (2009). *Reduksjon av utslipp av klimagasser fra veksthusnæringen*. I: ZERO (red.). Tilgjengelig fra: <https://www.zero.no/wp-content/uploads/2016/05/reduksjon-av-utslipp-av-klimagasser-fra-veksthusnaeringen.pdf> (lest 10.04.18).



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway