

Pyrolyse af husdyrgødning i et livscyklusperspektiv



Magnus Bo Karlsson

HumTek bachelorprojekt
Studienummer - 64061
Vejleder - Tobias Pape Thomsen
Juni 2020



Tak til:

Henrik Hauggaard-Nielsen

Lasse Røngaard Clausen

Claus Dalsgaard Jensen

Indhold

1 Abstract	2
2 Indledning	3
3 Projektdesign	5
3.1 Projektdesign	5
3.2 Videnskabsteori	6
3.3 HumTek-dimensioner	6
4 Metode	8
4.1 Goal and scope	8
4.2 Life Cycle Inventory	11
4.3 Impact assessment	15
5 Resultater	17
5.1 Samlede resultater	17
5.2 Baggrund for reduktionen	19
5.3 Nationalt potentiale	20
6 Følsomhedsanalyse	23
6.1 Opbevaring og markemissioner	23
6.2 Tidsdimension	25
6.3 Energisystem	27
6.4 Varme fra pyrolyse	30
6.5 Samlet vurdering	30
7 Perspektivering	32
7.1 Fosforproblematikken	32
8 Konklusion	34
8.1 LCA-resultater	34
8.2 Systemiske perspektiver	34
9 Litteratur	35

1 Abstract

In this study the potential for reduction of greenhouse gasses from the Danish agricultural sector by the implementation of pyrolysis in manure management is evaluated. Using *Life Cycle Assessment* Carbon Footprints of the following four manure management systems are calculated based on the functional unit *management of 1 ton of pig manure*:

Ref 1: Manure is applied directly to soil

Ref 2: Manure is used for biogas production then applied to soil

Scen 1: Manure separated in liquid and fibrous fractions. The fibrous fraction is used for pyrolysis and biochar is applied to soil. The liquid fraction is applied directly to soil

Scen 2: Manure is used for biogas production then separated in liquid and fibrous fractions. The fibrous fraction is used for pyrolysis and biochar is applied to soil. The liquid fraction is applied directly to soil

Combined, the two reference systems represent the current manure management system in Denmark where 20% of all manure is used for biogas production. A Carbon Footprint of 167 kg CO₂e per ton manure was found for this system. This functions as the basis of comparison for the two pyrolysis scenarios.

The Carbon Footprint of Scen 1 and Scen 2 was found to be 87 and 121 kg CO₂e per ton manure representing a 48% and 27% reduction compared to the current manure management, respectively. The main causes of the reduction are reduced emissions of methane from storage and CO₂ from field processes.

Using these Carbon Footprints reduction potentials were calculated assuming implementation of the pyrolysis scenarios for the total amount of pig- and dairy manure in Denmark. A potential reduction of 3.7 mio ton CO₂e for Scen 1 and 2.1 for Scen 2. This corresponds to 34% and 19% of the total emissions from the Danish agricultural sector.

2 Indledning

Klimaforandringer repræsenterer i dag en voksende trussel som følge af den stigende koncentration af drivhusgasser i atmosfæren forårsaget af menneskelig aktivitet (IPCC, 2018). I løbet af det sidste årti er det politiske fokus på denne problemstilling steget markant. Dette er kommet til udtryk ved en række ambitiøse målsætninger på alle niveauer af politisk samarbejde. I Danmark nåede Folketinget december 2019 en aftale om at skabe bindende klimalovgivning med det ambitiøse mål om 70% reduktion af emissioner inden 2030 og CO₂-neutralitet inden 2050 (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, n.d.). Klimaloven skaber behov for øjeblikkelig og effektiv reduktion af emissioner på tværs af alle sektorer, hvis denne målsætning skal realiseres.

I Danmark udgør landbrugssektoren 22% af de samlede nationale emissioner. Landbrugssektoren er dermed efter energi- og transportsektorerne den største kilde til drivhusgasemissioner i landet (Nielsen, 2019). I 2020 er der ca. 220 svin per 100 indbyggere i landet (Danmarks Statistik, 2020). Denne produktion medfører en enorm mængde husdyrgødning, som anvendes på landbrugsjorden. Dette resulterer i at gyllehåndtering og markemissioner sammenlagt udgør mere end to tredjedele af emissionerne i sektoren (Nielsen, 2019). Derudover opstår store udfordringer i forbindelse med næringsstofkredsløbet på grund af den geografisk skæve fordeling af husdyrproduktion i Danmark (Poulsen, 2019). Disse processer er derfor centrale at arbejde med for at nå de politiske målsætninger.

De dominerende tiltag til reduktion af emissioner fra gyllehåndtering er i dag forsuring og køling af gylle i stalden samt overdækning af opbevaringstanke. Derudover vurderes stort potentiale ved øget anvendelse af gylle til biogas (Olesen, 2018). I denne rapport undersøges reduktionspotentialet ved implementeringen af den frembrydende bioenergiteknologi pyrolyse i gyllehåndteringen. Pyrolyse er en bred betegnelse for den termokemiske nedbrydelse af biomasse til biokul. Ved opvarmning af biomasse til temperaturer mellem 300 og 700 grader frigives flygtige stoffer og gasser betegnet pyrolysegas. Under normale forhold antændes gassen i en forbrændingsreaktion, og det tilbageværende materiale omdannes til aske. Udføres processen i en iltfri atmosfære, er det muligt at udvinde pyrolysegassen og anvende den som energibærer og samtidig stabilisere kulstofindholdet i biomassen i form af biokul (Boateng et al., 2015).

Ved pyrolyse koncentrerer næringsstoffer og kulstof i biokullet, hvilket gør det velegnet som et jordforbedringsprodukt. I jorden er kulstoffet svært nedbrydeligt og kan opbevares i århundreder (Lehmann et al., 2015). Ud fra dette princip er det muligt at binde kulstof i biomasse og derefter fjerne det fra den biologiske cyklus ved pyrolyse.

Pyrolyse af husdyrgødning vurderes derfor at være et velegnet tiltag at undersøge i forbindelse med gyllehåndteringen i Danmark. I denne rapport anvendes metoden *Life Cycle Assessment* (LCA) til at beregne påvirkningen på landbrugets Carbon Footprint ved implementering af pyrolyse i gyllehåndteringen. Der arbejdes i projektet ud fra problemformuleringen:

Hvad er potentialet for at reducere landbrugets Carbon Footprint ved pyrolyse af husdyrgødning på national skala i Danmark?

3 Projektdesign

I dette afsnit beskrives det overordnede projektdesign i rapporten. Med udgangspunkt i problemformuleringen udvikles et konkret arbejdsspørgsmål, og det beskrives hvordan metoden LCA anvendes til at besvare dette spørgsmål. Derefter redegøres der for valg af videnskabsteoretisk grundlag, og forbindelsen mellem metode, videnskabsteori og projektets genstandsfelt diskuteres. Afslutningsvis beskrives, hvordan de tre HumTek-dimensioner er inddraget i projektet.

3.1 Projektdesign

For at besvare problemformuleringen opstilles to scenarier, hvor pyrolyse anvendes i gyllehåndteringen. De to scenarier fungerer som et alternativ til den nuværende gyllehåndtering. Problemformuleringen kan nu omformuleres til arbejdsspørgsmålet:

Hvordan påvirkes Carbon Footprint af det nuværende gyllehåndteringssystem, hvis de opstillede scenarier implementeres?

For at afdække dette er det både nødvendigt at forstå de to alternative systemer, men også det nuværende system. Derfor opstilles to referencesystemer, som tilsammen repræsenterer den nuværende gyllehåndtering. Disse fire systemer undersøges med metoden LCA. LCA er en metode til kvantificering af miljøpåvirkning i et livscyklusperspektiv. Med et livscyklusperspektiv garanteres, at den samlede påvirkning af et system på tværs af alle processer og faser indgår i vurderingen af systemet (Bjørn, 2018a). I dette projekt afgrænses brugen af metoden til at skabe modeller for Carbon Footprint af de fire systemer.

LCA-metoden er en iterativ proces. Gennem arbejdet med metoden udvikles flere iterationer, som fortolkes og videreudvikles. Efter første iteration af denne LCA udførtes en række ekspertinterviews, som havde til formål at validere de anvendte beregningsmodeller og datasæt og bestemme eventuelle svagheder eller fejl. Disse interviews fungerer som udgangspunkt for efterfølgende iterationer, og anvendes derudover som basis for valg af parametre, som undersøges i en følsomhedsanalyse.

Ud fra resultatet af denne LCA beregnes teoretiske reduktionspotentialer ved implementeringen af de to scenarier. Herved er det muligt at bestemme potentialet ved pyrolyse af husdyrgødning i Danmark, og dermed besvare problemformuleringen i projektet.

Igennem arbejdet med LCA-metoden opnås indsigt i flere aspekter af det undersøgte felt. I dette projekt diskuteres potentialet ved pyrolyse i forbindelse med næringsstofkredsløbet afslutningsvis i et perspektiveringsafsnit. Disse overvejelser har ikke nødvendigvis direkte forbindelse til projektets empiri, men vurderes at være en relevant tilføjelse til resultatet og en central problemstilling for fremtidige studier.

3.2 Videnskabsteori

Projektet tager udgangspunkt i et positivistisk videnskabsteoretisk grundlag. I positivismen anses udelukkende de konkrete sanseerfaringer, som mennesket kan opfatte at være genstandsfeltet for videnskaben. Kun gennem sanseerfaring har mennesket adgang til erkendelse om verden. Den *essens* eller *virkelighed* som ligger til grund for sanseerfaringer, er i positivismen uinteressant, da den aldrig kan beskrives ud fra direkte observation. Observationer er altså centrale for skabelsen af viden (Holm, 2018).

Videnskabeligt arbejde udføres med en positivistisk tilgang gennem objektive og teoriuafhængige observationer, som samles i et datasæt. Ud fra dette datasæt udledes generelle teorier og modeller for genstandsfeltet gennem induktion. Efterfølgende verificeres teorier gennem yderligere observationer. Videnskaben anses i et positivistisk perspektiv for at være kumulativ. Alle teorier, skabt med en positivistisk tilgang, bevises ud fra verifikationsprincippet, altså gennem direkte observation. Derfor kan nye teorier udvikles ud fra eksisterende, med vished om at de opfylder dette sandhedskriterie (Holm, 2018).

I arbejdet med LCA-metoden i dette projekt indsamles data fra flere kilder på eksempelvis gyllekomposition, landbrugspraksis og energiteknologier m.m. Dataindsamlingen er funktionelt lig observation i dette projekt. Her bliver den kumulative natur af videnskaben meget tydelig. Teorier og modeller for eksempelvis metanemissioner fra opbevaring af gylle anvendes i dette projekt i nye sammenhænge for at beregne Carbon Footprint af gyllesystemer. De anvendte modeller er baseret på direkte målinger og observationer og dermed verificeret ud fra det positivistiske sandhedskriterie.

Som nævnt anvendes ekspertinterviews til at verificere de udviklede modeller. Eksperternes individuelle erfaring indenfor deres respektive områder fungerer som et alternativ til direkte observationer. Ud fra disse interviews valideres de udviklede modeller, og justeringer udføres ud fra eventuelle kommentarer.

3.3 HumTek-dimensioner

I rapporten inddrages alle tre fagligt konstituerende dimensioner for HumTek. Med LCA-metoden undersøges potentialet for samspil mellem teknologi og samfundsmæssige faktorer. Specifikt undersøges potentialet ved implementering af pyrolyse i forbindelse med klimaproblematikken og de relaterede politiske målsætninger. Her inddrages dimensionen *Subjektivitet, Teknologi og Samfund*.

LCA-metoden forudsætter forståelse for og analyse af de teknologiske systemer og processer som modelleres. Gennem arbejdet med LCA opstilles modeller for miljøpåvirkningen af teknologiske systemer ud fra forståelse af individuelle teknologiske artefakters indre mekanismer og processer. Her inddrages dimensionen *Teknologiske Systemer og Artefakter*.

Modelleringen af teknologiske systemer i LCA tager udgangspunkt i skitseringen af systemdesign. Disse design udvikles og justeres igennem det iterative arbejde med metoden. Resultatet af en iteration skaber ny viden, som fortolkes og anvendes i næste iteration. Her inddrages dimensionen *Design og Konstruktion*.

4 Metode

I dette afsnit vil LCA metoden blive beskrevet. Afsnittet er opdelt i tre hoveddele: *Goal and scope*, *Life Cycle Inventory* og *Impact Assessment*. Disse afsnit beskriver de primære faser af arbejdet med LCA. I *Goal and scope* bliver det overordnede formål med denne LCA beskrevet. Derudover etableres de fire systemers systemdesign samt nogle grundregler for LCA'en. I *Life Cycle Inventory* bliver der redegjort for udvalgte dele af det beregningsmæssige arbejde, der udgør denne LCA. Det er ikke muligt at inkludere alle beregninger og beslutninger i dette afsnit af hensyn til omfang. De komplette beregninger kan findes i Appendix A. I *Impact assessment* beskrives, hvilken tilgang der er anvendt til beregning af Carbon Footprint af de fire systemer. Derudover beskrives de grundlæggende antagelser for, hvordan reduktionspotentialet af scenarierne er beregnet og illustreret.

4.1 Goal and scope

For at undersøge potentialet for at reducere landbrugssektorens emissioner fra gyllehåndtering er fire systemer udviklet:

- Ref 1: Gylle anvendes som gødning.
- Ref 2: Gylle anvendes til biogasproduktion, den afgassede gylle anvendes som gødning.
- Scen 1: Gylle adskilles i fast og flydende fraktion. Den faste fraktion tørres og stabiliseres ved pyrolyse, den flydende fraktion anvendes som gødning.
- Scen 2: Gylle anvendes til biogasproduktion, den afgassede gylle adskilles i fast og flydende fraktion. Den faste fraktion tørres og stabiliseres ved pyrolyse, den flydende fraktion anvendes som gødning.

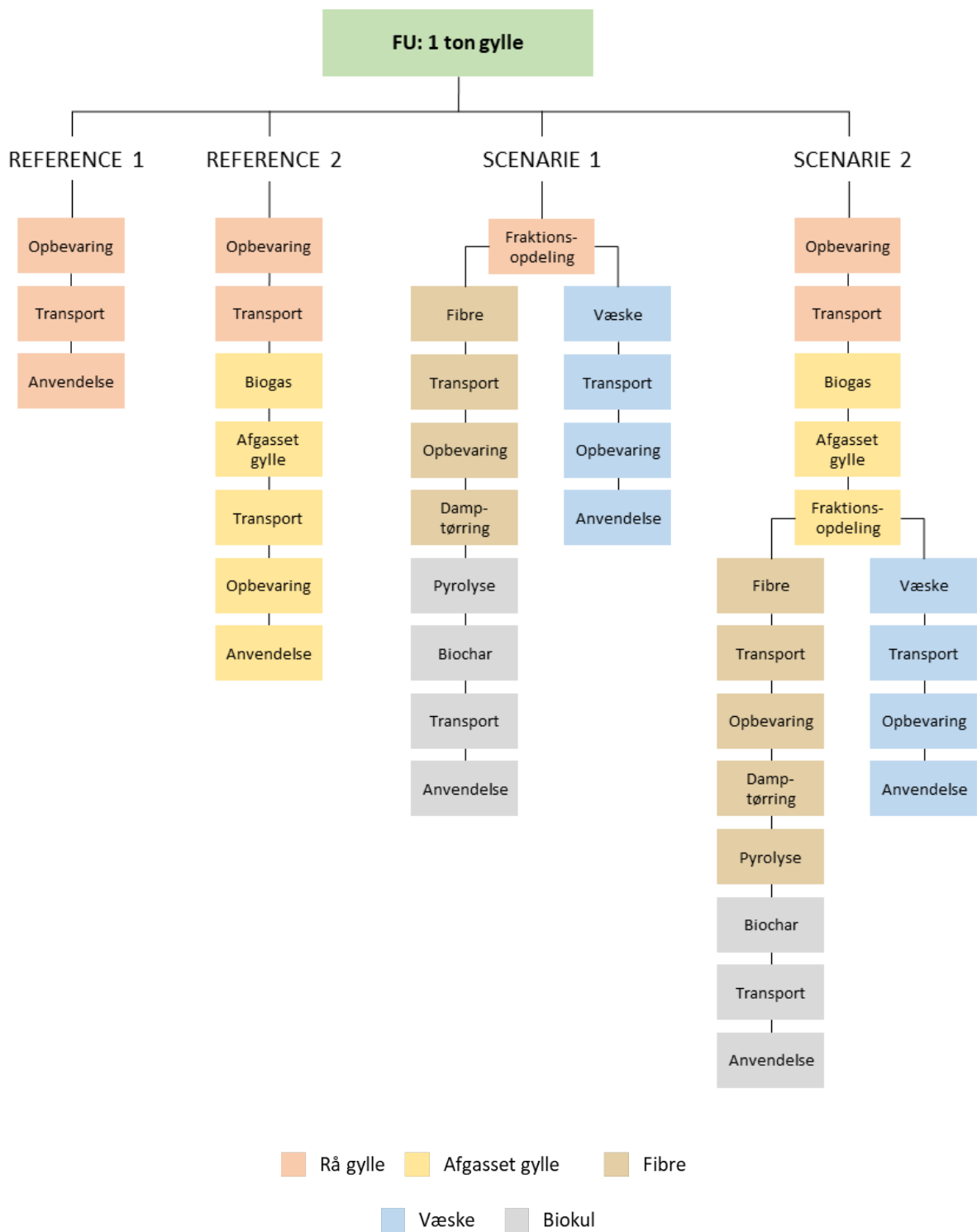
Alle fire systemdesign er visualiseret i Figur 1. I Danmark anvendes ca. 20% af gylle til biogasproduktion og ca. 80% anvendes direkte som gødning (Thomsen, 2020). De to referencesystemer fungerer sammen som status quo for gyllehåndtering i dag. Scen 1 har til formål at undersøge effekten af pyrolyse isoleret fra andre faktorer. Scen 2 har til formål at vurdere effekten af at inkludere biogasproduktion før pyrolyse af gyllen.

Denne LCA er udformet som et konsekvensorienteret studie. Det vil sige at konsekvensen af den foreslåede forandring i systemet undersøges. Dette har i praksis størst betydning for valg af baggrundsenergisystem, men er også relevant i forbindelse med beregning af gødningsværdier. Dette vil blive beskrevet nærmere i de kommende afsnit samt senere i følsomhedsanalysen.

Emissioner fra konstruktion af pyrolyseanlæg er ikke medregnet. Dette vurderes at være uden større betydning baseret på tidligere studier (Thomsen, 2018: 17).

Alle systemer er modelleret i LCA-software Easetech med brug af Easetech 2020 databasen (Clavreul et al., 2014). Modellerne er struktureret med udgangspunkt i materialeflows, der følger gyllen fra svin til mark.

Den funktionelle enhed (FU) anvendt i denne LCA er: *Håndteringen af 1000 kg svinegylle fra svin til mark*. Den funktionelle enhed sikrer, at alle systemer bliver vurderet ud fra samme udgangspunkt.



Figur 1: Systemdesign af de fire modellerede systemer.

4.2 Life Cycle Inventory

I Life Cycle Inventory fasen af en LCA skabes en oversigt over processer, materialeflows og massebalancer i systemet, som kan lede til emissioner eller reduktioner. Syv elementer er inkluderet i undersøgelsen:

- Opbevaring
- Transport
- Biogasproduktion
- Damptørring og pyrolyse
- Markemissioner
- Substitution af el og varme fra biogas- og pyrolyseprocesser
- Gødningsværdien af gyllen

Disse elementer udgør de processer, som gyllen gennemgår i de fire systemer, og er udvalgt baseret på tidligere studier af biogas og pyrolyse (Wesnæs & Wenzel, 2009; Hamelin et al., 2010; Thomsen, 2018).

Opbevaring refererer her udelukkende til opbevaring i udendørs opbevaringstank. Svinegylle opbevares i realiteten kortvarigt i stalden, før den pumpes til udendørs opbevaring. Opbevaring i stalden udgør de største emissioner af alle processer i alle fire systemer (Appendix A). Disse emissioner er inkluderet i Easetech modellerne for at tage højde for ændringer i gyllens komposition, men er ekskluderet fra de samlede resultater i denne LCA, da de er ens for alle systemer. Dette gør det lettere at illustrere forskelle mellem de fire systemer, hvilket er afgørende når resultaterne diskuteres. Det er dog vigtigt at understrege, at denne beslutning kan virke misvisende, med hensyn til hvilke processer der bør prioriteres i klimaindsatsen.

4.2.1 Datakilder, svinegyllensammensætning og massebalancer

Datakilder

Denne LCA er primært baseret på data fra de to sammenhængende rapporter *Life Cycle Assessment of Slurry Management Technologies* og *Life Cycle Assessment of Biogas from Separated slurry* (Wesnæs & Wenzel, 2009; Hamelin et al., 2010). Data fra dette studie fungerer som fundamentet for materialeflows og emissioner relateret til gyllehåndtering og biogasproduktion. Fremover henvises til dette studie som *biogasstudiet*. Dette suppleres med data på damptørring og pyrolyse fra LCA-studiet *Drying and pyrolysis of sludge – In a climate perspective* (Thomsen, 2018).

Svinegyllensammensætning

Gyllesammensætning har afgørende betydning for flere processer i de fire systemer. I denne LCA er der taget udgangspunkt i gyllesammensætningen, der anvendes i biogasstudiet. Denne er baseret på data fra *Normtal for husdyrgødning – 2008* (Poulsen, 2008), og antages derfor

at være repræsentativ for gennemsnitlig dansk gylle. Det er vigtigt at den anvendte gyllesammensætning er repræsentativ, da dette projekt omhandler nationalskala implementering af nye gyllehåndteringsmetoder.

Massebalancer

Mange emissionsberegninger er direkte forbundet med indholdet af eksempelvis kulstof i gyllen. Derfor er det nødvendigt at opstille materialeflows, der beskriver hvordan kompositionen af gyllen ændrer sig, når gyllen bevæger sig fra en proces til den næste. I Easetech anvendes *transfer coefficients* for hver proces til at bestemme den procentmæssige andel af hver delkomponent som føres videre i systemet. Massebalancer fra de to førnævnte studier er anvendt til skabe *transfer coefficients*, som kan overføres til Easetech og dermed bruges i denne LCA. En oversigt over massebalancer kan findes i Appendix A.

4.2.2 Opbevaring og markemissioner

Ud fra disse massebalancer er det muligt at beregne emissioner fra opbevaring og fra marken. Her er der med få undtagelser og justeringer taget udgangspunkt i beregningsmetoderne anvendt i biogasstudiet. Disse metoder er overvejende baseret på *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006).

I Tabel 1 nedenfor ses et eksempel på, hvordan emissioner fra udendørs opbevaringstank er beregnet i Ref 1. På tilsvarende måde er opbevaringsemissioner beregnet for afgasset gylle i Ref 2 og fiber- og væskefraktioner i Scen 1 og Scen 2. Derudover er emissioner fra marken beregnet for alle fire systemer. En oversigt over opbevarings- og markemissioner kan findes i Appendix A.

Reference 1	Storage kg	Method	Reference
CH4	1.936	VS ex animal * B0 (0.45 m3 CH4 per VS) * 0.67 kg/m3 CH4 * MCF > 1 month (10%)	Wesnæs & Wenzel, 2009, p. 164
CH4-C	1.449	0.75 C/CH4	
CO2-C	2.651	C-loss ex housing - CH4-C	
CO2	9.701	CO2-C * 3.66 CO2/C	Wesnæs & Wenzel, 2009, p. 164
NH3-N during	0.000		
NH3-N after	0.000		
NH3-N total	0.110	2% NH3-N/total-N ex housing	Wesnæs & Wenzel, 2009, p. 165
N2O direct	0.052	0.005 N2O-N/total-N ex animal * 1.57 N/N2O	Wesnæs & Wenzel, 2009, p. 165
N2O indirect	0.002	0.01 N2O-N / (NH3-N + NO-N) * 1.57 N2O/N	Wesnæs & Wenzel, 2009, p. 165
N2O total	0.054	direct + indirect	
NO2-N	0.033	NO2-N = direct N2O-N	Wesnæs & Wenzel, 2009, p. 165

Tabel 1: Eksempel på beregning af opbevaringsemissioner i Ref 1.

Tidsdimension:

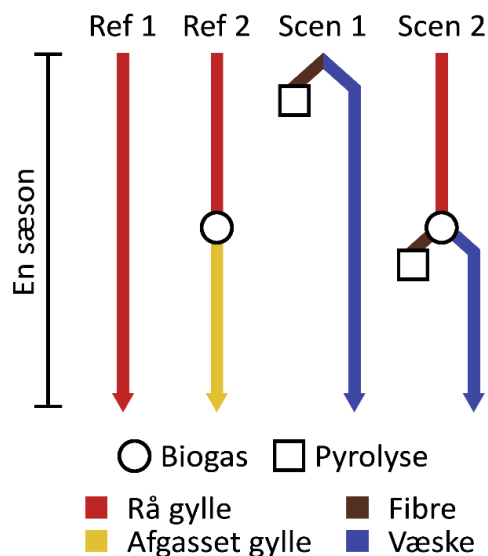
Denne LCA afviger fra biogasstudiet (Wesnæs & Wenzel, 2009; Hamelin et al., 2010) ved beregningen af tidsdimensionen ved opbevaring. I de fire systemer findes flere variationer af gylle, som bliver opbevaret. Der er forskellige emissionsfaktorer for rå og biogasbehandlet gylle, samt ikke-adskilt og fraktionsadskilt gylle. Derudover omdannes gyllen efter pyrolyse til biokul, som det antages opbevares uden emissioner (Thomsen, 2018). Derfor er det vigtigt at overveje, hvad der bliver opbevaret og hvor længe.

På grund af udfordringer i forbindelse med at oversætte data på opbevaring fra biogasstudiet til denne LCA, har det været nødvendigt at gøre en række antagelser omkring opbevaringstiden af de forskellige variationer af gylle. Den tilgængelige data på opbevaringsemissioner er ikke baseret på præcist definerede opbevaringstider. Metanemissioner udregnes eksempelvis med udgangspunkt i opbevaring i enten mindre eller mere end en måned. Dette besværliggør ethvert forsøg på at beregne effekten af at ændre på opbevaringstiden.

Her antages det derfor, at gyllen i alle systemer opbevares i flere måneder, indtil den transporteres til marken og anvendes som gødning. Dette kan i praksis tænkes som én sæson, hvor gyllen produceres i begyndelsen af en sæson og anvendes i begyndelsen af den næste.

- I Ref 1 bliver rå gylle opbevaret hele sæsonen.
- I Ref 2 antages det, at rå gylle opbevares den første halvdel af sæsonen, og biogasbehandlet gylle opbevares den sidste halvdel af sæsonen.
- I Scen 1 adskilles gyllen i væske- og fiberfraktioner, umiddelbart efter den produceres. Væskefraktionen opbevares hele sæsonen, mens fiberfraktionen omdannes til biokul ved pyrolyse umiddelbart efter fraktionsopdelingen.
- I Scen 2 opbevares rå gylle en halv sæson, før den bliver biogasbehandlet. Herefter bliver gyllen fraktionsopdelt. Væskefraktionen opbevares en halv sæson, hvorefter den bliver anvendt som gødning. Fiberfraktionen bliver omdannet til biokul ved pyrolyse umiddelbart efter fraktionsopdelingen.

Disse beskrivelser er illustreret i Figur 2.



Figur 2: Visualisering af tidsdimensionen i de fire systemer.

4.2.3 Biogasproduktion og pyrolyse

Biogasproduktion samt emissioner fra anvendelse af biogas er modelleret med udgangspunkt i biogasstudiet.

Massebalancer og emissioner relateret til damptørring og pyrolyse er baseret på data fra *Drying and pyrolysis of sludge – in a climate perspective* (Thomsen, 2018). Emissioner ved afbrænding af pyrolysegas er beregnet ud fra en antagelse om, at al kulstofindhold omdannes til CO₂. Detaljerede beskrivelser af begge systemer er inkluderet i Appendix A.

Data på energiindhold i gyllen er ikke inkluderet i biogasstudiet, men er nødvendigt for at bestemme, energiproduktet ved damptørring og pyrolyse. Der antages derfor en brændværdi på 16 MJ/kg tørstof, og at energiindholdet efterfølgende følger tørstoffet gennem systemerne (Wnetrzak et al, 2014).

Substitution af el og varme

Ved substitution af el og varme har baggrundsenergisystemet afgørende betydning for reduktionspotentialer af den producerede energi.

I denne LCA er baggrundsenergisystemet baseret på gennemsnitsværdier for dansk el og fjernvarme fra Energistyrelsen (Energistyrelsen, 2018a). Dette resulterer i relativt lave reduktionspotentialer ved energiproduktet fra biogasproduktion og pyrolyse. Dette skyldes, at dansk el og fjernvarme er produceret med forholdsvis lav klimapåvirkning sammenlignet med andre energisystemer.

På grund af betydningen af valg af baggrundsenergisystem, samt usikkerheden ved antagelsen om at al varme produceret ved pyrolyse kan anvendes i nær- eller fjernvarmenettet, undersøges betydningen af disse forhold nærmere i følsomhedsanalysen.

4.2.4 Gødningsværdi

Gødningsværdier er beregnet ud fra en antagelse om, at kunstgødning erstattes. Det betyder konkret, at indholdet af kvælstof, fosfor og kalium modregnes som undgået produktion af kunstgødning. EU-gennemsnitsværdier for emissioner fra produktion af kunstgødning fra Easetech 2020 databasen er anvendt til dette formål.

For fosfor og kalium antages det, at kunstgødning erstattes i forholdet 1:1. For kvælstof antages i stedet erstatningsforhold baseret på udnyttelsesprocenter angivet i *Vejledning om gødskning- og harmoniregler 2019-2020* (Landbrugsstyrelsen, 2019: 60). For rå svinegylle er udnyttelsesprocenten 75%. For den flydende fraktion af adskilt svinegylle er udnyttelsesprocenten 85%. Udnyttelsesprocenten af afgasset biomasse er afhængig af inputmaterialets udnyttelsesprocent. Det vil sige, at indholdet af kvælstof i gylle erstatter kunstgødning i forholdet 1:0,75 i Ref 1 og Ref 2 og i forholdet 1:0.85 i Scen 1 og Scen 2.

Der tages udgangspunkt i gødsknings- og harmonireglerne, da disse i praksis vil være bestemmende for, hvordan den enkelte landmand gøder. Der findes derimod ingen vejledning omkring brug af biokul til gødning. Det er her antaget, at indholdet af fosfor og kalium erstatter kunstgødning i forholdet 1:1, mens indholdet af kvælstof i biokullet ikke tilregnes nogen værdi.

4.2.5 Transport

Transport i de fire systemer er beregnet med Easetech 2020 databasens proces *Truck, 28t-32t, Euro5, highway*. Der transporteres mellem opbevaring, biogas, pyrolyse og mark. Alle distancer antages at være 50 km. Det vil sige at den samlede distance i Ref 1 er 50 km, mens den samlede distance i Scen 2 er 200 km. Selv denne forskel på 4x har dog meget begrænset betydning for de samlede resultater.

4.3 Impact assessment

Impact assessment er begrænset til beregning af CO₂e-emissioner for de fire systemer. Alle emissioner af metan og lattergas omregnes her til CO₂-ækvivalenter. På samme måde omregnes emissioner forbundet til forbrug og produktion af el og varme samt gødning til CO₂e. Til dette formål er Easetech Life Cycle Impact Assessment Method: *ILCD2011, Climate Change with LT; midpoint; GWP100; IPCC2007* anvendt.

Det kunne være relevant at undersøge andre impact kategorier i fremtidige studier. Især eutrofiering og udtømning af abiotiske ressourcer kunne være interessante at inkludere på grund af systemets påvirkning på fosforstrømme i landbruget.

4.3.1 Reduktionspotentialer

I de følgende afsnit vil reduktionspotentialer af de to pyrolysescenarier blive vurderet. Reduktionspotentialer er beregnet ud fra en antagelse om et totalt skift fra den nuværende gyllehåndtering til hvert af de to scenarier. Her er data på den årlige produktion af gylle i

Danmark fra *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget* anvendt (Olesen et al., 2018: 19).

Denne LCA undersøger udelukkende svinegylle. Reduktionspotentialet vurderes derfor først ud fra den årlige produktion af svinegylle. Svinegylle udgør dog kun 46% af al husdyrgødning mens kvæggylle udgør 49%. De resterende 5% stammer fra fjerkræ og andet (Olesen, 2018: 19). Det er derfor interessant at undersøge reduktionspotentialet, hvis systemet udvides til at inkludere kvæggylle. Til disse beregninger antages det, at reduktionspotentialet er proportionelt med tørstofindholdet i gyllen. Tørstofindholdet i kvæggylle (8,7%) er lidt højere end i svinegylle (6,6%) (Lund, 2019). Den opgjorte mængde af kvæggylle er derfor skaleret efter tørstofindholdet i beregningerne.

Reduktionspotentialet bliver opgjort i ton CO₂e og i procent af både landbrugets og Danmarks samlede årlige emissioner. På denne måde skabes et indtryk af potentialets størrelse. Data på årlige emissioner er baseret på *Denmark's national inventory report 2019* (Nielsen et al., 2019).

5 Resultater

I dette afsnit beskrives først de samlede resultater af denne LCA, derefter undersøges hvordan emissionerne reduceres i de forskellige systemer, og afslutningsvis diskuteres potentialet ved national implementering af pyrolyse.

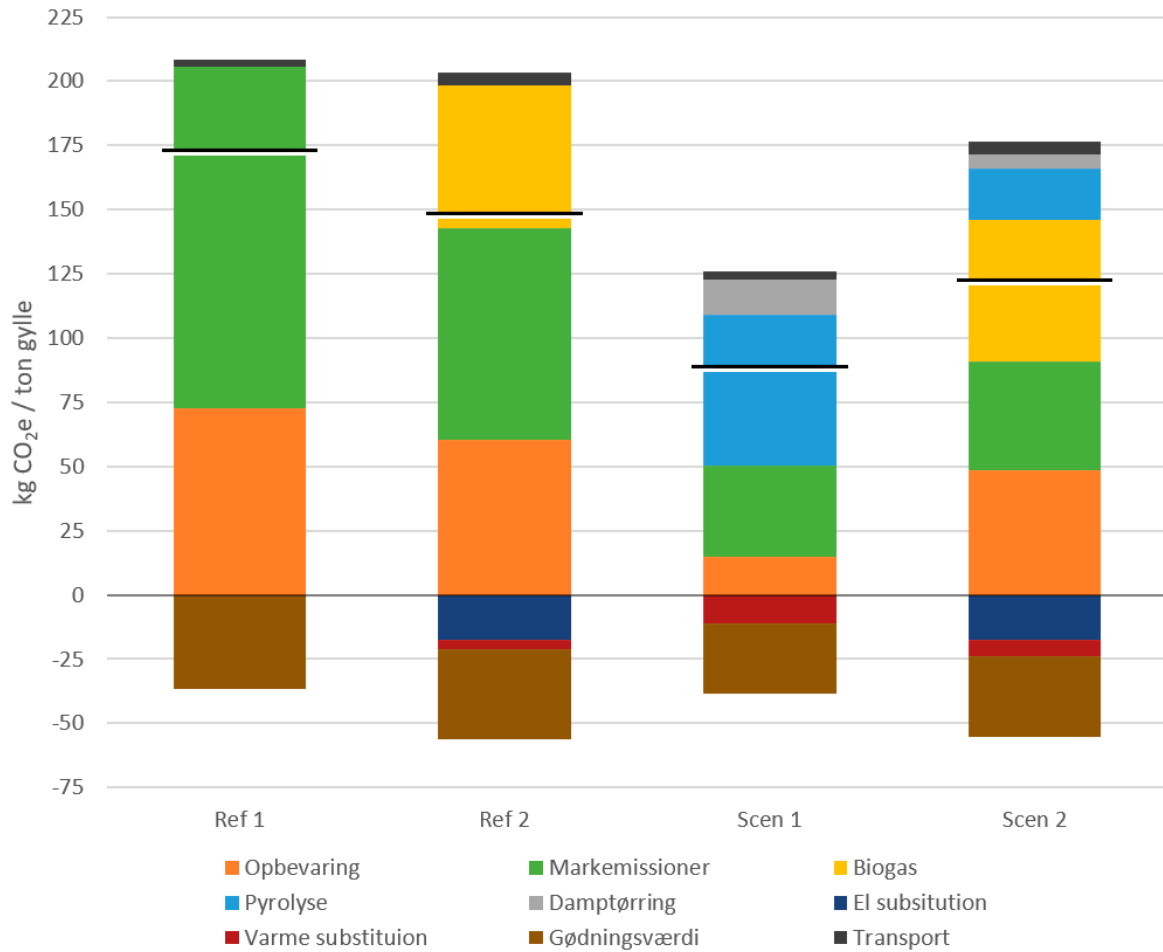
5.1 Samlede resultater

I Figur 3 er de samlede resultater illustreret, opgjort i kg CO_{2e} per ton gylle. Resultaterne er grupperet i ni kategorier:

- Opbevaring
- Markemissioner
- Biogas
- Pyrolyse
- Damptørring
- Transport
- El-substitution
- Varme-substitution
- Gødningsværdi

Disse grupperinger gør det lettere at overskue ligheder og forskelle mellem de fire systemer. Nogle detaljer går dog tabt ved denne forsimpning. Et resultatdiagram uden grupperinger kan findes i Appendix A. Emissioner i kategorierne *Biogas* og *Pyrolyse* stammer næsten udelukkende fra anvendelsen af den producerede gas til el- og varmeproduktion.

LCA resultater



Figur 3: Samlede resultater opgjort i kg CO₂e per ton gylle. Sort-hvide streger markerer den samlede sum i hvert system.

	Ref 1	Ref 2	Scen 1	Scen 2
kg CO₂e / ton gylle	172	147	87	121

Tabel 2: Den samlede sum af hvert system opgjort i kg CO₂e per ton gylle.

Ud fra resultaterne er det tydeligt, at opbevaring og markemissioner udgør en betydelig andel af de samlede emissioner i alle scenarier. Emissioner fra biogas udgør mere end en tredjedel af de samlede emissioner i både Ref 2 og Scen 2. Emissioner fra pyrolyse udgør omkring halvdelen af emissionerne i Scen 1, men kun ca. en sjettedel i Scen 2. Dette skyldes hovedsageligt, at næsten halvdelen af kulstofindholdet i gyllen udvindes ved biogasproduktion i Scen 2, før fiberfraktionen anvendes til pyrolyse. Dermed produceres mindre pyrolysegas, og emissioner fra anvendelse af gassen reduceres. Damptørring udgør

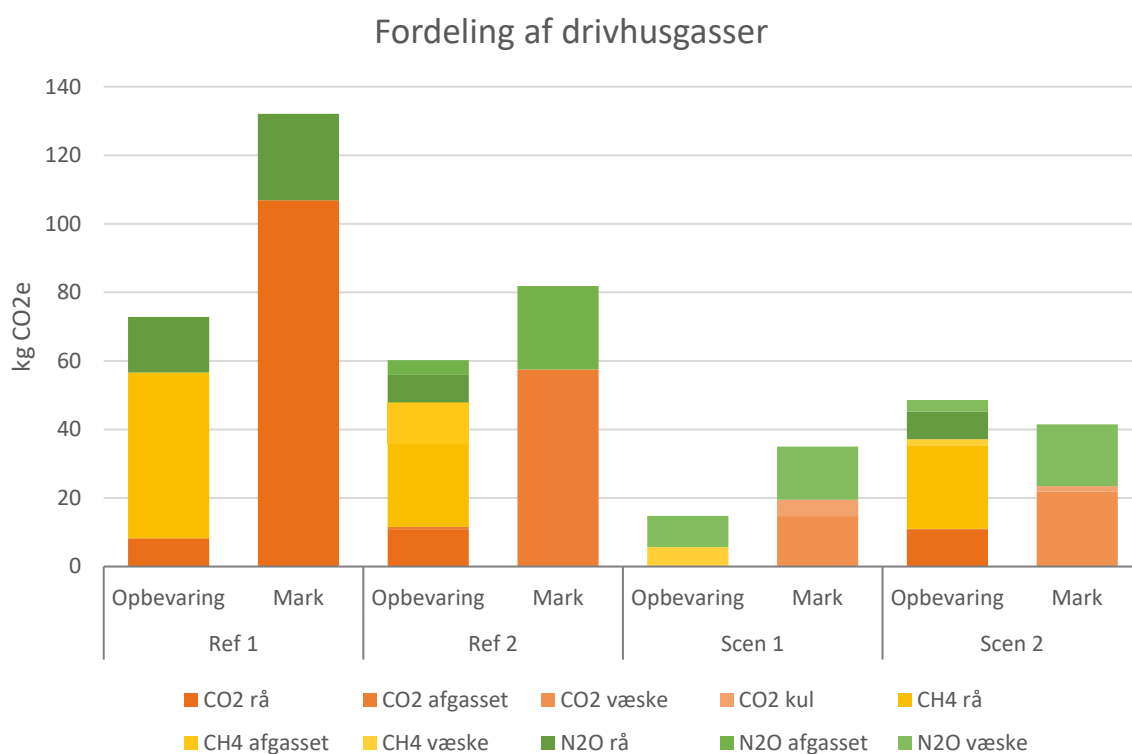
en relativt lille andel af de samlede emissioner, og transport er i alle scenarier næsten ubetydelig.

Ud af de negative emissioner udgør gødningsværdien størstedelen i alle systemer. Derudover udgør substitution af el den væsentligste påvirkning sammenlignet med substitution af varme. I Scen 1 udgør varmereproduktet fra pyrolyse en relativt lille andel af de negative emissioner.

5.2 Baggrund for reduktionen

Der sker en markant reduktion fra Ref 1 til Ref 2 og en yderligere reduktion fra Ref 2 til både Scen 1 og Scen 2.

Den største reduktion sker ved opbevaring og markemissioner, se Figur 4. Denne graf giver et tydeligt indblik i, hvordan reduktionspotentialet opstår i de forskellige systemer.



Figur 4: Fordelingen af CO₂-, metan- og lattergasemissioner fra opbevaring og markemissioner i de fire systemer opgjort i kg CO₂e.

5.2.1 Markemissioner

Ref 1 har de største emissioner fra både opbevaring og marken. I Ref 2 er biogasproduktion inkluderet. Dette ses tydeligst ved den store reduktion af CO₂-emissioner fra marken. Det skyldes at CO₂-emissioner fra marken er direkte forbundet med kulstofindholdet i gyllen. Ved biogasproduktion udvindes ca. halvdelen af kulstofindholdet i form af biogas, hvilket dermed leder til en halvering af CO₂-emissionen fra marken (Hamelin et al., 2010: 241).

I både Scen 1 og Scen 2 er pyrolyse inkluderet. Her adskilles gyllen i fiber- og væskefraktioner, og ca. 87% af kulstofindholdet ender i fiberfraktionen (Appendix A). Dette kulstof bliver efterfølgende termisk stabiliseret ved pyrolyse, og det antages at kun 10% bliver omdannet til CO₂ på marken i et 100 års perspektiv (Thomsen, 2018). På denne måde sker den drastiske reduktion af CO₂-emissioner fra marken, som er tydelig i Scen 1 og Scen 2.

5.2.2 Opbevaring

Den største reduktion af opbevaringsemissioner ses i Scen 1. Det skyldes at fraktionsopdelingen finder sted før opbevaringen. Dette adskiller Scen 1 fra de andre systemer. I alle andre systemer opbevares gyllen først i udendørstank, før enten biogasproduktion eller fraktionsopdeling.

Reduktionen af metanemissioner udgør her den væsentligste forskel. Metanemissioner under opbevaring er forbundet med indholdet af flygtige stoffer i gyllen. Ved fraktionsopdeling ender ca. 86% af flygtige stoffer i fiberfraktionen (Appendix A), som anvendes til pyrolyse umiddelbart derefter. Dermed bliver kun en lille andel af den oprindelige mængde flygtige stoffer omdannet til metan under opbevaringen af væskefraktionen.

Den næsten totale reduktion af CO₂-emissioner under opbevaring i Scen 1 hænger sammen med reduktionen af metanemissionen. CO₂ emissioner ved opbevaring af væskefraktionen er beregnet ud fra et estimat af forholdet mellem metan- og CO₂-emissioner under anaerobiske forhold (Hamelin et al., 2010: 214).

I både Ref 2 og Scen 2 er biogasproduktion inkluderet. Her sker også en mindre reduktion af opbevaringsemissionerne. Efter biogasproduktion antages en 50% reduktion af metanemissioner samt en 40% reduktion af de direkte lattergasemissioner (Hamelin et al., 2010: 264-266).

5.2.3 Samlet reduktion

De ovenstående afsnit beskriver, hvordan den væsentligste reduktion opstår. For at nå det samlede resultat skal emissioner ved anvendelsen af den producerede gas fra biogasproduktion og pyrolyse, samt de mindre emissioner fra damptørring og transport medregnes. Derudover skal de undgåede emissioner som følge af gødningsværdien, samt substitution af el og varme trækkes fra, for at opnå den samlede sum i de fire systemer som ses i Tabel 2.

5.3 Nationalt potentiale

Ud fra disse resultater er det nu muligt at bestemme Carbon Footprint ved håndteringen af ét ton svinegylle i hvert af de fire systemer. I dette afsnit undersøges potentialet, hvis håndteringen af den samlede gyllemængde i Danmark ændres. Dette kræver data på den årlige produktion af svinegylle. Derudover er det nødvendigt at bestemme andelen af gylle, som anvendes til biogasproduktion for at beregne et Carbon Footprint for nuværende system.

Der vises senere i afsnittet eksempler på beregning af reduktionspotentiale ved et skift til Scen 1. Samme metode anvendes for de resterende systemer, men er ikke vist her.

Disse beregninger antager en total omstilling af gyllehåndteringen i Danmark, som i realiteten naturligvis vil være begrænset af en række praktiske og økonomiske forhold. Derfor skal det følgende potentiale forstås som et teknisk eller teoretisk potentiale, som belyser mulighederne under de givne antagelser. Syddansk Universitet har i samarbejde med SEGES lavet lignende potentialeberegninger for biogasproduktionen i Danmark (Andersen, 2020).

5.3.1 Reduktionspotentiale ved pyrolyse af svinegylle

Olesen et al. (2018) har lavet en fremskrivning af mængden af husdyrgødning for 2015, 2020 og 2030. Deres data for 2020 kan ses i Tabel 3 nedenfor, grupperet i gylletyper.

2020	Mio ton
Kvæg	20,7
Svin	19,5
Andet	2,3

Tabel 3: Mængden af husdyrgødning i 2020 fordelt mellem kvæg svin og andet opgjort i mio ton.

Ud fra et estimat af andelen af husdyrgødning i biogasproduktion, baseret på data fra 37 biogasanlæg, anvendes omkring 20% af al dansk husdyrgødning til biogasproduktion (Thomsen, 2020). Med udgangspunkt i dette kan Carbon Footprint for den nuværende gyllehåndtering i Danmark beregnes. Ved at vægte resultatet af Ref 1 og Ref 2 med henholdsvis 80% og 20% opnås et samlet resultat på 167 kg CO_{2e} per ton svinegylle.

Ud fra dette Carbon Footprint udleder håndteringen af svinegylle i Danmark 3,3 mio ton CO_{2e} om året. Ved et skift til Scen 1 udledes i stedet 1,7 mio ton CO_{2e}. Det er et reduktionspotentiale på 1,6 mio ton CO_{2e}.

5.3.2 Reduktionspotentiale ved pyrolyse af kvæg- og svinegylle

Svinegylle udgør 46% af den samlede mængde husdyrgødning i Danmark, mens kvæggylle udgør 49%. Det er derfor interessant at undersøge reduktionspotentialet, hvis systemet udvides til at inkludere kvæggylle. Her antages det, at reduktionspotentialet er proportionelt med tørstofindholdet i gyllen. Mængden af kvæggylle er derfor skaleret som beskrevet i afsnit 4.3.1.

Ud fra denne antagelse opnås et reduktionspotentiale for kvæggylle på 2,2 mio ton CO_{2e} ved skift til Scen 1. Det samlede reduktionspotentiale ved pyrolyse af både kvæg- og svinegylle er dermed 3,7 mio ton CO_{2e}.

5.3.3 34% reduktion af landbrugets emissioner

I nedenstående tabel sammenlignes de beregnede reduktionspotentialer med både landbrugets og Danmarks samlede emissioner. Derudover er reduktionspotentialet ved skift til Scen 2 og Ref 2 inkluderet ud fra den samlede mængde af kvæg- og svinegylle i Danmark. De årlige emissioner fra landbruget og Danmark er henholdsvis 11 og 50 mio ton CO₂e (Nielsen et al., 2019). Bemærk at beregninger med kvæggylle inkluderet, er præget af nogen usikkerhed, da denne LCA er baseret på svinegylle.

	mio ton CO₂e	% af landbrugsemissioner	% af DK- emissioner
Svin - Scen 1	1,6	14	3,1
Kvæg og svin - Scen 1	3,7	34	7,5
Kvæg og svin - Scen 2	2,1	19	4,3
Kvæg og svin - Ref 2	0,9	8	1,9

Tabel 4: Reduktionspotentialer ved implementering af de fire systemer opgjort i mio ton CO₂e og i procent af landbrugets samt Danmarks samlede emissioner.

Det er altså muligt at reducere landbrugets emissioner med 34%, svarende til 7,5% af Danmarks samlede emissioner, ved at implementere pyrolyse i håndteringen af kvæg- og svinegylle. Anvendes samme beregningsmetode for biogas, opnås et reduktionspotentiale på kun 8% af landbrugets emissioner til sammenligning. Der er altså et enormt potentiale ved pyrolyse af husdyrgødning i et klimaperspektiv, som bør undersøges videre fra flere vinkler!

6 Følsomhedsanalyse

I dette afsnit vil følsomheden af en række parametre og antagelser blive undersøgt. Formålet er at øge gennemsigtigheden i rapporten ved at vurdere robustheden af resultaterne. Derudover er følsomhedsanalysen en mulighed for at tilføje endnu et detaljelag, som giver indsigt i, hvordan resultaterne kunne se anderledes ud under ændrede omstændigheder.

Ved første iteration af denne LCA udførtes en række ekspertinterviews, som havde til formål at validere de anvendte beregningsmodeller og datasæt. Tre interviewpersoner blev udvalgt:

Henrik Hauggaard-Nielsen, professor på Institut for Mennesker og Teknologi på Roskilde Universitet, er udvalgt på grund af hans profil, som er centreret omkring systemiske løsninger indenfor klima- og energiomstilling. Hauggaard-Nielsen forsker i øjeblikket med fokus på bioenergiteknologi samt næringsstofkonservering og kulstoflagring med et mål om øget sammenhæng mellem energi- og fødevarer systemer.

Lasse Røngaard Clausen, lektor på Institut for Mekanisk Teknologi på Danmarks Tekniske Universitet, er udvalgt på grund af hans erfaring med termodynamiske modeller af pyrolysesystemer.

Claus Dalsgaard Jensen er forsknings- og administrativ assistent på Danmarks Tekniske Universitet og tidligere procesingeniør hos AquaGreen. AquaGreen er en udviklingsvirksomhed, som laver anlæg til damptørring og pyrolyse af spildevandsslam. Jensen er udvalgt på grund af hans direkte erfaring med kommerciel brug af pyrolyse i AquaGreen.

De undersøgte parametre er hovedsageligt udvalgt på baggrund af kommentarer fra disse ekspertinterviews. Ud fra de nye parametre udregnes Carbon Footprint for de fire scenarier samt den procentvise afvigelse fra de oprindelige Carbon Footprints. I nogle tilfælde beregnes derudover nye reduktionspotentialer ud fra beregningsmetoden beskrevet i afsnit 4.3.1.

6.1 Opbevaring og markemissioner

Ud fra en kommentar fra Henrik Hauggaard-Nielsen er det valgt at undersøge opbevaring og markemissioner baseret på alternative data. Hauggaard-Nielsen påpeger at lattergasemissioner fra marken er præget af stor variabilitet. Både emissioner fra marken og opbevaring er i denne LCA modelleret ud fra *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006).

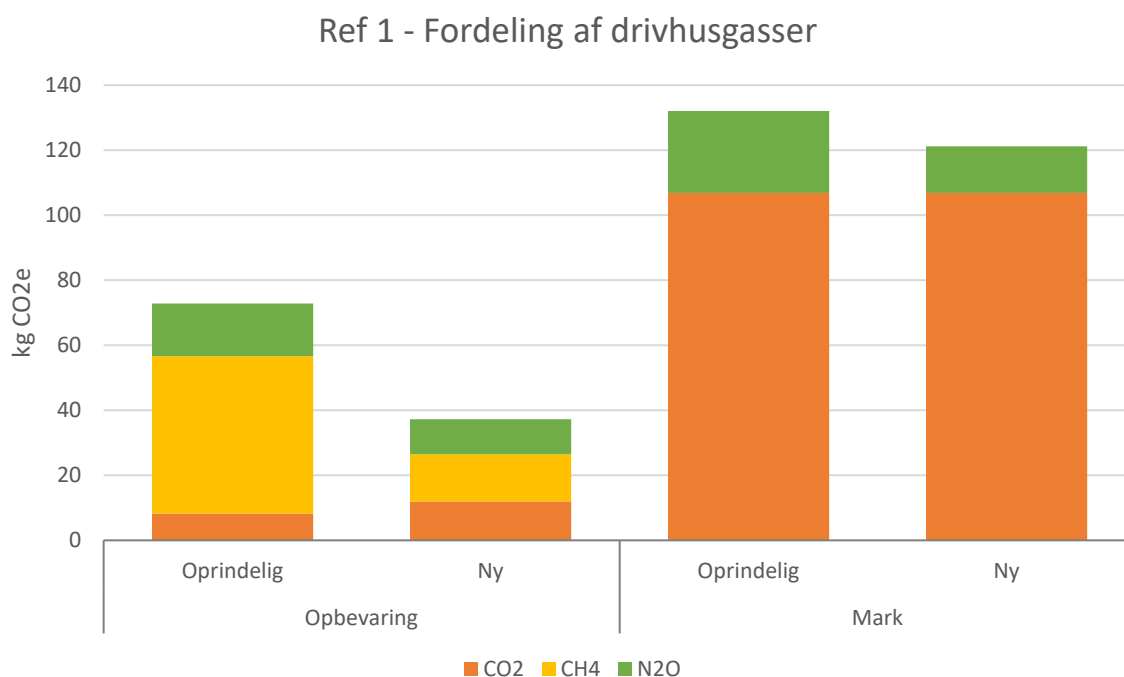
I studiet *Greenhouse gas emissions from pig slurry during storage and after field application in northern European conditions* (Rodhe et al., 2011) måles metan- og lattergasemissioner fra opbevaring og marken på pilotskala i Sverige. Ud fra disse målinger beregner Rodhe et al. emissionsfaktorer, og sammenligner dem med IPCC guidelines.

I nedenstående tabel er Carbon Footprint samt procentvis afvigelse fra de oprindelige resultater, som findes i Tabel 2, beregnet med brug af emissionsfaktorer fra Rodhe et al. (2011).

	Ref 1	Ref 2	Scen 1	Scen 2
Carbon Footprint	125	120	74	104
Afvigelse i %	-27	-18	-15	-14

Tabel 5: Carbon Footprint og afvigelse i procent ved brug af data på opbevaring og markemissioner fra Rodhe et al. (2011).

Den største afvigelse ses i Ref 1, da dette scenarie næsten udelukkende består af emissioner fra opbevaring og marken. Her ses en reduktion på 27%. De alternative emissionsfaktorer har altså betydelig påvirkning på de samlede resultater. Effekten på fordelingen af drivhusgasser fra opbevaring og marken er illustreret i Figur 5 nedenfor.



Figur 5: Påvirkningen på fordelingen af CO₂-, metan- og lattergasemissioner fra opbevaring og markemissioner ved brug af alternative data på opbevaring og markemissioner.

Det er hovedsageligt lavere metanemissioner fra opbevaring, som er årsag til afvigelsen. Dette skyldes den beregnede metanemissionsfaktor på 3% fra Rodhe et al., som er væsentligt lavere end IPCC standardværdien på 10%. Derudover sker en mindre reduktion af lattergasemissioner fra både opbevaring og marken. Med disse ændringer falder reduktionspotentialet ved skift til Scen 1 fra de oprindelige 34% til 21% af de danske landbrugsemissioner ud fra samme beregningsmetode som i afsnit 4.3.1.

De alternative emissionsfaktorer fra Rodhe et al. peger altså i retning af lavere emissioner sammenlignet med IPCC standardværdier ud fra eksperimentelle målinger fra Sverige. Aarhus Universitet udgav i april 2020 derimod nye beregningsmodeller for opbevaring af husdyrgødning, som peger på højere emissioner end IPCC standardværdier (Petersen & Gyldenkerne, 2020). Dette område er altså stadig præget af stor usikkerhed, og resultaterne bør derfor fortolkes i lyset af dette.

6.2 Tidsdimension

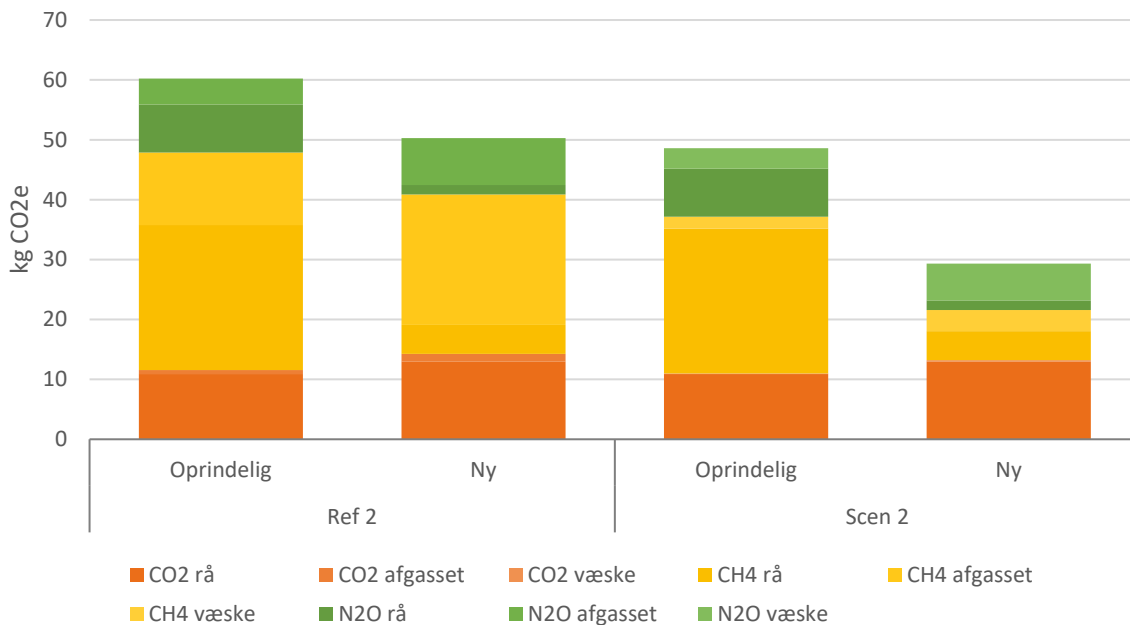
Emissionsfaktorer ved opbevaring er afhængige af om gyllen er biogasbehandlet eller fraktionsopdelt som beskrevet i afsnit 4.2.2. Opbevaringsperioder i scenarier med biogasproduktion er i denne LCA defineret ud fra en antagelse om, at gyllen opbevares 50% af tiden før, og 50% efter den anvendes til biogasproduktion. Her undersøges betydningen af at antage, at gyllen opbevares 10% af tiden før biogasproduktion og 90% efter biogasproduktion. Påvirkningen af den nye antagelse på Carbon Footprint samt den procentvise afvigelse fra de oprindelige resultater er opgjort i Tabel 6.

	Ref 1	Ref 2	Scen 1	Scen 2
Carbon Footprint	172	137	87	102
Afvigelse i %	0	-7	0	-16

Tabel 6: Carbon Footprint og afvigelse i procent ved alternative opbevaringsperioder.

Det er naturligvis kun Ref 2 og Scen 2, som er påvirket af denne ændring, da kun de indeholder biogasproduktion. Her ses den største påvirkning i Scen 2 på 16%. I Figur 6 ses, hvordan fordelingen af emissioner ved opbevaring påvirkes af ændringen.

Opbevaringsemissioner



Figur 6: Påvirkningen på fordelingen af CO₂-, metan- og lattergasemissioner fra opbevaring og markemissioner ved alternative opbevaringsperioder.

Ændringen har størst effekt i Scen 2, da opbevaring af rå gylle bliver erstattet af opbevaring af væskefraktion, som har en væsentligt lavere emissionsfaktor. I Ref 2 erstattes opbevaring af rå gylle i stedet med opbevaring af afgasset gylle, som til sammenligning kun har en lidt lavere emissionsfaktor.

Den oprindelige antagelse omkring opbevaringsperioder er ikke baseret på data på opbevaringstider før og efter biogasproduktion. Denne data findes ikke. Derudover er manipulation af opbevaringstid ved brug af IPCC's beregningsmetoder begrænset til valget mellem mindre eller mere end én måneds opbevaring. Til fremtidige studier vil det være relevant at skabe data på opbevaringstider for gylle før og efter biogasproduktion. Derudover er der behov for mere detaljerede beregningsmodeller for, hvordan opbevaringsemissioner udvikler sig over tid.

De justerede beregningsmetoder for metanemissioner ved opbevaring af husdyrgødning fra Aarhus Universitet nævnt i det forrige afsnit, er et forsøg på at løse blandt andet dette problem. Med disse modeller kan emissioner beregnes på timebasis, baseret på målinger fra den enkelte bedrift (Petersen & Gyldenkærne, 2020). Derved vil det være muligt at øge præcisionen af beregningerne markant sammenlignet med de begrænsede IPCC-beregningsmetoder.

6.3 Energisystem

Valg af baggrundsenergisystem har stor betydning for systemer, som producerer el og varme til substitution. Her undersøges betydningen af at anvende alternative baggrundsenergisystemer. Det oprindelige baggrundsenergisystem er baseret på gennemsnitsværdier for CO₂e-emissioner for dansk el og varme fra Energistyrelsen (Energistyrelsen, 2018a). I LCA-studier med en konsekvensorienteret tilgang som dette er det ofte mere passende at anvende marginale processer. Derfor undersøges påvirkningen af at anvende marginale processer her.

Marginale processer er de processer, som erstattes ved implementeringen af nye processer. Her skelnes mellem kortsigtede og langsigtede marginaler. En kortsigtet marginal vil være de processer, som kan erstattes med det samme ved implementeringen af en ny proces, mens en langsigtet marginal vil være de processer, som ikke vil blive implementeret fremover som konsekvens af en ny proces (Bjørn, 2018b).

Her er kul valgt som kortsigtet marginal. El og varme er modelleret med Easetech 2020 databasens External processes for kul. Carbon Footprint og afvigelse i procent for den kortsigtede marginal er opgjort i Tabel 7 nedenfor.

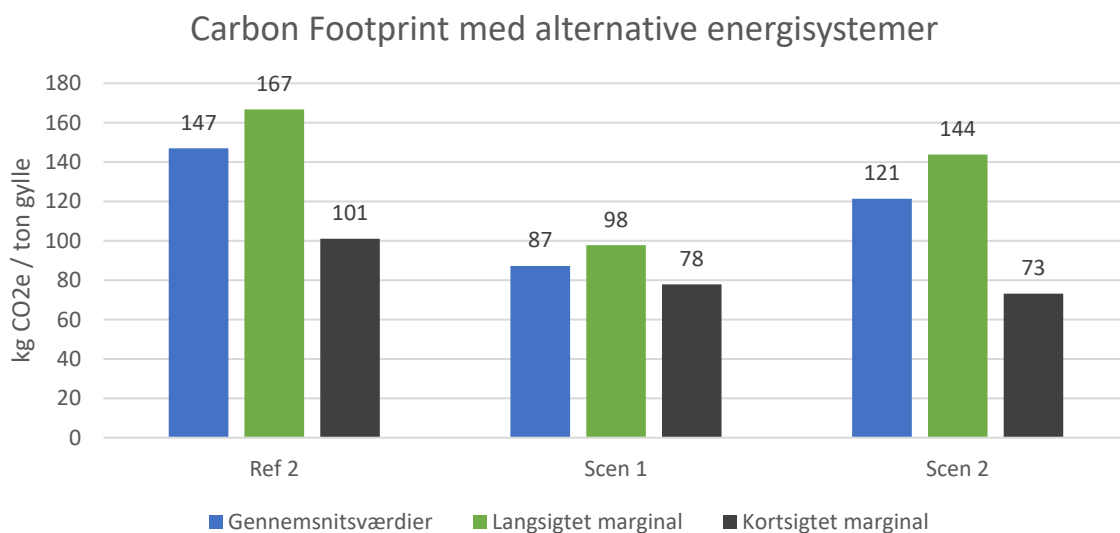
Kortsigtet marginal	Ref 1	Ref 2	Scen 1	Scen 2
Carbon Footprint	172	101	78	73
Afvigelse i %	0	-31	-11	-37

Tabel 7: Carbon Footprint og afvigelse i procent ved brug af kortsigtet marginal.

Den langsigtede marginal er baseret på havvind og biomasse. Dette system er baseret på den langsigtede marginal anvendt i *Drying and pyrolysis of sludge – In a climate perspective* (Thomsen, 2018). Her er el modelleret med Easetech 2020 databasens External process for havvind. Varme er modelleret ud fra en antagelse om at 33% bliver produceret i varmepumper med el fra havvind, og 18% bliver produceret på træpiller. Den resterende andel antages dækket af restvarme (Thomsen, 2018). Den langsigtede marginal er modelleret med External processer for havvind og træbaseret varme. Carbon Footprint og afvigelse i procent for den langsigtede marginal er opgjort i Tabel 8 nedenfor.

Langsigtet marginal	Ref 1	Ref 2	Scen 1	Scen 2
Carbon Footprint	172	167	98	144
Afvigelse i %	0	+13	+12	+18

Tabel 8: Carbon Footprint og afvigelse i procent ved brug af langsigtet marginal.



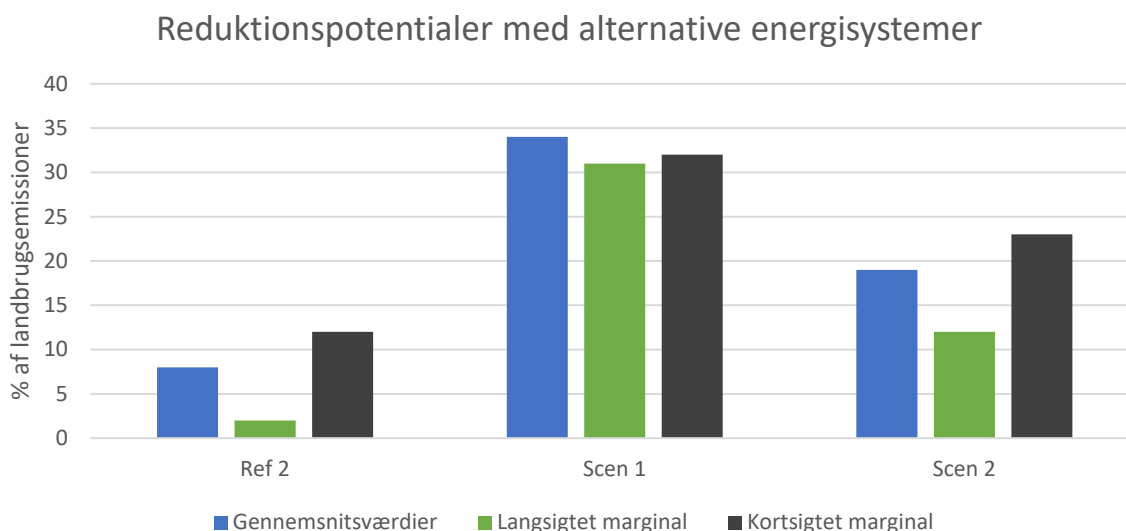
Figur 7: Carbon Footprint ved brug af gennemsnitsværdier, langsigtet marginal og kortsigtet marginal.

Ovenfor er Carbon Footprint for baggrundsenergisystem baseret på gennemsnitsværdier samt kortsigtet og langsigtet marginal illustreret. Det er tydeligt at valg af energisystem har stor betydning. Ved brug af kortsigtet marginal reduceres Carbon Footprint af Scen 2 med 37%. Mindre, men stadig betydelige, afvigelser ses ved brug af langsigtet marginal.

Resultaterne ved brug af de alternative marginaler viser, hvordan potentialet ved implementering af pyrolyse ændrer sig sammen med baggrundsenergisystemet. I Tabel 9 og Figur 8 nedenfor er reduktionspotentialet beregnet ved skift til Scen 1, Scen 2 of Ref 2 med de to marginaler. Potentialet er opgjort i procent af de danske landbrugsemissioner. Der er anvendt samme beregningsmetode som i afsnit 4.3.1. Det vil sige at gyllemængder er baseret på danske tal, og det antages at 20% anvendes til biogasproduktion i det nuværende system.

	Gennemsnitsværdier	Kortsigtet marginal	Langsigtet marginal
Ref 2	8	12	2
Scen 1	34	32	31
Scen 2	19	23	12

Tabel 9: Reduktionspotentialer ved brug af gennemsnitsværdier, langsigtet marginal og kortsigtet marginal opgjort i procent af landbrugssektorens emissioner.



Figur 8: Reduktionspotentialer ved brug af gennemsnitsværdier, langsigtet marginal og kortsigtet marginal opgjort i procent af landbrugssektorens emissioner.

Det er hovedsageligt Scen 2 og Ref 2 som er påvirket af det ændrede energisystem da substitution af el og varme udgør en større andel i disse scenarier end i Scen 1, hvor kun et lille varmeprodukt produceres.

I lande med mere klimabelastende energisystemer, som eksempelvis Polen der hovedsageligt er kulbaseret og samtidig har en enorm husdyrproduktion (Bjureby et al., 2008), vil potentialet være nærmere den kortsigtede marginal. Potentialet vil derimod være nærmere den langsigtede marginal i fremtiden, hvis mindre klimabelastende energisystemer implementeres.

Ud over overvejelser omkring baggrundsenergisystemet er det interessant at overveje den stigende tendens mod opgradering af biogas til naturgaskvalitet og en generel forøgelse af andelen af husdyrgødning som anvendes til biogasproduktion. Det ligger udenfor scopet af denne LCA at beregne konsekvenserne af denne udvikling, men det vil være interessant at undersøge i fremtidige studier.

6.4 Varme fra pyrolyse

Hauggaard-Nielsen påpeger, at implementering af pyrolyse på national skala højst sandsynligt vil ske i form af mindre, decentraliserede anlæg, som ikke nødvendigvis er placeret geografisk hensigtsmæssigt i forhold til fjernvarmenettet. Hauggaard-Nielsen argumenterer derfor for, at det er urealistisk at antage, at al varme produceret ved pyrolyse kan anvendes i den eksisterende fjernvarmeinfrastruktur. Ud fra denne kommentar er det valgt at undersøge effekten af at se bort fra varmereproduktet af pyrolyse. Påvirkningen af denne ændring på Carbon Footprint af de fire scenarier samt den procentvise afvigelse er opgjort i Tabel 10 nedenfor.

	Ref 1	Ref 2	Scen 1	Scen 2
Carbon Footprint	172	147	99	124
Afvigelse i %	0	0	+13	+2

Tabel 10: Carbon Footprint og afvigelse i procent når der ses bort fra varmereproduktet af pyrolyse.

Denne ændring har naturligvis størst påvirkning på Scen 1, hvor varme fra pyrolyse udgør det totale varmereprodukt. Her ses en forøgelse af Carbon Footprint på 13% sammenlignet med de oprindelige resultater. I Scen 2, hvor varme fra pyrolyse udgør en mindre andel, ses en forøgelse på 2%. Med disse ændringer falder reduktionspotentialet ved skift til Scen 1 fra 34% til 29%. Denne ændring har altså en mindre påvirkning på de samlede resultater. Muligheden for at afsætte varme i fjernvarmenettet bør derfor overvejes ved vurderingen af klimapåvirkning af pyrolyseanlæg.

Yderligere parametre

Påvirkningen af enkelte parametre ud over de ovenstående er desuden beregnet ud fra kommentarer fra Jensen og Clausen. Disse inkluderer elproduktion ved pyrolyse, effekten af varmeveksler i biogasproduktion og alternative data på kvælstofindholdet i biokul. Kun elproduktion havde betydelig påvirkning på Carbon Footprint med en reduktion på 9% i Scen 1.

6.5 Samlet vurdering

Ud fra denne følsomhedsanalyse vurderes opbevaring og markemissioner at være de processer, som medfører størst usikkerhed i modellen. Dette skyldes at der stadig er stor usikkerhed omkring de udviklede metoder til beregning af disse emissioner. Derudover er den specifikke praksis omkring gyllehåndtering afgørende for modellens nøjagtighed. Modellen er udviklet med henblik på at vurdere potentialet ved implementering af pyrolyse på national skala. Til dette formål vurderes den specifikke praksis at være af mindre betydning da det i realiteten er et gennemsnit af den danske gyllehåndtering der modelleres. Anvendes

modellen i stedet til at beregne Carbon Footprint af en enkelt bestand, vil det være nødvendigt at justere nogle processer for at tage højde for de specifikke forhold.

Det vil være interessant at følge, hvordan de forbedrede modeller for beregning af opbevaringsemissioner fra Aarhus Universitet får betydning for fremtidige studier (Petersen & Gyldenkerne, 2020). Muligheden for at beregne opbevaringsemissioner på timebasis løser potentielt mange af de udfordringer der opstod i denne LCA.

Det anvendte baggrundsenergisystem vil også have afgørende betydning for modellens nøjagtighed. Resultatet af denne LCA vil være repræsentativt for det danske system og systemer med sammenlignelig klimapåvirkning. For energisystemer hvor klimapåvirkningen afviger væsentligt fra dette, vil det være nødvendigt at justere baggrundsenergisystemet i modellen. Her er det også relevant at overveje fremtidige udviklinger imod opgradering af biogas til naturgaskvalitet. Hvis en større andel biogas opgraderes i fremtidige systemer, vil det være hensigtsmæssigt at modellere denne proces, hvilket vil have betydning for det samlede resultat.

Overordnet set vurderes det beregnede reduktionspotentiale ved skift til Scen 1 på 34% af landbrugssektorens emissioner at være rimeligt. Ud fra de undersøgte parametre ligger potentialet indenfor spændet 21% - 34%, hvor det laveste potentiale er beregnet ud fra de alternative data på opbevaring og markemissioner (Rodhe et al., 2011). Ved brug af de forbedrede modeller fra Aarhus Universitet forventes det dog, at opbevaring og markemissioner beregnes højere, hvilket vil resultere i et større reduktionspotentiale end de oprindelige 34%.

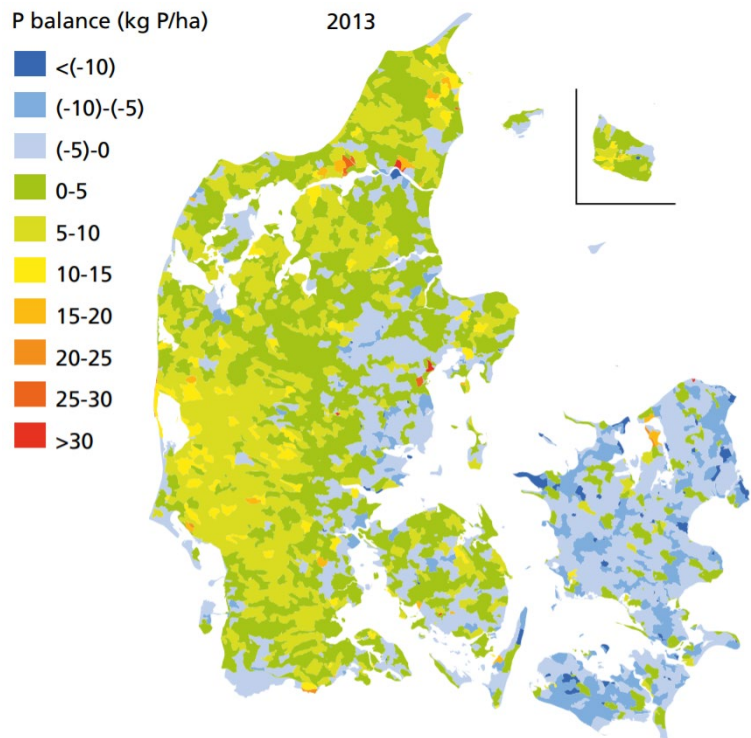
7 Perspektivering

Ved national implementering af pyrolyse er der stort potentiale i forbindelse med klimaindsatsen. På grund af systemets påvirkning på næringsstofkredsløb i landbruget er det desuden relevant at overveje problemstillinger relateret til fosfor.

7.1 Fosforproblematikken

De kendte globale reserver af næringsstoffet fosfor, som er livsnødvendigt for alle planter og dyr, er geografisk koncentreret i få lande uden for EU. Dette leder til en potentiel geopolitisk trussel, da EU er afhængig af import af fosfor fra hovedsageligt Kina og Marokko (Poulsen, 2019). På globalt plan er det derfor nødvendigt at værne om fosforressourcer for at sikre den fremtidige forsyningssikkerhed.

I Danmark er der opbygget en pulje af fosfor i jorden på grund af mange års gødsning. Overbrug af fosfor på landbrugsjorden kan derfor lede til et potentielt tab ved udvaskning, hvilket kan have store konsekvenser for omkringliggende økosystemer (Poulsen, 2019). Dette skaber en udfordring i forbindelse med den intensive husdyrproduktion i Danmark. Husdyrproduktionen er hovedsageligt koncentreret i Jylland, hvor fosforindholdet i jorden generelt er højere end på de østlige øer, se Figur 9. Der er derfor behov for at transportere husdyrgødningen østpå, hvilket er omkostningsfuldt, da gødningen består af ca. 95% vand. Transport af gødning er derfor ikke økonomisk rentabelt på grund af de lave priser på handelsgødning (Poulsen, 2019).



Figur 9: Fosforbalancen i Danmark 2013. Blå farver indikerer underskud af fosfor i jorden (Poulsen, 2019: 16).

Derfor undersøges forskellige muligheder for at reducere transportomkostninger ved fraktionsopdeling af husdyrgødningen. Her spiller biogasanlæg en central rolle, da der her behandles tilstrækkelige mængder gylle til, at det kan betale sig at fraktionsopdele (Poulsen, 2019). Det forventes desuden, at andelen af husdyrgødningen der biogasbehandles vil stige på grund af politisk støtte vedtaget i energiaftalen 2018 (Energistyrelsen, 2018b).

Baseret på massebalancer fra denne LCA findes der i ubehandlet husdyrgødning 1,04 g fosfor per kg. Ved fraktionsopdeling hæves dette til 4,4 g (Appendix A). Ved denne koncentration bliver fiberfraktionen konkurrencedygtig i forhold til handelsgødning ved transport på 100 km (Poulsen, 2019). Kombineres fraktionsopdeling med pyrolyse vil indholdet af fosfor koncentreres til 27,6 g per kg i biokullet. Her er det nødvendigt at overveje plantetilgængeligheden af fosfor i biokul. Der er endnu stor usikkerhed på dette område, men nogle studier har vist relativt høj plantetilgængelighed af fosfor i kvæg- og svinegyllebaseret biokul (Ippolito et al., 2015). Ved at kombinere fraktionsopdeling med pyrolyse koncentreres fosfor altså markant i biokullet, hvilket potentielt kan løse transportproblematikken.

8 Konklusion

8.1 LCA-resultater

I denne LCA beregnes et Carbon Footprint af den nuværende gyllehåndtering i Danmark på 167 kg CO₂e per ton gylle. Carbon Footprint af Scen 1 og Scen 2 beregnes til henholdsvis 87 og 121 kg CO₂e per ton gylle. Det svarer til en reduktion på henholdsvis 48% og 27% sammenlignet med det nuværende system. Reduktionen skyldes hovedsageligt reducerede emissioner af metan fra opbevaring og CO₂ fra marken.

Med udgangspunkt i dette beregnes et reduktionspotentiale på 3,7 mio ton CO₂e ved skift til Scen 1. Det svarer til 34% af landbrugssektorens opgjorte emissioner på 11 mio ton CO₂e. Dette reduktionspotentiale er beregnet ud fra en antagelse om, at den samlede mængde kvæg- og svinegylle i Danmark anvendes til pyrolyse, og bør derfor ses som et teoretisk potentiale, som i realiteten vil være begrænset af en række praktiske og økonomiske udfordringer. Udføres en tilsvarende beregning for biogasproduktion, opnås et reduktionspotentiale på 8% af landbrugets emissioner. Det er altså tydeligt at pyrolyse er et langt mere effektivt værktøj til reduktion af emissioner.

8.2 Systemiske perspektiver

Det er dog oplagt at anvende pyrolyse i samspil med biogasproduktion. På grund af politisk støtte forventes en stigende andel af husdyrgødningen at anvendes til biogasproduktion. Her udgør transportomkostninger en central udfordring på grund af fosforproblematikken. Ved pyrolyse koncentrerer næringsstoffer i biokullet, hvilket reducerer transportomkostninger markant.

Der forventes desuden en voksende andel af vindenergi i det danske elnet. Som følge af dette kan der potentielt opstå store svingninger i prisen på el. Dette kan have store økonomiske konsekvenser for biogasanlæg, som er afhængige af salg af el. Ved implementeringen af pyrolyse vil der være et alternativ til biogasproduktion på husdyrgødning, som har en positiv klimapåvirkning i perioder med lave priser på el. Pyrolyse kan på denne måde anvendes som et værktøj i gyllehåndteringen som kan udnyttes strategisk til at skabe systemiske sammenhænge.

Der er altså potentiale for et symbiotisk samspil mellem husdyrproduktion, biogas og pyrolyse, som kan medvirke til at nå de politiske målsætninger for klimaindsatsen og samtidig løse udfordringer i forbindelse med næringsstofkredsløb i landbruget.

9 Litteratur

Andersen HK (2020) *Undersøgelse: Langt større potentiale i biogassen*. Effektivt Landbrug [<https://effektivtlandbrug.landbrugnet.dk/artikler/biogas/langt-stoerre-potentiale-i-biogassen.aspx>] set 19/05-2020

Bjureby E et al. (2008) *The True Cost of Coal – How people and the planet are paying the price for the world's dirtiest fuel*. Greenpeace International

Bjørn A et al. (2018a) Chapter 2: Main Characteristics of LCA. I: Hauschild M et al., ed. *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*. Springer

Bjørn A et al. (2018b) Chapter 8: Scope Definition. I: Hauschild M et al., ed. *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*. Springer

Boateng AA et al. (2015) Chapter 4: Biochar production technology. I: Lehmann J & Joseph S, ed. *Biochar for Environmental Management*. 2. udg. Routledge

Cantrell KB et al. (2011) *Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar*. *Bioresource Technology*, Vol 107: 419-428

Clavreul J, Baumeister H, Christensen TH, Damgaard A. (2014) *An environmental assessment system for environmental technologies*. *Environmental Modeling & Software*, vol. 60: s. 18-30

Danmarks Statistik (2020) *Svin*. Statistikbanken [<https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/SelectVarVal/Define.asp?Maintable=SVIN&Language=0>] set 24/5-2020

Energistyrelsen (2018a) *Nøgletal om energiforbrug og -forsyning*. Energistyrelsen [<https://ens.dk/service/statistik-data-noegletal-og-kort/noegletal-og-internationale-indberetninger>] set 25/4-2020

Energistyrelsen (2018b) *Perspektiver for produktion og anvendelse af biogas i Danmark*. Energistyrelsen

Hamelin L, Wesnæs M, Wenzel H, Petersen BM (2010) *Life Cycle Assessment of Biogas from Separated slurry*. Danish Ministry of the Environment

Holm AB (2018) Kapitel 2: Positivismen: Den første videnskabsteori. I: *Videnskab i virkeligheden – En grundbog i videnskabsteori*. 2. udg. Samfundslitteratur

IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Japan.

IPCC (2018) *Global Warming of 1.5°C*.

Ippolito JA et al. (2015) Chapter 7: Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. I: Lehmann J & Joseph S, ed. *Biochar for Environmental Management*. 2. udg. Routledge

Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet (n.d.) *Danmark har fået en aftale om en ambitiøs og bindende klimalov*. Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet [<https://kefm.dk/temaer/en-ny-ambitioes-og-bindende-klimalov/>] set 23/5-2020

Landbrugsstyrelsen (2019) *Vejledning om gødskning- og harmoniregler – Planperioden 1. august 2019 til 31. juli 2020*. Miljø- og fødevarerministeriet

Lehmann et al. (2015) Chapter 10: Persistence of biochar in soil. I: Lehmann J & Joseph S, ed. *Biochar for Environmental Management*. 2. udg. Routledge

Lund P et al. (2019) *Normtal for husdyrgødning – 2019*. Aarhus Universitet, Institut for Husdyrvidenskab

Nielsen et al. (2019) *Denmark's national inventory report 2019*. Aarhus Universitet, DCE

Olesen JE et al. (2018) *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget*. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug

Petersen SO & Gyldenkerne S (2020) *Redegørelse omkring forventede justeringer i beregning af metanemission fra husdyrgødning*. Aarhus Universitet: DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug

Poulsen HD (2008) *Normtal for husdyrgødning – 2008*. Aarhus Universitet

Poulsen HD et al. (2019) *Fosfor i dansk landbrug – ressource og miljøudfordring*. Aarhus Universitet

Rohde LKK et al. (2011) *Greenhouse gas emissions from pig slurry during storage and after field application in northern European conditions*. *Biosystems Engineering*, Vol 113: 379-394

Thomsen TP (2018) *Drying and pyrolysis of sludge – In a climate perspective*. DTU Chemical Engineering

Thomsen TP (2020) *Notat*. Ikke-publiceret data

Wesnæs M, Wenzel H, Petersen BM (2009) *Life Cycle Assessment of Slurry Management Technologies*. Danish Ministry of the Environment

Wnetrzak R, Hayes DJM, Jensen LS, Leahy JJ, Kwapinski W (2015) *Determination of the Higher Heating Value of Pig Manure*. *Waste Biomass Valor*, vol. 6: s. 327-333

Zupancic GD & Ros M (2003) *Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion*. *Renewable Energy*, Vol 28: 2255-2267