



LUND UNIVERSITY

Produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi - En översikt av teknik, miljöeffekter och ekonomi för några alternativ

Ahlgren, Serina; Bauer, Fredric; Hulteberg, Christian

2015

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Ahlgren, S., Bauer, F., & Hulteberg, C. (2015). *Produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi - En översikt av teknik, miljöeffekter och ekonomi för några alternativ*. (Rapport vid Institutionen för energi och teknik; Vol. 082). Sveriges Lantbruksuniversitet.

Total number of authors:

3

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



Produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi

En översikt av teknik, miljöeffekter och ekonomi för några alternativ

Serina Ahlgren, Sveriges Lantbruksuniversitet

Fredric Bauer, Lunds Tekniska Högskola

Christian Hulteberg, Lunds Tekniska Högskola

Rapport nr 082 vid Institutionen för energi och teknik

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Ahlgren, S., Bauer, F., Hulteberg, C. (2015). Produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi - en översikt av teknik, miljöeffekter och ekonomi för några alternativ. Rapport nr 082. Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

ISSN: 1654-9406

ISBN: 978-91-576-9305-1

Tryckår: 2015

Kontakt:

serina.ahlgren@slu.se

<http://www.slu.se/energioghteknik>

Innehåll

Förord.....	1
Sammanfattning	3
Summary	5
1 Introduktion	7
1.1 Vad är problemet?	7
1.2 Tillverkning av kvävegödsel idag	7
1.3 Syfte	8
2 Metod.....	9
3 Olika typer av enkla kvävegödselmedel	10
3.1 Gasformiga och flytande kvävegödselmedel	10
3.2 Fasta kvävegödselmedel.....	12
3.3 Dagens användning	13
4 Produktion av kvävegödsel.....	14
4.1 Produktion av vätgas	15
4.1.1 Reformering av biogas från rötning	15
4.1.2 Elektrolys av vatten med grön el.....	17
4.1.3 Förgasning av biomassa	19
4.2 Produktion av enkla kvävegödselmedel	21
4.2.1 Produktion av ammoniak	21
4.2.2 Ammoniumnitrat	22
4.2.3 Urea	23
4.2.4 Ammoniumsulfat.....	24
5 En jämförande analys.....	25
5.1 Mass- och energibalanser	25
5.2 Kostnadsberäkningar	28
5.2.1 Modellering av ammoniakproduktion	28
5.2.2 Beräkning med skalfaktor	28
5.2.3 Uppskattning av kostnader för enkla kvävegödselmedel	29
5.2.4 Jämförelse med prisutvecklingen på fossilbaserat kväve	30
5.3 Miljöbedömning	32
6 Lokalisering	36
7 Tillämpliga lagar och regler.....	37
8 Nyttor och risker	38
8.1 Identifierade nyttor	38
8.1.1 Minskat beroende av fossila råvaror	38

8.1.2	Nyttiggörande av lokala resurser.....	39
8.1.3	Minskade utsläpp av växthusgaser.....	39
8.2	Identifierade risker	40
8.2.1	Produktions- och hanteringsrisker.....	40
8.2.2	Ökade kostnader och minskad konkurrenskraft	40
8.3	Kommentarer.....	41
9	Viktiga intressenter och aktörer	41
9.1	Intressentgrupper.....	42
9.2	Aktörer	43
10	Sammanfattande diskussion.....	46
10.1	Val av kvävegödselmedel och produktionsprocess	46
10.2	Hur går vi vidare?.....	47
	Referenser	49

Förord

Denna rapport är en delstudie inom projektet ”Förstudie till produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi” (H1140055) finansierat av Stiftelsen Lantbruksforskning under perioden 2012-01-01–2014-12-31. Projektet har genomförts av forskare vid Sveriges Lantbruksuniversitet och Lunds Universitet.

Till projektet har också en referensgrupp varit knuten som bidragit med värdefulla kommentarer och synpunkter till denna rapport. Referensgruppen har bestått av:

Jan Eksvärd, Lantbrukarnas Riksförbund

Per-Anders Hansson, Sveriges Lantbruksuniversitet

Åke Nordberg, Sveriges Lantbruksuniversitet

Sammanfattning

Mineralkvävegödsel är en av förutsättningarna för de höga skördenivåer som uppnåtts i det industrialiserade, moderna jordbruket. I Sverige finns idag ingen inhemsk produktion av mineralkvävegödsel, utan hela efterfrågan tillgodoses med import från utlandet. Produktionen är idag baserad på fossila resurser, vilka används både som råvara för produktionen och som energi för att driva processerna. Vi är alltså beroende av utländska fossila resurser – som bränsle och mineralgödsel – för vår livsmedelsproduktion. Möjligheter finns dock att producera kvävegödsel med på förnybara resurser, vilket banar väg för en mer hållbar produktion av livsmedel och bioenergi.

Denna rapport syftar till att beskriva och jämföra olika tekniska alternativ för produktion av kvävegödsel baserad på förnybara energikällor. Rapporten presenterar produktionskostnader som beräknats utifrån tekno-ekonomiska modeller av produktionsprocesserna, miljöpåverkan av förnybara gödselmedel enligt ett flertal livscykelanalyser, samt en översikt av potentiella nyttor och risker. Rapporten kan läsas som en förstudie, vilken kan användas som informationsunderlag för aktörer och intressenter som har intresse av att stödja utvecklingen av förnybara gödselmedel.

Resultaten visar att kostnaden för att producera förnybara kvävegödselmedel varierar beroende på vald teknik och tillverkningskala. Bland de förnybara alternativen som studerades, gav förgasning av biomassa den lägsta produktionskostnaden. För detta alternativ beräknades produktionskostnaden till 11-14 kr/kg N, vilket kan jämföras med dagens pris på ca 10 kr/kg N. Förgasning av biomassa är dock ännu inte en fullt kommersiellt tillgänglig teknik, utan en framtida möjlighet.

Studien visar också att det finns alternativ som kan förverkligas inom en snar framtid, där all teknik för kvävegödsel baserad på förnybar energi finns tillgänglig. Det är ”bara” att sätta ihop de olika delarna som behövs. Dessa alternativ uppskattas bli 2-3 gånger så dyra som dagens kvävegödselmedel. Ett av de mest lovande alternativen är att göra urea av biogas, vilket uppskattas kosta ungefär 20 kr/kg N. Ett annat alternativ är att producera ammoniumnitrat från vindkraft, vilket beräknas kosta runt 24 kr/kg N.

De olika tekniska alternativen har sina för- och nackdelar. Vid en jämförelse mellan processer som bygger på vindkraftsbaserad elektrolys och reformering av biogas är produktionskostnaderna liknande. Biogasalternativet har dock en lägre investeringskostnad och lägre andel fasta kostnader. Biogas är också en mindre intermittent energikälla, vilket är en klar fördel jämfört med vindkraft som blir starkt beroende av ett vätgaslager eller det regionala energisystemet som utjämning för variationer i elproduktion. Att vara beroende av det regionala energisystemet innebär större kostnadsrisk och det blir även viktigt när klimatpåverkan beräknas hur övrig el produceras i systemet.

Vad gäller val av slutprodukt kan vi konstatera att ammoniak är billigast att producera. Vi har dock ingen infrastruktur eller vana av att hantera vattenfri ammoniak i Sverige. Det betyder att distribution, lagring, hantering och användning skulle kräva många extra investeringar. Då koncentrerad ammoniak är miljö- och hälsofarligt är hantering av ammoniak också kopplat till stora risker vid läckage. I jämförelse mellan ammoniumnitrat och urea, uppskattas produktionskostnaderna bli relativt likvärdiga, med en liten fördel för urea. Urea kräver dock en koldioxidkälla för produktionen, vilket gör att det inte är ett lämpligt val att kombinera med vindkraftsbaserade processer. Ammoniumnitrat är också förknippat med stora risker vid lagring och distribution då det är mycket brandfarligt.

Ett av syftena för att producera kvävegödsel baserad på förnybar energi är att minska utsläpp av växthusgaser från odling. Inom ramen för detta projekt gjordes en sammanställning av resultat från tidigare genomföra livscykelanalyser. Utsläpp av växthusgaser för produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi visade sig variera mellan 0,1 – 1,5 kg CO₂-ekv/kg N, vilket kan jämföras med produktion baserad på fossil energi som varierar mellan 2,2 – 14,2 kg CO₂-ekv/kg N. Alltså ger grönt kväve en avsevärd klimatnytta jämfört med fossila alternativ.

Att använda förnybar energi till kvävegödselproduktion utgör alltså en möjlighet att utnyttja förnybara resurser på ett nytt, klimateffektivt sätt, samtidigt det minskar jordbruksproduktionen beroende av den fossila energimarknadens instabilitet. Vår samlade bedömning är att på kort sikt verkar biogas till urea som ett mycket lovande alternativ som bör studeras vidare. På längre sikt är förgasning av biomassa mer intressant, förutsatt att tekniken för förgasning lyckas slå igenom på kommersiell skala. Även om det finns aktörer som visar intresse för förnybara kvävegödselmedel finns ännu ingen marknad för dessa produkter. Att skapa efterfrågan hos konsumenter, samt att driva på utvecklingen hos producenter genom olika typer att styrmedel är viktiga aspekter som bör studeras vidare.

Summary

Mineral nitrogen fertilizer is one of the main reasons for the high yields in modern, industrial agriculture. There is currently no production of mineral nitrogen fertilizer in Sweden – the entire demand is met by imports from abroad. Global production is at present based on fossil resources, which are used both as raw materials for the production and as energy to fuel the process. We are thus dependent on foreign fossil resources – as fuel and fertilizer – for our agricultural production. However, nitrogen fertilizers could be produced using renewable resources, which could pave the way for a more sustainable production of food and bioenergy.

This report aims to describe and compare different production process options for the production of nitrogen fertilizers based on renewable energy sources. The report presents estimated production costs based on techno-economic modelling, environmental impact of renewable fertilizer based on life cycle assessments, and an overview of potential risks and benefits of renewable fertilizers. The report can be read as a feasibility study, which can be used to provide information for actors who are interested in supporting the development of renewable fertilizers.

The results show that the cost of producing nitrogen fertilizer depends on the choice of production process technology and that some technologies benefit from economies of scale. Among the studied options, the production cost for renewable nitrogen fertilizer was lowest when produced through thermochemical gasification of biomass. The cost for this option was estimated to 11-14 SEK/kg N, which can be compared with the current price of about 10 SEK/kg N. However, gasification of biomass is not yet a commercially available technology but rather a future possibility.

The report also shows that there are options that could be realized in the near future. For these options the needed technologies for nitrogen fertilizer based on renewable energy is commercially available. It is "only" a matter of putting together the various elements that is needed. These options are expected to be about 2-3 times more expensive than conventionally produced nitrogen fertilizers. One of the most promising alternatives is to make urea of biogas, which is estimated to cost approx. 20 SEK/kg N. Another option is to produce ammonium nitrate from wind power, which is estimated to cost approx. 24 SEK/kg N.

The different technology options – different renewable energy sources – each have their pros and cons. When comparing processes based on wind powered electrolysis and reforming of biogas, production costs are similar. Biogas has however a lower investment cost and a lower proportion of fixed costs. Biogas is also a less intermittent energy source, which is a clear advantage over wind that becomes heavily dependent on a hydrogen storage system or the regional energy system to equalize variations in electricity production. Being dependent on the regional energy system means greater risk for cost variation. Reliance on the

regional energy system can also be important for the climate impact assessment, depending on how electric power is generated in the region.

Regarding the choice of the final nitrogen fertilizer product, we can conclude that ammonia is the cheapest to produce. However, there is no infrastructure or experience of handling anhydrous ammonia in Sweden, indicating that distribution, storage, handling and use would all require extra investment costs. There are however large risks connected to the handling of anhydrous ammonia as it is dangerous for the environment and to human health in case of leakage. In the comparison between ammonium nitrate and urea, we can see that the estimated production costs are quite similar, with a slight advantage for urea. Urea does however need a source of carbon dioxide, making it an unsuitable option in combination with wind power. Ammonium nitrate is also associated with large risks in storage and distribution, as it is highly explosive.

One of the purposes of producing nitrogen fertilizer based on renewable energy is to reduce the greenhouse gas emissions that are associated with agricultural production. In this report, a summary is made of results from previous life cycle assessment studies. Emissions of greenhouse gases for the production of nitrogen fertilizer based on renewable energy was found to vary between 0.1 to 1.5 kg CO₂-eq / kg N, compared with production based on fossil energy that varies between 2.2 to 14.2 kg CO₂-eq / kg N. Thus, the nitrogen fertilizers based on renewable energy would yield significant climate benefits compared to conventional, fossil alternatives.

Using renewable energy for fertilizer production is thus an opportunity to utilize renewable resources in a new way to mitigate climate change, while at the same time reducing the dependency of agricultural production on fossil energy market volatility. We conclude that in the short term biogas-to-urea seems like a very promising option that should be studied further. In the longer term, biomass gasification becomes more interesting, given that the technology of gasification proves itself successful in commercial applications. Although there are actors showing interest in renewable fertilizers, there is yet no market for such products. Articulating a demand pull for renewable fertilizers, as well as formulating policy instruments for a technology push are important aspects that need to be investigated further.

1 Introduktion

Mineralkvävegödsel är en av förutsättningarna för modernt jordbruk och en av grundpelarna till de ökade skördenivåer som uppnåtts sedan mitten av 1900-talet. Samtidigt är produktion och användning av kvävegödsel förknippat med fossil energianvändning och miljöproblem. I denna rapport tar vi en närmare titt på produktionen av kvävegödsel, hur den ser ut idag och hur den kan se ut i en inte allt för avlägsen framtid.

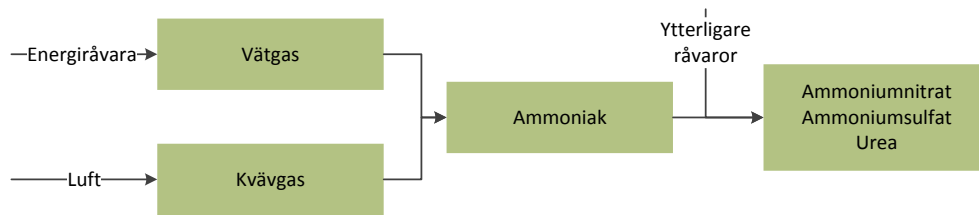
1.1 Vad är problemet?

Det svenska jordbruket uppskattades i en studie genomförd 2009 använda ungefär 9 TWh energi, vilket kan jämföras med den totala energianvändningen i Sverige på 376 TWh under år 2009. De största fossila energiinsatserna i svenskt jordbruk utgörs av diesel till arbetsmaskiner (2,8 TWh år 2008) och tillverkning av kvävegödsel (beräknade till 1,8 TWh år 2008) (Ahlgren, 2009). Tillverkning av kvävegödsel leder också till stora utsläpp av växthusgaser. Studier har visat att vid odling av t.ex. vete står tillverkning av kvävegödsel för mellan 40 och 65% av utsläppen (Röös et al., 2011). Även om kvävegödselmedel står för en stor del av användningen av fossil energi, är kväve en av förutsättningarna för ett effektivt jordbruk med höga skördar. Utan kvävegödsel skulle skördarna minska betydligt, vilket skulle kräva att större odlingsarealer togs i anspråk.

Samtidigt har vi ambitiösa mål för användande av förnybar energi i samhället. På landsbygden uppmuntras det till exempel genom stöd för lokal energi som gårdsbiogas och vindkraft. Men även om biogas och vindkraft uppmuntras från politiskt håll är det svårt att få lönsamhet i investeringar. Att fundera på nya lönsamma möjligheter för användning av biogas och vindkraft är därför av högsta intresse.

1.2 Tillverkning av kvävegödsel idag

Ammoniak är basen för kvävegödselmedel. Ammoniak tillverkas i den så kallade Haber-Boschprocessen där kvävgas och vätgas renframställs. Kvävet kan tas från vanlig luft, det är framställningen av vätgas som kostar energi. Ammoniaken används sedan som råvara i andra processer för att tillverka kvävegödselmedel som urea och ammoniumnitrat. En översikt av processen visas i Figur 1.



Figur 1. För att tillverka kvävegödselmedel behövs vätgas och kvävgas. Kvävgas kan tas från vanlig luft, men vätgasen måste framställas och det kräver energi.

Idag framställs vätgasen i västvärlden vanligtvis genom ångreforming av naturgas. Ungefär 2/3 av energin i naturgasen används som råmaterial, den återstående delen som energi för att driva processerna. Kol eller olja används också i stor utsträckning i andra delar av världen, för att utvinna vätgas förgasas råmaterialen med efterföljande reformering och vattengasreaktion. Vätgasen som behövs till kvävegödselframställning kan dock även produceras med hjälp av förnybara energikällor.

Utvecklingen för energianvändning vid ammoniakproduktion har gått snabbt; idag använder de bästa anläggningarna cirka 8-9 kilowattimmar för tillverkning av 1 kilogram kvävegödsel (räknat i form av rent kväve). Men det finns ganska många gamla anläggningar kvar; det globala medelvärdet är ungefär 14 kilowattimmar per kilogram kväve. De flesta anläggningar är mycket stora och producerar uppemot 1000 ton kvävegödselmedel per dag (IFA, 2009) men de nyaste, största anläggningarna producerar ända upp till 3000 ton ammoniak per dag.

1.3 Syfte

Denna rapport syftar till att beskriva och jämföra olika tekniker för produktion av kvävegödsel baserad på förnybara energikällor. För ett antal värdekedjor kommer vi jämföra val av teknik, produktionsskala och råvaror ur ekonomiska, tekniska och miljömässiga perspektiv. Fokus ligger på produktion av kvävegödsel, och inte på användning av kvävegödsel.

Rapporten är tänkt att likna en allmän förstudie, som i ett senare skede kan fungera som ett första underlag till en genomförandefas, tex byggnad av en pilotanläggning. Vi vill här alltså hitta tekniska lösningar som kan fungera inom en relativt snar framtid.

Mer specifikt syftar rapporten till att:

- Uppskatta produktionskostnad (investerings- och driftskostnader) för olika sätt att producera ammoniak från förnybara resurser
- Grovt uppskatta produktionskostnad för olika kvävegödselmedel baserade på ammoniak
- Sammanställa resultat från livscykelanalyser av grönt kväve
- Diskutera lämplig lokalisering av anläggning
- Utvärdera nyttan av grönt kväve (både direkta och indirekta nyttor)
- Synliggöra eventuella risker och hur dessa kan hanteras
- Identifiera aktuella lagar, regler och ansökningsförfarande för ett genomförande
- Identifiera intressentgrupper och nyckelaktörer inom området

2 Metod

En stor del av projektet har handlat om att sammanställa information rörande produktion av ammoniak och gödselmedel, med avseende på produktionsprocesser, tidigare processutveckling, miljöpåverkan och kostnader. Denna information har främst samlats in från den akademiska forskningslitteraturen, men även information och statistik från industrins samarbetsorganisationer (t.ex. Fertilizers Europe, International Fertilizer Industry Association) samt offentlig statistik (t.ex. Statens Jordbruksverk, United States Department of Agriculture) har använts.

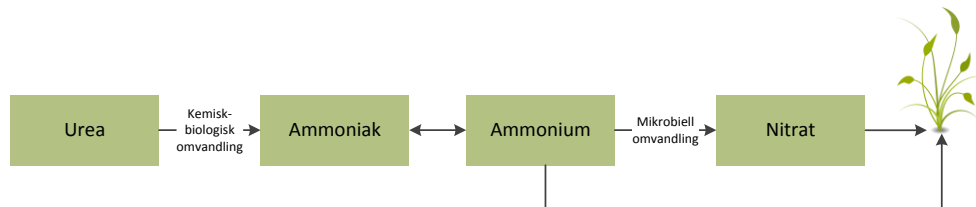
Den information som inhämtats enligt ovan har använts för att konstruera ett flertal olika modeller som använts för att utvärdera de alternativa tekniker som funnits mest intressanta. För att utvärdera de kemiska produktionsprocesserna har programvaran ASPEN Plus använts. Med denna programvara konstruerades datormodeller som beskriver material- och energiflöden i processerna. Med dessa resultat som grund har sedan investerings- och produktionskostnaderna för ammoniak beräknats enligt processekonomiska beräkningsmodeller. Kostnaden för de andra gödselmedlen har sedan beräknats med en statistisk korrelation utifrån den framtagna produktionskostnaden för ammoniak, baserat på kostnadsstatistik från US Department of Agriculture. För omräkning mellan svenska kronor och US dollar har vi använt en växlingskurs på 7,19 kr/US dollar vilket är medelvärdet under jan-dec 2014 (Forex, 2014).

För att bedöma miljöpåverkan av gödselmedlen har tidigare genomförda livscykelanalyser (LCA) sammanställts. Livscykelanalys är en metod som beskriver miljöpåverkan av en produkt eller process utifrån ett livscykelperspektiv, dvs. hela vägen från produktion till användning och avfallshantering (i de fall detta är tillämpligt).

3 Olika typer av enkla kvävegödselmedel

Det finns många olika typer av handelsgödselmedel, t.ex. sammansatta NPK eller enkla gödselmedel som innehåller bara ett näringsämne. Enkla kvävegödselmedel finns med olika former av kväve, t.ex. ammonium och nitrat. Kvävegödselmedel kan indelas enligt deras fysikaliska egenskaper i grupperna fasta, flytande och gasformiga. Gasformigt kväve i form av ammoniak blir i flytande form när den trycksätts. De har alla olika egenskaper med avseende på hur de produceras, distribueras, lagras och sprids. Val av gödselmedel beror på pris, tillgänglighet, vilken utrusning man har för lagring och spridning, typ av gröda, typ av mark, när i växtsäsongen gödsling sker, goda/dåliga erfarenheter och vana.

Val av gödselmedel styrs också av kvävet effektivitet. Effektiviteten är beroende av i vilken form kvävet finns bundet. Växter kan ta upp kväve i form av nitrat och ammonium (Figur 2). Den övervägande delen av ammoniumkvävet tas dock upp först efter att det omvandlats till nitratkväve. De olika kväveformerna omvandlas via kemisk-biologiska processer i marken och av mikroorganismer. Dessa omvandlingsprocesser styrs i hög grad av lokala förhållanden som t.ex. jordtyp och temperatur. I marken råder ett jämviktsförhållande mellan ammoniak och ammonium (NH_4^+). Denna jämvikt styrs av markens pH-värde. Ju högre pH, desto mer ammoniak. Vid pH 7 är cirka 1 % ammoniak, resten är ammonium (Yara, 2014).



Figur 2. Kvävegödsels omvandling i mark. Baserad på bild i Yara (2014).

Nedan följer en kort redogörelse av olika typer av enkla kvävegödselmedel och hur dagens användning ser ut.

3.1 Gasformiga och flytande kvävegödselmedel

Trycksatt ren, vattenfri ammoniak (på engelska: *anhydrous ammonia*) innehåller drygt 82 vikt-% kväve. Vattenfri ammoniak kallas även ibland för flytande ammoniak då den vid trycksättning antar flytande form. Så fort den lämnar tanken går den dock över i gasform och löser sig i markfukten. Trycksatt vattenfri ammoniak används i begränsad utsträckning i Europa, enligt en uppskattning 0,5% av totala kväveanvändningen (Isherwood, 2009). I USA är dock användning av vattenfri ammoniak mycket vanlig och står för ungefär 25% av kväve jordbruket (Maharjan & Venterea, 2014).



Figur 3. Användning av vattenfri ammoniak som gödselmedel är vanligt i t.ex. USA. Ammoniaken förvaras i trycksatta tankar och injiceras i marken där den snabbt löser upp sig i markvätskan. Foto: Lynn Betts, USDA Natural Resources Conservation Service.

I USA finns en välutvecklad infrastruktur för transport, distribution och spridning av den trycksatta ammoniaken (Figur 3 och Figur 4). Trycket i tanken varierar med utomhustemperaturen, vid 20 grader Celsius är trycket ca 7 bar.



Figur 4. Distribution till lantbruk av vattenfri trycksatt ammoniak i USA sker ofta via lokala lantbrukskooperativ. Foto: Joel Tallaksen.

Ammoniakgas kan även lösas upp i vatten, och bildar då en flytande ammoniaklösning, även kallad vattenhaltig ammoniak eller ammoniakvatten. I Sverige finns en mindre produktionsanläggning av ammoniakvatten i Kumla. Det ammoniakvatten som produceras där används dock inte som gödselmedel utan i

andra industriella applikationer som t.ex. NO_x-reduktion, köldbärare, som processkemikalie eller rengöringsmedel (Amixo, 2014). Det finns även ett antal andra flytande gödselmedel på den svenska marknaden, samt kristallin-pulver som löses i vatten innan användning. Dessa gödselmedel är dock främst inriktade på specifika användningsområden som växthus, frukt- och bärödling och golfbanor (Yara, 2015).

Eftersom alla gödselmedel består av mer eller mindre lösliga näringsämnen, kan det tyckas naturligt att i första hand använda flytande gödselmedel, särskilt som de flesta kornade gödselmedlen någon gång under tillverkningen förekommer i flytande form (Larsson, 1976). Flytande gödselmedel kan med fördel också spridas tillsammans med växtskyddsmedel. Dock är det inte alls vanligt förekommande att i större skala sprida flytande konstgödselmedel på åkermark i Sverige. Orsakerna till detta kan vara avsaknad av erfarenhet, att det inte finns infrastruktur samt att det i vissa län inte är tillåtet.

3.2 Fasta kvävegödselmedel

Det finns många olika fast enkla kvävegödselmedel på marknaden, de förekommer ofta i granulerad eller prillad form. Generellt kan kvävegödselmedlen delas in efter effektivitet i upptag.

Kalksalpeter (kalciumnitrat) är ett salt som till största del består av kalciumjoner och nitratjoner. Produkten kan användas även under torra förhållanden och ger snabb kväveeffekt. Ammoniumnitrat i kombination med svavel eller kalcium är ett vanligt förekommande gödselmedel i Sverige, där kvävedelen består av hälften ammonium och hälften nitrat. Den har alltså en lättupptagbar del och en del som först måste omvandlas till nitrat innan den kan tas upp. Gödselmedel som innehåller urea är mer långtidsverkande (Yara, 2014). Jämfört med organiskt bundet kväve - som delvis finns i stallgödsel - är dock alla dessa mineralkvävegödselmedel relativt snabbverkande.

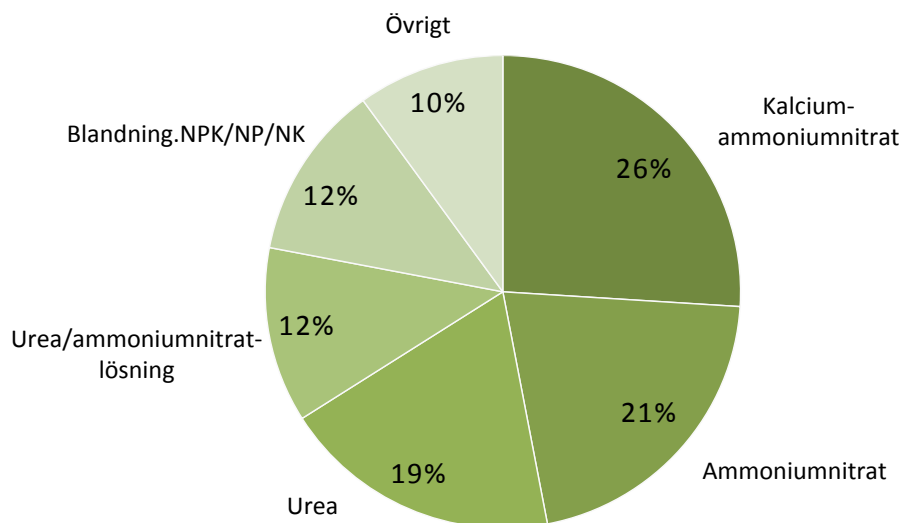
Det finns flera andra karaktärsdrag hos de olika fasta gödselmedlen. De olika kvävegödselmedlen påverkar markens pH-värde i olika grad. Kalksalpeter har positiv kalkverkan, medan ammoniumnitrat och urea har negativ kalkverkan (SJV, 2013). Ammoniumkväve adsorberas (binds på ytan) till markens ler och humus, vilket gör att det rör sig långsamt i marken. I vissa jordar kan ammoniumkväve fixeras till lermineral och därmed bli otillgängligt för växten. Nitratkväve är lättlösligt i marken, vilket gör det lättåtkomligt för växterna och effektivt som gödselmedel. Det avdunstar inte till atmosfären, men kan utlakas med vatten. Nitratkväve kan dock också av bakterier omvandlas till kvävgas och lustgas som avdunstar till atmosfären (Kasimir-Klemedtsson, 2001).

Till följd av minskat svavelnedfall, mer koncentrerade gödselmedel och minskad fosforgödsling har den ”passiva” svaveltillförseln minskat betydligt. Detta innebär att aktiva åtgärder behöver vidtas för att undvika svavelbrist hos de flesta grödor.

Efter kvävegödsling kan obalansen mellan svavel och kväve bli mycket påtaglig i matjorden och risken för svavelbrist ökar med ökade kvävegivor (SJV, 2013). Därför innehåller många av de enkla kvävegödselmedlen också svavel.

3.3 Dagens användning

I EU27 användes under växtodlingsåret 2011/2012 ca 10 miljoner ton kväve i olika kvävegödselmedel (Figur 5), varav ammoniumnitrat och kalciumammoniumnitrat dominerar användningen. Ungefär 12% av kvävet appliceras i flytande form (Fertilizers Europe, 2014).



Figur 5. Användning av kväve i EU27 under växtodlingsåret 2011/2012, fördelning mellan olika typer av gödselmedel (Fertilizers Europe, 2014).

I Sverige redovisas sedan 2012 statistik för användning av mineralkvävegödsel inte per olika gödselsorter, utan grupperat efter kväveinnehåll (Tabell 1). En indikation av fördelningen kan fås genom att kolla på äldre statistik. Tabell 2 visar att kalciumammoniumnitrat/Axan (det vill säga ammoniumnitrat med kalcium/svavel) dominerar användningen, att typ av gödselmedel kraftigt varierar över tid, samt att den totala mängden enkla kvävegödselmedel har minskat. Ren ammoniumnitrat förekommer också som gödselmedel (34 % N), men på grund av hanteringsmässiga restriktioner som gäller för produkten är användningen begränsad (SJV, 2013). Andelen urea som används är begränsad och betydligt mindre i Sverige än i övriga Europa, vilket kan bero på att urea är långtidsverkande vilket inte passar bra på våra breddgrader med kort odlingssäsong. Under 2012/2013 såldes 59 % av kvävet i form av enkla kvävegödsel och resten i form av sammansatta gödselmedel (NPK). I de enkla gödselmedlen blandas även en viss del svavel in, totalt ingick under 2012/2013 ungefär 12 500 ton rent svavel. Den totala mängden kväve i alla sålda gödselmedel under gödselåret 2012/13 var 161 050 ton (SJV, 2014).

Tabell 1. Mängd [ton N] försålt enkelt mineralgödsel 2012/2013, fördelat på gödseltyp (SJV, 2014).

Grupp	Mängd
N 46 – N 82	571
N 32 – N 38	6 122
N 24 – N 30	83 171
N 18 – N 22	565
N 15 – N 16	5 642
N 4 – N 12	18
Enkla N-gödsel totalt	96 089

Tabell 2. Kvävehalt i enkla kvävegödselmedel samt försålda mängder under växtodlingsåren 2002/2003 och 2009/2010. Statistik från SCB (2011).

Gödselmedel	Kvävehalt [%]	Försåld mängd [ton produkt]	
		2002/2003	2009/2010
Kalksalpeter	15,5	221 281	35 762
Chilesalpeter	16	500	-
Na-salpeter	20	8 975	169
Ammonsulfat	21	732	342
N 22	22	1 898	-
ASN	26	1 747	1 687
Kalciumammoniumnitrat/Axan	26-28	238 828	348 691
Ammoniumnitrat	34	33 498	30 682
N 32	32	-	21
Urea	46	382	1 002
Kvävelösning	25 - 30	1 083	-
Flytande ammoniak	82	107	-
Salpetersyra	12	-	78
Enkla N-gödsel totalt		509 031	418 435

4 Produktion av kvävegödsel

Vi går i de kommande kapitlen igenom ett antal tänkbara typer av kvävegödselmedel och hur de kan produceras.

Produktionskedjorna för kvävegödselmedlen består av flera olika steg. Det första, och avgörande steget för användningen av fossila resurser, är produktionen av vätgas. Vätgasen används i nästa steg för att producera ammoniak, som sedan i sin tur används för att producera övriga kvävegödselmedel. Vätgas produceras idag i

industriell skala i Europa främst från naturgas men kan produceras från förnybara råvaror på flera olika sätt (se t.ex. Bičáková och Straka, 2012).

De tre alternativ för vätgasproduktion som undersökts och redovisas i denna rapport är reformering av biogas, elektrolys av vatten samt termokemisk förgasning av biomassa (träflis). För de två första alternativen finns teknik för fullskalig produktion redan tillgänglig. Förgasning av biomassa är lovande och det finns flera demo-anläggningar - som den svenska anläggningen GoBiGas i Göteborg – men behöver med all sannolikhet ett antal år till av testning innan den kan anses kommersiellt tillgänglig. Vätgasen används sedan i den så kallade Haber-Bosch-processen där den reageras med kvävgas för att bilda ammoniak. Haber-Bosch-processen är identisk oberoende av om den initiala råvaran är fossila eller förnybara råvaror, men de processalternativ som baseras på förnybara råvaror och som undersökts i detta projekt är betydligt mindre i skala än dagens mycket stora, industriella anläggningar som utgår från naturgas.

De gödselmedel studerats närmare är ammoniumnitrat, urea och ammoniumsulfat. Ammoniumnitrat valdes då det är ett av de mest använda kvävegödselmedlen i Sverige och Europa och därför borde det vara lätt att introducera ett alternativt kvävegödselmedel med samma användaregenskaper på marknaden. Urea är intressant eftersom det är ett av de mest använda kvävegödselmedlen internationellt. För produktion av urea behövs koldioxid, vilket gör det extra intressant i kombination med biogas. Ammoniumsulfat är inte ett av de vanligaste gödselmedlen, men den kemitekniska processen att producera detta gödsel är mycket enklare än ammoniumnitrat och urea, vilket gör det till ett intressant alternativ att studera.

4.1 Produktion av vätgas

Det första steget i produktion av kvävegödsel är att tillverka vätgas, vilket också är det mest energikrävande processteget. Som tidigare nämnts har vi valt ut tre huvudspår som är lovande för svenska förhållanden:

- Reformering av biogas från rötning
- Elektrolys av vatten med hjälp av grön el
- Förgasning av biomassa

4.1.1 Reformering av biogas från rötning

I Sverige och delar av Europa är intresset för biogasproduktion via rötning stort och biogas skulle därför kunna vara ett alternativ som vätgaskälla. Produktion av biogas från gödsel uppmuntras särskilt starkt med investeringsbidrag. Trots investeringsbidraget begränsas expansionen av biogaslösningar bland annat av svårigheten för enskilda biogasaktörer att nå lönsamhet (Ammenberg et al., 2014). Att använda biogas för produktion av kvävegödsel är därför intressant att studera

vidare som ett potentiellt sätt att använda biogasen för att producera mer högvärdiga produkter.

Biogas kan användas för att producera vätgas på precis samma sätt som naturgas – om biogasen först uppgraderas, vilket kan göras på flera olika sätt (Bauer et al., 2013). Uppgradering innebär att koldioxiden avskiljs så att gasen nästan enbart innehåller metangas. Den vanligaste tekniken för för produktion av vätgas från metan är ångreformerning. Ångreformerning (reaktion 1) är reaktionen mellan vatten och metan och utförs i gasfas.

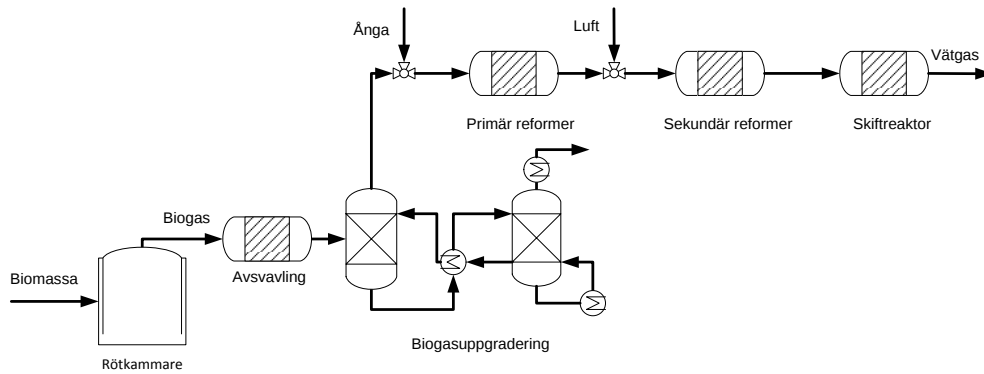


Denna reaktion är en jämviktsreaktion som gynnas av lågt tryck och hög temperatur. Reaktionen påverkas också av en annan jämviktsreaktion, nämligen vattengasreaktionen (reaktion 2). Denna reaktion är oberoende av trycket men gynnas av låg temperatur.



Metangasen blandas den med ånga och hettas upp till ca 700-750°C. Därefter genomförs reaktionen med hjälp av en katalysator bestående av nickel på aluminiumoxid i ett antal tuber. Då reaktionen av naturen kräver energi för att ske är dessa tuber placerade inuti en het ugnskammare som håller ca 1000°C. Värme leds in genom tuberna och tillför det värme som behövs för att reaktionen ska ske. (Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice 2nd ed., C.N. Satterfield, 1996, Malabar, Krieger pub ISBN 1575240025)

Efter reaktion på detta sätt finns fortfarande en del metan kvar i gasen. För att reducera denna mängd till nästan noll sätts luft till gasblandningen. Denna luftmängd är avpassad så att mängden kväve som sätts till är den som sen behövs i syntesen av ammoniak. Syret i luften reagerar med den bildade vätgasen och höjer temperaturen till ca 1250°C varvid den sista metanen reduceras. Därefter kyls gaserna ner till ca 350°C och en av två vattengassteg genomförs. Denna reaktion avger av naturen värme, värme som måste kylas bort mellan de två stegen. Efter det andra steget renas den koldioxid som bildas bort från gasblandningen och de 0.3-0.5% kolmonoxid som finns kvar i gasen efter reaktionen omvandlas genom ett katalytiskt steg till metan; kolmonoxid är ett kraftigt katalysatorgift för den katalysator som omvandlar kväve och väte till ammoniak (Figur 6). (Moulijn et al., 2013)



Figur 6. Produktion, uppgradering med kemisk skrubber och reformering av biogas till vätgas.

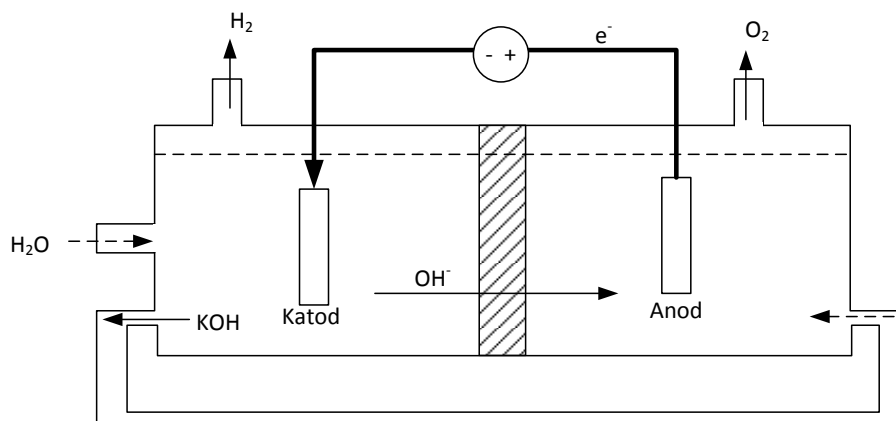
4.1.2 Elektrolys av vatten med grön el

Intresset för vindkraft är stort, Riksdagen antog 2009 ett nationellt planeringsmål på 30 TWh vindkraft till 2020. Vind är dock en intermittent kraftkälla, och ibland kan det finnas stora skillnader mellan produktion och efterfrågan. Som ett exempel kan nämnas att det vid flera tillfällen under vintern 2010/2011 förekom negativa elpriser till följd av stor överproduktion av elkraft vid kraftig vind i både Tyskland och Danmark, länder med relativt stor andel vindkraft i sin energimix (8% respektive 20%). Denna obalans skulle kunna användas för att, när energipriserna är låga, tillverka kvävegödsel till konkurrenskraftiga priser.

Det finns idag två olika typer av elektrolysörer som är kommersiellt tillgängliga, alkaliska elektrolysörer och protonbytesmembranbaserade elektrolysörer. Dessa skiljer sig åt med avseende på elektrolyten, den första använder sig av en lösning av kaliumhydroxid (30%) och vatten, medan den andra använder sig av avjonat vatten. Principen är för övrigt den samma. Elektricitet leds in till systemet, omformas till likström och en elektrokemisk reaktion omvandlar vattnet till vätgas och syrgas (reaktion 3) (Hulteberg et al., 2009).

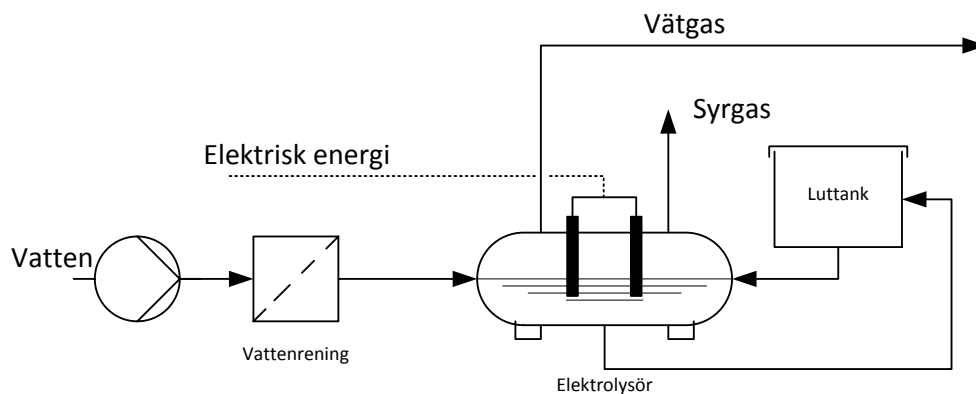


Denna reaktion görs i en så kallad elektrokemisk cell. Mängden gas som kan produceras i en cell är begränsad varför en kommersiell elektrolysör i full skala är uppbyggd av ett stort antal seriekopplade elektrokemiska celler. En skiss av en elektrokemisk cell återfinns i Figur 7.



Figur 7. Principen för elektrolytisk vätgasproduktion i en alkalisk elektrokemisk cell.

En elektrolysisprocess är i grunden ganska enkel. Vatten renas från föroreningar och salter och leds in i en elektrolysör. Där tillförs elektrisk energi som producerar vätgas och syrgas av vattnet. Vätgasen från processen blir mycket ren och kan användas i kemiska processer. Biprodukter och avfall från processen är också mycket begränsade vilket gör elektrolys till en förhållandevis enkel och ren process. En skiss över en elektrolysisprocess visas nedan (Figur 8).



Figur 8. Ett förenklat processchema för elektrolytisk produktion av vätgas med en alkalisk elektrolysör.

Det finns ett par kommersiella leverantörer av elektrolysörer men endast ett fåtal som har erfarenhet av att producera och leverera stora system i den skala som skulle krävas för ammoniakproduktion. Oavsett teknik kommer en elektrolysör att behöva väsentligt mer energi (4,2 - 4,8 kWh/Nm³) för att producera en kubikmeter vätgas än vad den kubikmetern innehåller (2,95 kWh/Nm³). Denna skillnad kallas överspänning och beror på förluster i systemet, med avseende på värme men också omvandlingsförluster på elsidan.

4.1.3 Förgasning av biomassa

Inom förgasning har den största drivande faktorn historiskt sett varit kostnaden på råolja, något som demonstrerades med önskvärd tydlighet under 70-talets oljekriser. På senare år har dock andra värderingar såsom miljö, koldioxidutsläpp i första hand, påverkat intresset för förgasning för att främst producera fordonsbränslen. För att bredda möjliga råvaror vid tillverkning av baskemikalier så har även förgasning av biomassa diskuterats i dessa sammanhang, speciellt för att undvika ökade koldioxidutsläpp. Genom att skilja av kolmonoxid (CO) och koldioxid (CO₂) från produktgasen erhålls en ren vätgasström som kan användas vid ammoniakproduktion. Förövrigt kan den produktgasen användas till samma saker som fossil syntesgas t.ex. polymerer, bränsletillsatser eller kemiska produkter.

Förgasning kallas den process där ett kolhaltigt material som biomassa reageras med luft, syrgas eller ånga för att producera en produktgas. Detta sker normalt vid temperaturer mellan 500°C och 1400°C och tryck upp till 35 bar. Biomassan är vanligtvis flis eller andra typer av träbitar, men även förgasning av andra typer av bränslen förekommer t.ex. olivkärnor, halm, eller slam. Förutom själva förgasaren krävs flera andra processteg för att få en användbar produktgas. Processen visas schematiskt i Figur 9.



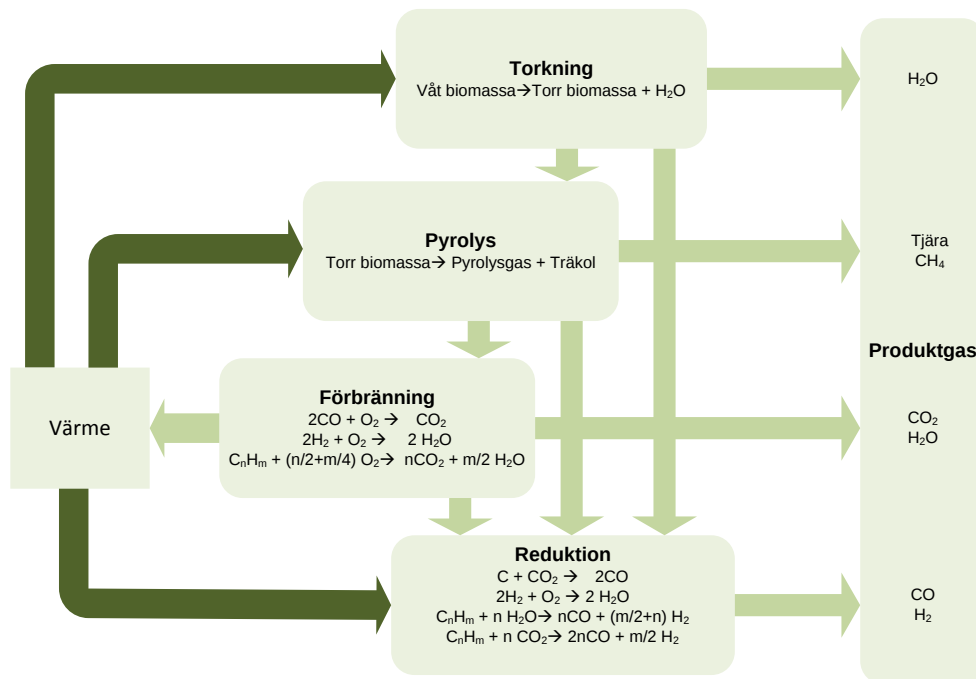
Figur 9. Schematisk översikt av förgasning av biomassa och dess användning.

Innan biomassan kan matas in i förgasaren måste den på olika sätt förbehandlas för att säkerställa förgasarens produktion. Viktiga egenskaper är partikelstorleken och fukthalten i det material som ska förgasas. Därefter matas biomassan in i förgasaren, vilket kan skapa ytterligare problem som måste lösas då förgasningen görs vid höga tryck.

Förgasningsförloppet brukar delas in i fyra faser beroende på vad som sker med den biomassa som introduceras i förgasaren. Det första som sker är att träflisen torkas av den höga värmen. Därefter sker en pyrolys där vissa gaser och tjära drivs av från den torra träflisen, som i sin tur bildar träkol. En del av kolet och den brännbara delen av gaserna reagerar i sin tur vidare med det syre som finns närvarande. Denna förbränning av kol och andra gasformiga komponenter är den reaktion som försörjer de tre övriga faserna med värme.. Hur stor del syre som

måste tillsättas beror till stor del på sådant som biomassans fukthalt, hur mycket ånga som introduceras, hur mycket värmeförluster som finns etc. Den sista fasen är en reduktionsfas där kol och kolväten reagerar med gasformigt koldioxid och vatten för att bilda kolmonoxid och vätgas. De olika faserna sammanfattas i Figur 10.

Det finns olika sorters förgasare som kan användas för förgasning av biomassa. Vilken typ som väljs är i hög utsträckning beroende av vilken storlek förgasaren är tänkt att ha. En indelning av förgasare görs i fastbädd-, fluidbädd- och suspensionsförgasare, där fastbäddsförgasare används i liten skala ($<5 \text{ MW}_{\text{th}}$), fluidbäddsförgasare i mellanregistret ($5\text{-}200 \text{ MW}_{\text{th}}$) och suspensionsförgasare förespråkas vid stora förgasningsanläggningar ($100\text{-}700 \text{ MW}_{\text{th}}$).



Figur 10. Schematisk översikt över de i förgasning ingående faserna, samt deras reaktioner och produkter

Innan gasen som erhålls vid förgasningen kan användas, oberoende av applikation, måste den renas på olika sätt. De största bekymren är partiklar och tjäror, men även svavel och ammoniak ställer till bekymmer i vissa applikationer (Boerrigter et al., 2004). Partiklar bildas i olika stor utsträckning vid förgasning, kraftigt beroende av förgasartyp, och måste avskiljas före nerströmsprocesser. En första grov separation sker vanligtvis i ett eller flera cyklonfilter som håller hög temperatur. Därefter kan vanliga filter av keramiska eller textila material användas för att ta bort de fina partiklarna. För att avlägsna tjära från produktgasen så finns det flera olika alternativ, men det allra viktigaste är att förgasaren körs vid optimala förhållanden

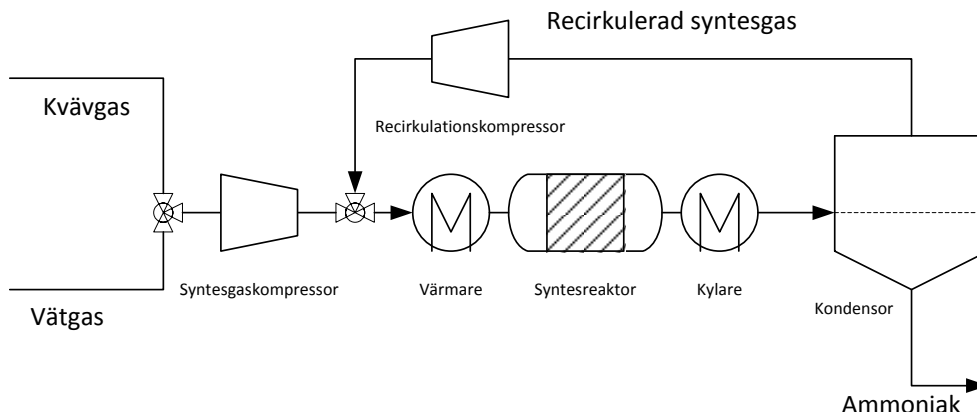
för att minimera den initiala tjärbildningen. Svavelinnehållet i gasen varierar kraftigt beroende på vilken typ av biomassa som används, men halter uppemot 100 ppm är inte ovanligt (Brandin och Liliedahl, 2011). Så höga halter svavel är inte acceptabla om det finns katalytiska processer nerströms, som vid produktion av ammoniak, därför måste svavelföreningar avlägsnas. Koldioxid och kolmonoxid kan avlägsnas genom kemisk skrubbing på liknande sätt som efter reformering av metan, vilket beskrevs ovan.

4.2 Produktion av enkla kvävegödselmedel

Beskrivningen i detta kapitel om processer för produktion av kvävegödselmedel grundar sig till stor del på de skrifter som EFMA givit ut om *Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry* (EFMA, 2000), UNIDO/IFDC:s *Fertilizer Manual* (UNIDO/IFDC, 1998) samt *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (Appl, 2012).

4.2.1 Produktion av ammoniak

Alla typer av kvävegödselmedel produceras av ammoniak, vilket således är grunden för kvävegödselproduktion. Ammoniak produceras genom att reagera vätgas med kvävgas i den så kallade Haber-Bosch-processen. Processen sker under högt tryck (100-250 bar) och vid medelhög temperatur (350-550°C). Ett förenklat flödesschema för processen visas nedan i Figur 11. Kvävgas och vätgas komprimeras till högt tryck. Syntesgasen värms sedan och därefter genomförs själva syntesreaktionen i en eller flera reaktorer över en fast bädd bestående av en järnkatalysator. Då omsättningen i varje steg är låg, omkring 20 %, används ofta flera reaktorer i serie med mellankylning, eller en mer komplex reaktor där kallare gas introduceras efterhand för att kyla reaktorn, en så kallad quenchreaktor. Ammoniaken kyls sedan ner och kondenseras för att avskilja den producerade ammoniaken från den resterande syntesgasen, vilken återcirkuleras och blandas med den färskva syntesgasen. Produktionen är idag mycket storskalig och produktionskapaciteten är ofta omkring 500 000 ton per år för moderna anläggningar.



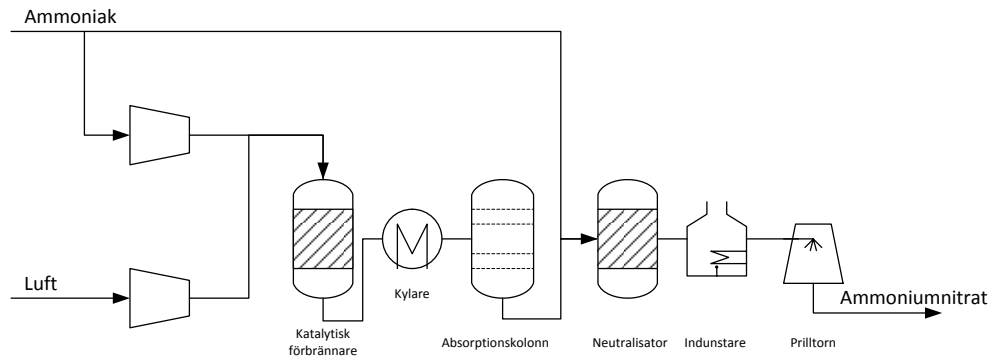
Figur 11. Förenklat flödesschema för ammoniaksyntesprocessen.

En mycket viktig utvecklingstrend sedan processen introducerades i början av nittonhundratalet har varit att minska den energiåtgången för att producera ammoniak. En högre energieffektivitet har åstadkommit genom att utveckla tekniken för att producera vätgas – från kolförgasning till avancerad ångreformering av naturgas – och genom att effektivisera själva syntesprocessen med förbättrad värmeåtervinning, kylning och kompressionsteknik. Denna utvecklingstrend med fokus på energieffektivisering har dock inte – och *kan inte* – bryta produktionens fossilberoende, endast minska den negativa miljöpåverkan av ett ineffektivt utnyttjande av fossila resurser.

4.2.2 Ammoniumnitrat

Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) är ett salt som bildas av ammoniak och salpetersyra. Salpetersyran produceras genom förbränning av ammoniak till kvävedioxid (NO_2) vid hög temperatur (800-1000 °C) över katalysatornät som är belagda med ädelmetallerna platina och rhodium. Kvävedioxiden kyles sedan ner och absorberas i vatten för att bilda salpetersyra (HNO_3). Processen sker antingen vid ett och samma tryck i hela processen eller så genomförs processtegen vid olika tryck där trycket höjs vid absorptionen för att öka effektiviteten.

Ammoniumnitrat bildas sedan genom att neutralisera salpetersyra med ammoniak. Denna process skapar stora mängder värme som kan användas genom att producera ånga för att driva processen och tillgodose eventuella andra värmebehov. Den neutraliserade lösningen av ammoniumnitrat indunstas för att minska vattenhalten i produkten innan den slutligen granuleras eller prillas för att kunna hanteras i fast form som slutlig produkt. Ett förenklat flödesschema för processen visas nedan (Figur 11). Produktionen är idag storskalig med en typisk produktionskapacitet på omkring 500 000 ton per år för moderna anläggningar.

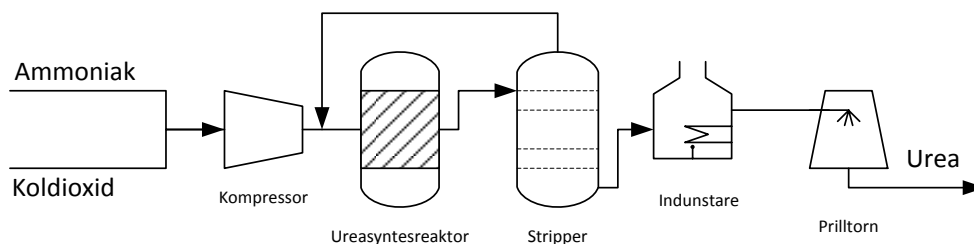


Figur 11. Förenklat flödesschema för produktion av ammoniumnitrat.

Vid den katalytiska förbränningen av ammoniak bildas lustgas (N_2O), som är en stark växthusgas. I absorptionsprocessen bildas kvävedioxid (NO_2) vilket är ett ämne som bidrar till förorening. För att minska utsläppen av N_2O och NO_2 och därigenom miljöpåverkan från processen tillämpas ofta en recirkulering av gaserna och SCR-rening (selektiv katalytisk reduktion) (Kamphus, 2014). Vid indunstningen av ammoniumnitratlösningen frigörs också en del ammoniak som måste hanteras innan ångan kan användas eller släppas ut. Ammoniumnitrat används förutom som gödselmedel även som sprängämne då det är mycket brandfarligt och explosivt då det blandas med andra brännbara ämnen, den olycka som inträffade i West, Texas, USA i april 2013 visar tydligt på riskerna med hantering av ammoniumnitrat. Detta gör att det krävs omfattande säkerhets-, kontroll- och reningssystem för att säkerställa en säker och miljövänlig produktion.

4.2.3 Urea

Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) är ett fast ämne som bildas genom att reagera ammoniak med koldioxid i en tvåstegsreaktion med ammoniumkarbamat som mellanprodukt. Reaktionerna sker parallellt i samma syntesreaktor där värmen från den första reaktionen driver den andra. Ideala förhållanden för de två reaktionerna är däremot mycket olika, vilket lett till processlösningar där man kompromissar med ett förhållandevis högt tryck (cirka 150 bar) men måttlig temperatur ($180\text{--}190^\circ\text{C}$) och ett överskott av ammoniak i förhållande till koldioxid. För att nå tillräcklig produktivitet och energieffektivitet används en komplex process där ammoniak och koldioxid strippas från urealösningen och recirkuleras till syntesreaktorn. Därefter ökas koncentrationen av urea i lösningen för att kunna producera slutprodukten, urea i fast form, genom prillning eller granulering.



Figur 12. Förenklat flödesschema för produktion av urea.

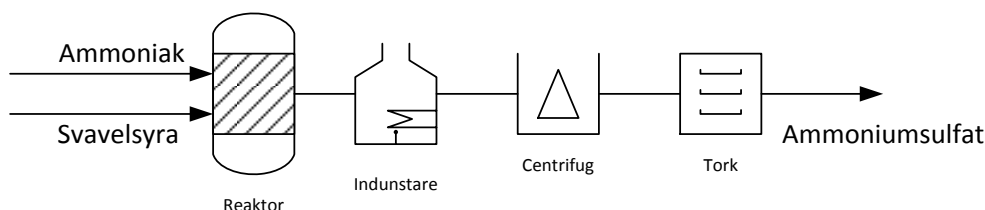
I produktionsprocessen av urea bildas också biprodukterna biuret - vilken är oönskad i gödselmedel eftersom den kan vara giftig för grödor - samt cyansyra som kan förorena processvattnet och skapa lokala miljöproblem. I övrigt är den största risken för utsläpp att ammoniak läcker ut i processvatten från produktionen. Andra problem med processen är att urea är extremt korrosivt vilket gör det nödvändigt att med avancerade material i processutrustningen. Därtill kontrolleras ofta korrosionen genom att introducera en mindre mängd syre (luft), vilket dock måste kontrolleras noga så att inte en explosiv blandning av vätgas och syrgas uppstår.

Eftersom produktionen av urea kräver såväl ammoniak som koldioxid som råvaror är urea bara intressant att tillverka när båda dessa finns tillgängliga, som vid reformering av biogas eller förgasning av biomassa. Produktion av urea då elektrolys av vatten till vätgas används som teknik för ammoniakproduktionen är därför troligen mindre intressant, eftersom det skulle kräva att koldioxid tillförs på något annat sätt, d.v.s. genom att förbränna ett extra bränsle eller tillförsel av koldioxid från en extern källa.

4.2.4 Ammoniumsulfat

Ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ är ett salt som bildas av ammoniak och svavelsyra. Ammoniumsulfat bildas som biprodukt vid vissa kemiska processer och har också länge producerats som biprodukt vid stålverk, men kan också produceras som huvudprodukt från ammoniak och svavelsyra. Svavelsyra måste då tillföras processen utifrån. Idag produceras majoriteten av världens svavelsyra från svavel som utvunnits genom att avskilja svavel från råolja vid oljeraffinaderier och produktionen av ammoniumsulfat med svavelsyra från sådan produktion blir därför även fortsättningsvis beroende av produktionen av petroleumprodukter, om än indirekt.

I processen blandas ammoniak med koncentrerad svavelsyra i en mättnadsreaktor. Ämnena bildar då kristaller av ammoniumsulfat i syran. Slurryn indunstas och centrifugeras för att koncentrera de fasta kristallerna, som sedan torkas i en trumtork eller fluidiserad bädd (Figur 13). Processen för att tillverka ammoniumsulfat är i sig inte särskilt komplicerad och ger inte upphov till några större utsläpp, den största källan till utsläpp är ammoniumsulfat från torken.



Figur 13. Förenklat flödesschema för produktion av ammoniumsulfat.

Riskerna och svårigheterna i processen handlar främst om att hantera stora mängder högkoncentrerad svavelsyra, vilket är mycket korrosivt och ställer särskilda krav på material i anläggningen. Produkten används främst som gödselmedel i utvecklingsländer. Att producera ammoniumsulfat lokalt i mindre skala skulle ställa krav på specifikt behov av svavel i jordarna för att vara intressant.

5 En jämförande analys

Teknik för att producera grönt kväve finns som visats i de första delarna av denna rapport tillgänglig. Det är ”bara” att sätta ihop den för att kunna starta produktion. Tidigare studier av SLU och JTI visar dock på utmaningarna som ligger i att matcha produktionsskala för de olika delarna. System för att producera förnybar energi är ofta i mindre skala, medan skalan för produktion av ammoniak och kvävegödselmedel idag i allmänhet är mycket stor. Det finns i grunden inte några särskilda tekniska hinder för att skala ner produktionen av ammoniak, det är främst av ekonomiska och företagskulturella skäl gödselmedelproduktionen blivit så storskalig.

De processer för att producera ammoniak från förnybara råvaror som beskrivits i den inledande kapitlen har studerats i detalj genom att modelleras med programvaran Aspen Plus för att beräkna mass- och energibalanser samt produktionskostnaden för de olika alternativen. Modelleringen finns detaljerat beskriven i Tunå et al. (2014). I de kommande kapitlen redovisas resultaten i närmare detalj med avseende på mass- och värmebalanser, investerings- och produktionskostnader. Därutöver redovisas också mass- och värmebalanser och produktionskostnader för produktion av olika typer av kvävegödsel. Dessutom presenteras en sammanställning av resultaten från ett antal livscykelanalyser som studerar miljöpåverkan (utsläpp av växthusgaser) från produktion av grönt kväve.

5.1 Mass- och energibalanser

För att bestämma hur mycket som kan produceras av de olika slutprodukterna med de olika metoderna har systemens mass- och värmebalanser beräknats (Tunå et al.,

2014). Dessa balanser har beräknat framställd mängd gödselmedel, men har också givit information kring mängden fjärrvärme och spillvatten som bildas i de olika processerna. Den viktigaste informationen är hur mycket gödselmedel som kan produceras vilket redovisas i Tabell 3. Givet en gödslingsnivå på 130 kg N/ha ger den minsta anläggningen (3 MW elektrolys) tillräckligt med kväve för att gödsla ca 13 000 ha. Den stora anläggningen (50 MW förgasning) ger med samma antagande tillräckligt för 180 000 hektar.

Tabell 3. Mängd gödselmedel som teoretiskt kan produceras i de olika fallen [ton/år].

	Ammoniak	Ammoniumnitrat	Ammoniumsulfat	Urea
3 MW elektrolys	2 030	4 770	7 880	-
10 MW elektrolys	6 760	15 900	26 200	-
5 MW biogas	3 730	8 770	14 500	6 580
10 MW biogas	7 480	17 600	29 000	13 200
50 MW förgasning	28 700	67 500	111 000	50 600

Som visas i tabellen så skiljer det sig en hel del mellan hur mycket som kan produceras för de olika gödselmedlen. Ammoniaken är en relativt lätt komponent och därför blir massan produkt relativt låg jämfört med de andra kvävegödselmedlen. Störst mängd produceras i de fall som producerar ammoniumsulfat, men då ska också relativt stora mängder svavelsyra tillsättas. Räknat per ton N i produkt, producerar de olika scenarierna ungefär mellan 1 700 – 24 000 ton N/år, eller 5 – 65 ton N per dag. Detta är alltså mycket småskaligt jämfört med dagens fossila anläggningar som kan producera uppemot 3 000 ton ammoniak per dag (nästan 2 500 ton N per dag).

Vad gäller urea har inte gödselmedel beaktats som ett alternativ för de fall som nyttjar elektrolys av vatten för vätgasproduktion, eftersom koldioxid i så fall måste tillföras externt vilket bedöms som praktiskt ogenomförbart i det generella fallet. I de fall som finns rapporterade räcker den koldioxid som genereras internt för produktionen. I ammoniumnitratfallen används hälften av ammoniaken för att producera salpetersyra. Tabell 4 nedan ger mängden salpetersyra, svavelsyra och koldioxid som behövs vid synteserna.

Tabell 4. Mängd salpetersyra (för ammoniumnitrat), svavelsyra (för ammoniumsulfat) och koldioxid (för urea) som teoretiskt behövs i de olika fallen [ton/år]. Salpetersyran produceras från delar av ammoniaken, svavelsyran måste tillföras processen och koldioxiden bildas vid vätgasproduktionen innan ammoniakproduktionen då biogas eller förgasning används.

	Salpetersyra	Svavelsyra	Koldioxid
3 MW elektrolys	3 760	5 850	-
10 MW elektrolys	12 500	19 500	-
5 MW biogas	6 900	10 700	4 830
10 MW biogas	13 800	21 500	9 680
50 MW förgasning	53 100	82 600	37 100

Som kan ses utgör ammoniak en mindre del i AS-fallet där 74 % av vikten kommer från svavelsyra som importeras till produktionsplatsen. För att syntetisera de olika kemikalierna krävs också andra insatsvaror där vatten är den som förbrukas mest. Vidare bildas också spillprodukter där spillvatten är den som produceras mest. Behov av vatten för processerna och produktionen av spillvatten redovisas i Tabell 5.

Det är uppenbart så att processerna både behöver vatten och genererar spillvatten. Den process som ger minst spillvatten är de som är elektrolysbaserade och med AS (eller ammoniak) som slutprodukt. De förgasningsbaserade ger en hel del spillvatten och det samma gäller för de processer där AN eller urea är slutprodukter. Spillvattnet innehåller olika föroreningar från processen och behöver därför renas, vilket blir en kostnad för processen. Förgasningsprocessen kan ge upphov till komplexa föroreningar i spillvattnet som är mycket kostsamma att rena, medan reningen för elektrolyssystemen är enklare.

Tabell 5. Mängd vatten som behövs och mängd spillvatten som bildas i de olika produktionsprocesserna [ton/år].

	Ammoniak		Ammoniumnitrat		Ammoniumsulfat		Urea	
	Vatten	Spillvatten	Vatten	Spillvatten	Vatten	Spillvatten	Vatten	Spillvatten
3 MW elektrolys	4 030	-	5 160	1 610	4 030	-	4 030	-
10 MW elektrolys	13 400	-	17 200	5 370	13 400	-	13 400	-
5 MW biogas	10 500	7 500	12 600	10 500	10 500	7 500	10 500	9 470
10 MW biogas	20 900	14 900	25 100	20 800	20 900	14 900	20 900	18 900
50 MW förgasning	60 400	58 700	76 300	81 500	60 400	58 700	60 400	73 900

Vad gäller värmen som produceras så har den här angivits i fjärrvärmekvalitet (120 °C), men delar skulle kunna tas ut som värme av högre kvalitet, dvs ånga som kan användas av andra processer med behov av högkvalitativ värme. Tabell 6 sammanfattar detta möjliga värmeunderlag, det ska dock tilläggas att ytterligare värme i form av spillvatten vid 40-70 °C är tillgängligt, vilket kan nyttiggöras för exempelvis lokala uppvärmningsbehov.

Tabell 6. Mängd fjärrvärme som kan nyttjas från produktionen [MW].

	Ammoniak	Ammoniumnitrat	Ammoniumsulfat	Urea
3 MW elektrolys	0,46	1,5	0,46	0,46
10 MW elektrolys	1,5	5,1	1,5	1,5
5 MW biogas	1,5	3,5	1,5	1,5
10 MW biogas	3,0	6,9	3,0	3,0
50 MW förgasning	15	30	15	15

Som kan ses från tabellen är det produktion av AN som ger mest spillvärme. Denna härrör både från syntesen av salpetersyra från ammoniak och från reaktionen

mellan salpetersyran och ammoniak för att bilda AN (UNIDO/IFDC, 1998). I AS-fallet bildas värme, men den är bara tillgänglig vid 60°C (UNIDO/IFDC, 1998). Vid produktion av urea har processen små möjligheter producera någon överskottsvärme, i praktiken kan det snarare vara ett litet nettobehov (EFMA, 2000).

5.2 Kostnadsberäkningar

Det finns inte många tidigare studier på kostnader för småskalig produktion av kvävegödsel. Vi redovisar här både investeringskostnader och produktionskostnader från två tidigare studier samt nya beräknade kostnader för ammoniak och ett urval av gödselmedel. Vi presenterar i de följande kapitlen tre kostnadsberäkningar, som har använt olika metoder:

- Baserat på modellering av ammoniakproduktion (Tunå et al., 2014)
- Baserat på litteraturstudier omräknade till liten produktionsskala med skalfaktor (Ahlgren et al., 2011)
- Baserat på korrelation mellan kostnaden för kväve i form av ammoniak och andra gödselmedel från prisstatistik (nya beräkningar)

5.2.1 Modellering av ammoniakproduktion

I Tabell 7 visas de investerings- och produktionskostnader som beräknades utifrån modellerna av Tunå et al. (2014). Fördelning mellan driftskostnader och fasta kostnader studerades också. Det är tydligt att investeringskostnaden följer produktionsstorleken. Förgasningsalternativet faller väl ut med låga produktionskostnader, medan skillnaden mellan de övriga alternativen är små för de totala produktionskostnaderna. Det finns dock skillnader mellan andel rörliga/fasta kostnader. Generellt kan sägas att en hög andel rörliga kostnader ger ett större beroende av råvarupriser, medan större andel fasta kostnader ger ett större beroende av ränteläget.

Tabell 7. Kostnader för produktion av grön ammoniak beräknade i Tunå et al. (2014)

Scenario	Total investeringskostnad [Miljoner kr]	Fördelning rörliga/ fasta kostnader [%]	Specifik produktionskostnad [kr/kg N]
3 MW elektrolys	73	60/40	15
10 MW elektrolys	210	68/32	14
5 MW biogas	100	77/23	15
10 MW biogas	170	81/19	14
50 MW förgasning	840	50/50	8

5.2.2 Beräkning med skalfaktor

I en studie av Ahlgren et al. (2011), studerades kostnaderna för två scenarier för produktion av grönt kväve där elektrolys av vatten används för att producera vätgas

till ammoniakproduktionen, och ammoniaken sedan processas vidare till ammoniumnitrat:

- Småskalig produktion, vindkraft → 2.5 ton ammoniumnitrat per dag
- Storskalig produktion, biokraftvärme → 510 ton ammoniumnitrat per dag

Produktionskostnader för el beräknades baserad på litteraturstudier, kraftvärmen beräknades till en relativt låg kostnad (40 öre/kWh) då värmeproduktionen och gröna elcertifikat räknades som en intäkt för elproduktionen och drogs av från de totala kostnaderna. I det småskaliga scenariot räknades med att ett vätgaslager används för att jämna ut produktionen under de dagar det inte blåser. Kostnader för de kemitekniska processerna (ammoniak, salpeter och ammoniumnitrat) baserades på litteraturstudier, framförallt användes data i UNIDO (1983) justerade till dagens kostnadsnivå, samt med en skalfaktor på 0,65.

Tabell 8. Kostnader för produktion av ammoniumnitrat [kr/kg N] beräknade av Ahlgren et al. (2011).

	Storskalig kraftvärme	Småskalig vindkraft
Produktion av el	2,5	4,3
Produktion av vätgas	1,0	7,5
Vätgaslager	-	1,7
Ammoniakprocess	2,1	13,8
Salpeterprocess	1,2	7,8
Ammoniumnitratprocess	1,7	7,4
Totalt, produktionskostnad	8,0	42,6

Den beräknade kostnaden för småskalig vindkraft-till-ammoniak blir alltså 27,3 kr/kg N, vilket kan jämföras 15 kr/kg N beräknade i föregående kapitel. Skillnaderna kan bero på olika antaganden kring investeringskostnader, avskrivningstider, produktionseffektivitet etc.

5.2.3 Uppskattning av kostnader för enkla kvävegödselmedel

Baserat på olika alternativa processer för att producera ammoniak från förnybar energi, med elektrolys, från biogas eller förgasad biomassa, beräknades produktionskostnaden för ammoniak i föregående kapitel. Baserat på en korrelation mellan kostnaden för kväve i form av ammoniak och andra gödselmedel från prisstatistik för de senaste 10 åren enligt US Department of Agriculture uppskattades därefter kostnaden för att producera de andra gödselmedlen från den förnybara ammoniaken (Tabell 9, 10 och 11). Priset per kg N säger något om hur mycket kväve kunden får per krona, men eftersom ammoniumsulfat även innehåller sulfat kan det ge en missvisande bild och det är därför intressant att även redovisa pris per kg produkt. Ur tabellerna kan vi utläsa att förgasningsalternativen faller väl ut, särskilt för urea. Vi kan också se att urea generellt sett hamnar ganska lågt, sett per kg N. Skillnaden mellan urea och ammoniumnitrat är dock inte väldigt

stor. Vi kan också konstatera att skillnaden i uppskattat produktionspris mellan elektrolys och biogas inte är särskilt stor. Billigast är ammoniak, men som tidigare nämnts är detta inte ett gödselmedel som vi använder i Sverige.

Tabell 9. Medelkostnad för gödselmedel år 2004-2013 enligt statistik från USDA [kr/kg produkt].

Ammoniak	Ammoniumnitrat	Ammoniumsulfat	Urea
4,9	3,3	2,8	3,6

Tabell 10. Beräknad kostnad för kväve i olika gödselmedel baserat på förnybar ammoniak [kr/kg N i produkt].

	Ammoniak	Ammoniumnitrat	Ammoniumsulfat	Urea
3 MW elektrolys	15	24	34	-
10 MW elektrolys	14	23	32	-
5 MW biogas	15	24	32	20
10 MW biogas	14	23	31	19
50 MW förgasning	8	14	19	11

Tabell 11. Beräknad kostnad för gödselmedel baserat på förnybar ammoniak [kr/kg produkt].

	Ammoniak	Ammoniumnitrat	Ammoniumsulfat	Urea
3 MW elektrolys	12	9	7	-
10 MW elektrolys	12	8	7	-
5 MW biogas	12	8	7	9
10 MW biogas	11	8	6	9
50 MW förgasning	7	5	4	5

5.2.4 Jämförelse med prisutvecklingen på fossilbaserat kväve

Av de olika sätten att beräkna kostnaden för produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi som redovisades ovan, kan vi konstatera att priset varierar mycket beroende på olika antaganden i beräkningarna, val av teknik, val av slutprodukt och val av storlek på produktionen.

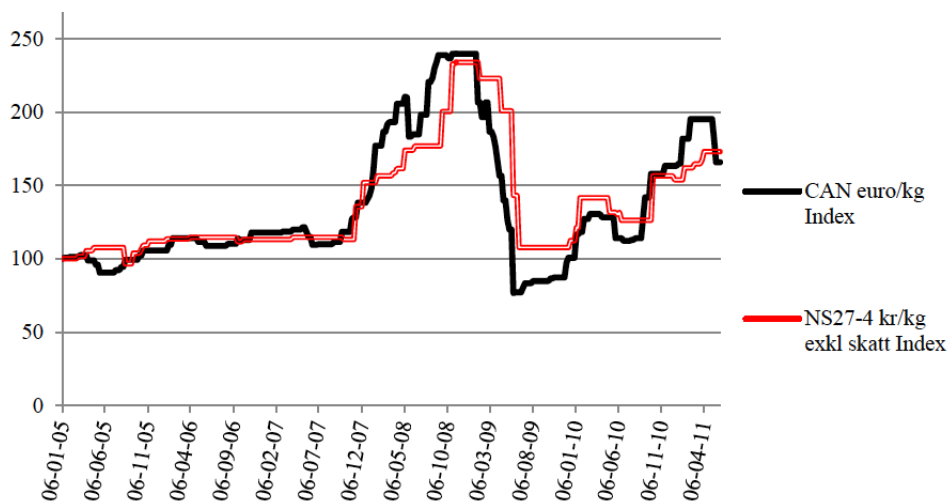
För att avgöra det gröna kvävet konkurrenskraft behöver vi studera priserna för konventionellt producerat kväve. Tillgången till data är dock begränsad vilket påverkar möjligheterna att göra en fullständig analys av prisutvecklingen (Statskontoret, 2011).

Statskontoret har gjort en större utredning inför avvecklingen av kvävegödselskatten den 31 december 2009. Avvecklingen av skatten på handelsgödsel syftade till att öka det svenska jordbrukets konkurrenskraft. Innan skatten slopades var Sverige i praktiken ensamt inom EU att tillämpa en generell skatt på kvävegödsel. Innan slopandet uppgick skatten till 1,80 kronor per helt

kilogram kväve i handelsgödsel, motsvarade cirka 20 procent av priset på handelsgödsel. Skatten infördes år 1995 som ett ekonomiskt styrmedel för att minska utsläppet av kväve och kadmium från jordbruket till naturen (Statskontoret, 2011). Eventuellt kan kväveskatten komma att införas igen (Regeringen, 2014).

Statskontoret konstaterar att marknaden i Sverige domineras av ett fåtal aktörer, samt att tillgången till prisdata är väldigt begränsad. En förbättrad pristransparens pekas ut som en faktor som kan skapa bättre konkurrensförutsättningar på handelsgödselmarknaden. Statskontoret konstaterar att gödselpriserna historiskt haft en stabil utveckling och att efterfrågan följt odlingssäsongernas cykliska mönster. Från och med början av 2000-talet fram till år 2007 fanns ett säsongsbetonat mönster i prisutvecklingen med tydliga prisnedgångar i juli. Mönstret bröts i september 2007. En snabb och kraftig prisökning inleddes på i princip all handelsgödsel för jordbruket. Prisökningen nådde sin kulmen under vintern 2008 och bröts tvärt i början av sommaren 2009 då efterfrågan minskade kraftigt och priset sjönk till tidigare nivåer (Statskontoret, 2011).

Statskontoret redovisar inga absoluta priser utan endast prisindex (Figur 14). Vi kan dock notera att under 2004-2007 låg priset på kväve i Sverige mellan 8-10 kr/kg N (Axan NS 27-4). Under slutet av 2008 låg rekordpriserna på 18 kr/kg N. Under 2009 sjönk istället priserna till rekordlåga 7 kr/kg N (Ahlgren et al., 2011). Vi kan också påpeka att dagsnoteringen den 15 december 2014 på NS 38-8 är 4,08 kr/kg, det vill säga 10,7 kr/kg N (ATL, 2014).



Figur 14. Prisutveckling juni 2005-juni 2011 för kvävegödseln CAN och Axan exkl. skatt. Index 100=juni 2005 (Statskontoret 2011).

Vad påverkar då handelsgödselpriset? Produktionsfaktorer som till exempel kostnaden för råvaror och transporter har naturligtvis en stor betydelse. Det vanliga

råmaterialet är naturgas och priset på kvävegödsel är starkt kopplat till naturgaspriserna som i sin tur har en stark koppling till oljepriset. Efterfrågan påverkar också naturligtvis priset, samt eventuella marknadsimperfectioner (Statskontoret, 2011).

Om vi sammanfattar det gröna kvävet potentiella konkurrenskraft med de fossilbaserade alternativen kan vi säga att särskilt förgasningsalternativen visar en mycket intressant potential att vara konkurrenskraftiga. Dock är förgasningstekniken inte fullt kommersialiserade ännu, även om det finns lovande demonstrationsprojekt. De andra alternativen som är möjliga att utveckla till full produktion inom en snar framtid blir dyrare än de fossilbaserade. Bland dessa alternativ verkar dock biogas till urea som ett lovande alternativ, men trots detta kan kostnaden bli dubbelt så hög som för dagens fossilbaserade kväve. En konkurrensfördel vore om fossilt kväve blev belagt med skatt och grönt kväve kunde skattebefrias. Vi vet dock i nuläget inte om en skatt kommer att införas, och eftersom motivet till skatten är att minska övergödning och förurning av mark och vatten är det tveksamt om det går att genomföra.

Det är möjligt att ett högre fossilenergipris ger högre kvävepris vilket kan göra grönt kväve mer konkurrenskraftigt. Ett högre fossilenergipris kan dock få vissa effekter på produktionskostnaden för grönt kväve, t.ex. kan råvarukostnader och transportkostnader öka. Dessa återkopplingar måste utredas närmare. Det kan dock förutspås ett jämnare produktionspris med mindre eller ingen koppling till råoljepriset vid inhemsk, förnybar produktion av kvävegödsel.

5.3 Miljöbedömning

Det har genomförts ett antal studier i vilka miljöeffekterna av kvävegödselmedel baserade på förnybar energi har analyserats utifrån ett livscykelperspektiv, så kallade livscykelanalyser (LCA). De studier som identifierats i forskningslitteraturen presenteras i Tabell 13.

Sammanställningen visar att de hittills utförda studierna fokuserat på ammoniak och ammoniumnitrat, däremot saknas studier på exempelvis urea. De flesta studier inkluderar primär energiinsats och utsläpp av växthusgaser, påverkan på övergödning och förurning förekommer i ett par av studierna men i övrigt saknas andra miljöpåverkanskategorier. Alla identifierade studier är så kallade cradle-to-gate, det vill säga de tar inte hela livscykeln (inklusive användning och avfallshantering) i beaktande utan fokuserar på produktionen av kvävegödseln. Ett flertal av studierna har undersökt termokemisk förgasning och har därmed ett med hypotetiskt/futuristiskt perspektiv med antagande om storskalig tillförsel av biomassa till anläggningarna. Endast studien av Tallaksen et al. (2015) grundar sig på ett verkligt fall, men även där bygger data på modellering och är en uppskalning från en pilotanläggning. Studien av Tallaksen et al. (2015) är också den enda som inte baserar sig på bioenergi.

De redovisade studierna är fördelade mellan typerna bokförings- och konsekvens-LCA. De flesta studierna använder sig av bokförings-LCA vilket innebär att de snarast bokför miljöpåverkan utifrån ett statistiskt perspektiv på produktionsvillkoren, till skillnad mot konsekvens-LCA som studerar miljöpåverkan av en förändringsprocess. Dock ska här påpekas att indelning mellan dessa två typer av LCA inte är entydig då det inte finns en vetenskaplig konsensus kring en sådan uppdelning (Zamagni et al., 2012). Det är å andra sidan viktigt att veta hur modelleringen är genomförd vid en analys av resultaten. Som ett exempel kan nämnas hur biprodukter hanteras; i bokförings-LCA används typiskt allokering medan konsekvens-LCA ofta använder systemexpansion. Men här finns också andra varianter, i t.ex. Tallaksen et al. (2015) används systemexpansion baserad på medelvärden.

Primärenergiinsatsen varierar mellan 38 – 65 MJ per kg N, dock är i bioenergifallen en stor del av primärenergin inbyggd i biomassan och den fossila delen är relativt liten. Besparingspotentialen av fossil energi är alltså väldigt stor i jämförelse med konventionellt kvävegödsel. Ett undantag är konsekvensstudien av Ahlgren et al. (2012) där en ammoniakanläggning antas integreras i ett existerande kraftvärmeverk. Den el som används antogs här ersättas med kolkraft på marginalen vilket ger upphov till stor fossil energianvändning. I ett par av studierna är fossilanvändningen negativ, ett icke-intuitivt resultat som kan uppkomma i konsekvens-LCA-studier då biprodukter tänks ersätta sämre alternativ på marknaden.

Primärenergianvändningen och utsläppen av växthusgaser i dagens fossilbaserade kvävegödselproduktion varierar kraftigt bland annat beroende på vilken typ av råvara som används och hur modern anläggningen är i fråga om energieffektivitet (Tabell 12). Viktigt är också om anläggningen har installerat katalytiskt filter för minska utsläppen av lustgas. Producenten Yara har t.ex. en klimatgaranti där de garanterar att all gödselmedel som säljs i Sverige, Norge, Danmark och Finland har utsläpp under 3,6 kg CO₂-ekvivalenter per kilo N.

Tabell 12. Primärenergianvändning och utsläpp av växthusgaser för konventionell fossilbaserad produktion av ammoniak och ammoniumnitrat, medelvärden för Västeuropa och globalt, inom parantes min- och maxvärden. Från litteraturstudie av Kool et al. (2012).

Region	Vattenfri ammoniak		Ammoniumnitrat	
	Primärenergi [MJ/kg N]	Växthusgasutsläpp [kg CO ₂ -ekv/kg N]	Primärenergi [MJ/kg N]	Växthusgasutsläpp [kg CO ₂ -ekv/kg N]
Västeuropa	41,6	2,9 (2,2 – 3,4)		8,0 (5,3 – 10,0)*
Globalt	52,8 (41,6 – 90,1)	4,2 (3,3 – 5,3)	49,7	9,5 (6,7 – 14,2)

* Mycket tyder på att dessa värden förmodligen är lägre, då flera av de europeiska producenterna installerat katalytiska lustgasfilter, läs mer i huvudtexten.

Utsläpp av växthusgaser för produktion av kvävegödselmedel baserade på förnybar energi varierar i intervallet 0,1 – 1,5 kg CO₂-ekv/kg N undantaget

konsekvensstudien av Ahlgren et al. (2012) där utsläppen uppgår till 4,7 kg CO₂-ekv/kg N. De flesta studier pekar alltså på en avsevärd klimatnytta jämfört med fossila alternativ. Det är dock svårt att dra några generella slutsatser i jämförelse mellan de olika förnybara alternativen. Det har till viss del att göra med att studierna har olika antaganden (bokföring/konsekvens) och att studierna fokuserat på olika slutprodukter. Dock pekar både studien av Ahlgren et al. (2012) och Tallaksen et al (2015) på vikten av det omgivande energisystemet för miljöpåverkan av gödselmedelsproduktionen. Om energi som tidigare användes för elproduktion istället börjas användas för att producera kvävegödsel, behövs elkraftsproduktionen ersättas på något sätt vilket kan ha stor betydelse för den sammanlagda miljöbedömningen. Med detta sagt kan vi dock konstatera att alla studier som studerat förgasning av biomassa presenterar klimatpåverkande utsläpp i intervallet 0,2 – 0,8 kg CO₂-ekv/kg N med ett medelvärde på 0,6 kg CO₂-ekv/kg N. Rötning av grödor har ett mindre underlag av studier men verkar ge något högre klimatpåverkande utsläpp än förgasning. Elektrolys med vindkraft placerar sig lågt i utsläpp, dock visar känslighetsanalyser i den studien på betydelsen av omgivande energisystem samt hur stor andel av el som antas köpas från elnätet.

Tabell 13. Sammanställning av livscykelanalyser på kvävegödsel baserad på förnybar energi; ammoniak samt ammoniumnitrat. Siffrorna avser energianvändning och utsläpp av växthusgaser för hela livscykeln inklusive produktion av råvaror. Fossil energi är i de flesta studier beräknade som primär energi.

Gödselmedel	Energibärare	Teknik för vätgasproduktion	Anläggnings- storlek	Primärenergi [MJ/kg N]	Fossil energi [MJ/kg N]	Växthusgasutsläpp [kg CO ₂ -ekv/kg N]	Typ av LCA	Ref
Ammoniak	Vindkraft	Elektrolys	7,4 MW elektrolys	Sverige: 56 USA: 61	Sverige: 1,5 USA: 6,7	Sverige: 0,12 USA: 0,41	Bokföring	Tallaksen et al., 2015
Ammoniak	Träflis	Termokemisk förgasning	380 MW biomassa	--	--	0,79 (-1,8 med CCS)	Bokföring	Tock et al., 2015
Ammoniak	Trä-biomassa	Förgasning	760 MW biomassa	--	--	0,8	Bokföring	Gilbert et al. 2014
Ammoniumnitrat	Grot	Elektrolys i existerande kraftvärmeverk	52 MW elektrolys	178	66	4,7	Konsekvens	Ahlgren et al., 2012
Ammoniumnitrat	Halm	Termokemisk förgasning	85 MW biomassa	38	-2	0,6	Konsekvens	Ahlgren et al., 2012
Ammoniumnitrat	Salix	Termokemisk förgasning	85 MW biomassa	39	-2	0,2	Konsekvens	Ahlgren et al., 2012
Ammoniumnitrat	Vall	Rötning + uppgradering av biogas	50 GWh metan/år	65	3,7	1,5	Bokföring	Ahlgren et al., 2010
Ammoniumnitrat	Majs	Rötning + uppgradering av biogas	50 GWh metan/år	52	2,3	1,1	Bokföring	Ahlgren et al., 2010
Ammoniumnitrat	Halm	Termokemisk förgasning	150 MW biomassa	46	1,4	0,5	Bokföring	Ahlgren et al., 2008
Ammoniumnitrat	Salix	Termokemisk förgasning	150 MW biomassa	46	1,5	0,7	Bokföring	Ahlgren et al., 2008

6 Lokalisering

Lämplig lokalisering av en småskalig gödselmedelfabrik bygger huvudsakligen på två olika faktorer – tillgången till råvaror och avsättningsmöjligheter för produkten. Då råvaran för de olika produktionsvägarna skiljer sig åt behövs olika överväganden för var och en av de beskrivna processalternativen.

Produktionen av ammoniak med elektrolys av vatten kräver tillgång till elkraft. Om denna tänks komma från vindkraft är en samlokalisering med en vindkraftsanläggning av tillräcklig kapacitet för att driva produktionsenheten viktigt. De skalor som undersökts i detta projekt (3 och 10 MW) är ganska små och motsvarar ett mindre antal vindkraftverk i kontinuerlig drift. Med ett antagande om 3 MW stora vindkraftverk, vilket är representativt för många av de medelstora vindkraftverk som installeras i Sverige idag, och en tillgänglighet på 25 % krävs således fyra vindkraftverk för den mindre anläggningen och 13 vindkraftverk för den större anläggningen. Detta får anses vara ett antal som rimligen kan installeras på många håll på den svenska landsbygden.

Produktionen av biogas sker idag främst vid avloppsreningsverk men produktionen i lantbruket – från råvaror som gödsel, jordbruksrestprodukter och energigrödor – ökar stadigt och visionerna pekar på ökad produktion framöver. I Sverige finns idag enligt Energimyndighetens statistik 39 stycken gårdsbiogasanläggningar. De skalor som föreslås här (5 och 10 MW) är klart större än medelstorleken för de svenska gårdsbiogasanläggningarna, men 5 MW-skalan kan troligen realiseras genom att några gårdar går ihop och bygger en gemensam biogasanläggning för rötning av gödsel och restprodukter. För att nå 10 MW-skalan krävs dock troligen såväl en sammanslutning av många gårdar som odling av energigrödor för att på ett effektivt sätt kunna nå de råvaruvolymer som krävs, som modell kan man jämföra med landets största gårdsbiogasanläggning i Jordberga som har en kapacitet på 13-14 MW. Anläggningarna är alltså möjliga att implementera i det svenska jordbruket, även om de är större än vad vi hittills varit vana att se. En rimlig lokalisering är troligen i centrala delar av de mest jordbrukstäta regionerna i landet, t.ex Skåne, Östergötland och Västra Götaland, där det kan finnas chans att samla flera gårdar kring en sådan anläggning.

Den förgasningsbaserade anläggningen kräver främst tillgång till god infrastruktur för att hantera de volymer träbränsle som krävs för att driva anläggningen. Den skala som föreslås i denna studie (50 MW) är mindre än de storskaliga förgasningsanläggningar som föreslagits byggas för kommersiell drift i Sverige (E.ON Bio2G och GoBiGas etapp 2) för vilka logistisk varit en knäckfråga. Den föreslagna skalan är jämförbar med många biobränsleeldade kraftvärmeverk som byggts över hela landet, från Eslöv i Skåne till Skellefteå i Västerbotten. Det finns således goda erfarenheter av att hantera råvarulogistiken i den skala som

föreslagits, och det finns goda möjligheter att tänka sig en lokalisering i stora delar av landet.

Vad det gäller efterfrågan är denna av naturliga skäl koncentrerad till de jordbruksintensiva regionerna i de södra delarna av landet. De mindre, föreslagna anläggningarna kan antas försörja ett lokalt område runt produktionsenheten varför de bör placeras mitt i en jordbruksregion som kan ge en motsvarande efterfrågan. Dock är fast kvävegödsel en relativt koncentrerad, lätthanterlig produkt och billig att transportera jämfört med biomassa som halm eller träflis.

7 Tillämpliga lagar och regler

Hur (och om) en verksamhet ska söka tillstånd finns reglerat i Svensk författningssamlingsförordning SFS1998:899. I en bilaga till SFS 1998:899 (ändrad enligt SFS2008:690), finns en förteckning över verksamheter som är tillstånds- eller anmälningspliktiga. Den produktionsanläggning som planeras att uppföras, tillhör gruppen ”Kemiska produkter” och kommer att kodas 24.15-1 ”anläggning för tillverkning av gödselmedel eller oorganiska kväveprodukter, där tillverkningen omfattar kemiska reaktioner”. Detta medför att produktionsanläggning blir klassad som en A-anläggning och tillstånd ska därmed sökas hos Mark- och miljödomstolen. Högst sannolikt kommer då att krävas en muntlig huvudförhandling med Mark- och miljödomstolen.

Sverige har införlivat Seveso-II direktivet i svensk lagstiftning och föreskrifter (SFS 1999:381 och 382). Arbete pågår för närvarande att implementera Seveso-III direktivet i svensk lagstiftning och föreskrifter det ska vara genomfört senast den 31 maj 2015 och tillämpas från och med den 1 juni 2015.

Enligt nuvarande regelverk är det för den planerade produktionsanläggningen ammoniak, ammoniumnitrat och ammoniumsulfat (om det ingår i blandningar med ammoniumnitrat, annars inte) som skulle kunna beröras av nu gällande sevesolagstiftning då det gäller den maximala mängden av dessa råvaror som samtidigt kan lagras. Ammoniak klassificeras som giftigt och enligt Del 2 ”Särskilda kategorier av farliga ämnen som inte särskilt anges i Del 1” och grupp 2, får den maximala mängden som kan förekomma av dessa uppgå till 50 ton för den lägre kravnivån och 200 ton för den högre kravnivån.

För ammoniumnitrat gäller enligt Del 1 5 000 ton för den lägre kravnivån och 10 000 ton för den högre kravnivån om halten ammoniumnitrat är mellan 15,75 och 24,5%. Om halten överstiger 24,5 eller 15,75 % för blandningar av ammoniumnitrat och ammoniumsulfat får den maximala mängden som kan förekomma av dessa uppgå till 1 250 ton för den lägre kravnivån och 5 000 ton för den högre kravnivån. En verksamhet som klassas enligt den högre kravnivån, ska i samband med att handlingarna för tillståndsansökan enligt miljöbalken tas fram,

även bifoga en Säkerhetsrapport enligt Sevesolagstiftningen. För den lägre kravnivån krävs inte detta men ett handlingsprogram för verksamheten enligt Sevesolagstiftningen ska föreligga.

8 Nyttor och risker

8.1 Identifierade nyttor

Kvävegödsel baserad på förnybar energi och förnybara råvaror tillför nytta till lantbruket och samhället på flera sätt. Det sätt som kvävegödselmedlet direkt tillför nytta genom ökade skördar skiljer sig inte från traditionellt producerat kvävegödsel, och kommer därför inte heller diskuteras närmare i denna text. Denna diskussion fokuserar istället på vilka nyttor som uppkommer då fossilbaserat kvävegödsel ersätts med kvävegödselmedel baserade på förnybar energi.

De huvudpunkter som identifierats handlar om minskat beroende av fossila resurser i jordbruket och samhället, minskade utsläpp av växthusgaser från produktionen av kvävegödselmedel, samt nyttiggörande av lokalt tillgänglig resurser och därmed ökade möjligheter till självförsörjning av råvaror för jordbruket. Dessa identifierade nyttor är naturligtvis tätt sammankopplade men kan ändå värderas olika beroende på vilket perspektiv man närmar sig frågan ifrån. Gemensamt för dessa nyttor är att de alla främst är samhällsnyttor, men att det är svårare att peka på hur de tillför nytta för den enskilde jordbrukaren.

8.1.1 Minskat beroende av fossila råvaror

Kampen om de tillgängliga fossila resurserna hårdnar i världen när efterfrågan ökar på dessa resurser för produktion av el, värme, transportbränslen och materiella produkter, som exempelvis gödselmedel och andra kemikalier. Förutom att det är väl känt att dessa resurser bara är tillgängliga i en begränsad mängd vilket tvingar oss att hitta alternativ till användning av fossila resurser för att säkerställa jordbrukets produktion gör också konkurrensen om de fossila resurserna att priset stiger. Ett minskat beroende av konventionellt kvävegödsel skulle således minska jordbrukets utsatthet för kraftiga svängningar på världsmarknaderna för fossila resurser, och kunna ge en ökad stabilitet i kostnaderna, vilket också kan ses som en nytta för den enskilde jordbrukaren. Ökad självförsörjning av råvaror till jordbruket leder också till ökad livsmedelssäkerhet vilket är relevant både i ett svenskt och internationellt perspektiv.

En ökad global konkurrens kring energiresurser får återverkningar även på andra områden, såsom säkerhetspolitik. I Energimyndighetens rapport *Globala energifrågor och svensk säkerhetspolitik* (Energimyndigheten, 2012) anlades just ett energisäkerhetsperspektiv på frågan om Sveriges roll i den globala konkurrensen och det konstaterades att vi har ett stort beroende av ett fåtal regioner

i vilka stabiliteten på sikt är mycket svår att bedöma, t.ex. Ryssland, Nordafrika och mellanöstern. Att minska beroendet av konventionellt kvävegödsel skulle således också relatera till den säkerhetspolitiska ambitionen att minska beroendet av stater och regioner som använder energiresurser som strategiska påtryckningsmedel, och öka förmågan att upprätthålla jordbrukets produktion även vid kriser som får återverkningar på de globala energimarknaderna. Det säkerhetspolitiska perspektivet på frågan om tillgång till energiresurser har ökat de senaste åren. Ett antal incidenter under det gångna året (2014) i östra Europa ser ut att peka på att detta perspektiv snarast kommer bli än viktigare framöver.

8.1.2 Nyttiggörande av lokala resurser

En investering i produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi ger alltså ett oberoende från fossilenergimarknaden men också en möjlighet att producera gödselmedel med lokalt tillgängliga energiresurser. Jordbruket har goda förutsättningar att bli en viktig del av framtidens hållbara energisystem genom att producera bioenergi (SOU 2007:36). Under det senaste decenniet har stora investeringar i olika typer av biobränslen och kunskapen om den möjlighet jord- och skogsbruket har att bidra till energiförsörjningen har ökat. Utöver att odla grödor för dedikerad produktion av biobränslen finns det en stor potential i användningen av restprodukter och gödsel för att producera biogas inom lantbrukssektorn. Intresset för biogas ökar inom jordbruket och potentialen är mycket stor (Lantz et al., 2007), även om det fortfarande är en mindre del av den faktiska produktionen i Sverige. Lantbruket har också goda förutsättningar att bli en del av den framväxande marknaden för vindkraft genom egna eller gemensamma investeringar (se t.ex. LRF, 2009), vilket ger en ny inkomstkälla till lantbruksföretag och utnyttjar en resurs som annars inte används inom jordbruket.

Samtidigt som biogas och vindkraft uppmuntras från politiskt håll har det varit svårt att få lönsamhet i investeringar. Att fundera på nya lönsamma möjligheter för användning av biogas och vindkraft är därför av högsta intresse. Produktion av kvävegödselmedel öppnar upp för nya möjligheter att använda dessa resurser på ett sätt som både är till direkt nytta för jordbruket och som har möjlighet att skapa ett högre värde än vad den producerade elkraften har, åtminstone vid låga elpriser.

8.1.3 Minskade utsläpp av växthusgaser

Jordbruket uppskattas vara ansvarigt för 10-12 % av de globala utsläppen av växthusgaser (Smith et al., 2008) och att minska sektorns bidrag till utsläppen är därför en viktig fråga. Produktion av kvävegödsel baserad på förnybara resurser innebär minskade växthusgasutsläpp enligt de livscykelanalyser som genomförts och som presenterades i kapitel 5. Minskade utsläpp av växthusgaser bidrar till att uppnå nationella och internationella politiska mål om minskad klimatpåverkan från samhället. Även mer specifika mål för att minska utsläpp från jordbrukssektorn kan lättare nås då det visats att konventionellt producerat kvävegödsel står för en betydande del av jordbrukets utsläpp av växthusgaser. Växthusgasbalansen för

specifika grödor blir även betydligt bättre, vilket kan vara en konkurrensfördel för klimatmärkta livsmedel och biodrivmedel som produceras av dessa grödor.

Att använda förnybara energiresurser för att producera kvävegödselmedel är dessutom ett bra alternativ jämfört med att göra el, värme och drivmedel. Detta eftersom kväve ger en reduktion av utsläpp i produktionssteget minst lika stor som andra alternativ, samtidigt som produktion av el, värme och drivmedel riskerar att konkurrera ut annan förnybar energi, medan enkla kvävegödselmedel baserade på förnybar energi garanterat kommer ersätta fossila alternativ.

8.2 Identifierade risker

De risker som identifierats för kvävegödsel baserad på förnybar energi rör i hög grad risker som har direkt med produktionen och hanteringen av gödselmedlen att göra.

8.2.1 Produktions- och hanteringsrisker

De olika produktionsprocesserna har var och en ett antal riskfyllda aspekter som har att göra med de kemiska egenskaperna hos produkterna eller utformningen av processerna. Ammoniumnitrat är som tidigare påpekats extremt brand- och explosionsfarligt, ammoniak är i sig själv mycket giftigt, och produktionen av ammoniak sker vid mycket högt tryck vilket också innebär en stor risk. Dessa risker nämndes ovan, i kapitel 4, och relaterar också till diskussionen om tillämpliga lagar och regler, kapitel 7, och kommer därför inte diskuteras i detalj här. Vad som är viktigt att betänka är vad som händer om produktionssystemen förändras från storskaliga specialiserade produktionsprocesser till mindre enheter. I den storskaliga kemiska industrin finns sedan lång tid en vana av att hantera och arbeta med giftiga ämnen och riskfyllda processer, vilket lett till ett genomgående arbete för säkerhet, miljö och arbetsmiljö – även om det också finns exempel på allvarliga olyckor inom kemiindustrin. En omstrukturering av produktionen till mindre enheter riskerar att ge mindre utrymme för ett kontinuerligt arbete med fokus på frågor om säkerhet, miljö och arbetsmiljö vilket kan öka risken för olyckor i produktionen och hanteringen av gödselmedlen.

Att introducera användning av vattenfri ammoniak som kvävegödselmedel skulle också innebära många nya risker vid hantering och användning på gårdarna. Ammoniaken är väldigt giftig och flyktig vilket gör att läckor från tankar och utrustning kan medföra akut fara för personer i omgivningen. Även om det finns vana i exempelvis USA att använda vattenfri ammoniak i stor skala, erfarenheter som skulle kunna användas för att utbilda lantbrukare i Sverige, är denna användning förknippad med stora risker på grund av ammoniakens natur.

8.2.2 Ökade kostnader och minskad konkurrenskraft

De analyser som redovisats i denna rapport visar att kvävegödsel baserad på förnybar energi är tekniskt möjligt att producera, men att kostnaden för dessa

gödselmedel blir betydligt högre än för konventionellt producerat gödselmedel. Det betyder högre kostnader för lantbrukets råvaror och därmed också högre produktionskostnader för livsmedel som måste betalas av konsumenterna. Konkurrensen är idag global, inte om bara om energiråvaror vilket diskuterats ovan, utan också om många livsmedelsprodukter. Kvävegödsel baserat på förnybar energi riskerar alltså att sänka konkurrenskraften för producenter som betalar ett högre pris för dessa gödselmedel, om det inte går att identifiera nischer och aktörer som ser ett högre värde i det minskade beroendet av fossila råvaror och minskad klimatpåverkan.

Kostnaderna för livsmedel som andel av hushållens totala utgifter har – sett över lång tid – minskat i Sverige (Lööv & Sköld, 2010) även om denna andel under 2000-talet har stabiliserats. Ökade kostnader för livsmedel på grund av dyrare, förnybara gödselmedel skulle alltså kunna vara ett brott mot denna trend, men kan också ses som en återgång till den situation som var rådande innan billiga insatsvaror baserade på fossila resurser var lika självklart inom jordbruket som idag. Detta resonemang bygger alltså på att den kostnadsökning som nya kvävegödselmedel skulle innebära går att föra vidare i livsmedelsproduktionens värdekedja från den enskilde lantbrukaren till slutkonsumenten, för att inte hela kostnadsökningen ska drabba lantbrukaren.

8.3 Kommentarer

De nyttor som identifierats för kvävegödsel baserad på förnybar energi - minskat beroende av fossila råvaror, nyttiggörande av lokala resurser samt minskade utsläpp av växthusgaser – finns främst på en samhällsnivå, medan riskerna – produktions- och hanteringsrisker samt ökade kostnader och minskad konkurrenskraft – tydligt är kopplade till enskilda lantbrukare. Det kan alltså sägas finnas en obalans mellan den nytta samhället kan se av att vilja införa dessa nya kvävegödselmedel och den risk den enskilde lantbrukaren ser. För att komma vidare måste detta hanteras, vilket kräver politiska lösningar och beslut. Riktade avgifter och skatter på fossilbaserade gödselmedel och livsmedel som producerats med dessa, eller stöd för produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi och livsmedel som producerats med dessa gödselmedel är möjliga förslag, men hur sådana avgifter eller stödssystem skulle kunna utformas kräver andra studier än vad som genomförts i detta projekt.

9 Viktiga intressenter och aktörer

Denna studie har visat att det är tekniskt möjligt att, till en något högre kostnad, producera kvävegödsel av förnybara resurser istället för fossila resurser. För att gå från idé till handling krävs det stöd från ett antal olika intressentgrupper och att vissa aktörer tar ansvar för att implementera de processer som presenterats i denna

rapport. Detta stycke diskuterar vilka intressentgrupper det finns för kvävegödsel baserad på förnybar energi och vilka aktörer som kan tänkas spela en viktig roll för att genomföra ett sådant projekt.

9.1 Intressentgrupper

Det finns många lantbrukare med ett intresse för att minska den miljö- och klimatpåverkan som lantbruket har. En nisch och intressentgrupp som ofta förknippas med detta är ekologiska lantbrukare, men ekologiskt lantbruk tillåter idag inte användning av handelsgödsel vilket också skulle inkludera kvävegödsel baserat på förnybar energi. Ekologiska lantbrukare är således en grupp som inte skulle ha något större intresse av dessa gödselmedel. Det finns dock andra sätt att bedriva lantbruk som minskar miljö- och klimatpåverkan jämfört med konventionella metoder. Flera initiativ som arbetar med dessa frågor finns i Sverige i vilka man arbetat med energieffektivisering och kartläggning av klimatpåverkan från bland annat gödselmedel, exempelvis inom projekten Goda affärer på förnybar energi (Baky, inget datum) som leds av LRF, samt Fossilfria lantbruk som leds av Energikontoret Östra Götaland. Även lantbrukare som är certifierade inom Svenskt Sigill (ett märke som hjälper handlare och konsumenter att kunna välja produkter som producerats med större hänsyn till djur och natur) måste uppfylla särskilda krav på användning och hantering av kvävegödsel kan ses som en möjlig intressentgrupp. Lantbrukare med ett intresse för att ställa om till mer klimatsmart produktion är alltså en viktig intressentgrupp för kvävegödsel baserat på förnybar energi. Det finns redan intresse för frågan i denna grupp och de kan bidra till genomförandet genom att direkt skapa efterfrågan för dessa gödselmedel genom sina respektive samarbetsorgan.

I projektet Fossilfria lantbruk som leds av Energikontoret Östra Götaland, har ett antal köpare av råvaror från lantbruket intervjuats, där de fått indikera sitt intresse för produkter med lägre klimatpåverkan. Företag som Agroetanol, Max Hamburgare, Perstorp Bioproducts AB, Scan och Lantmännen Cerealia svarade alla att jordbruksprodukter med lägre klimatavtryck är av högsta intresse för dem (Energikontoret Östra Götaland, 2014). Företag inom livsmedelsindustrin som vill minska sin klimatpåverkan genom att använda mer klimatsmarta råvaror är alltså en annan intressentgrupp som kan arbeta för att skapa efterfrågan på nytt kvävegödsel.

En annan grupp av specifika (indirekta) intressenter är biodrivmedelstillverkare. Enligt Förnybartdirektivet (Europeiska kommissionen, 2009), måste biodrivmedel i ett livscykelperspektiv minska sina utsläpp av växthusgaser jämfört med en fossil referens med minst 35%, men detta krav ökar till 50% och 60% år 2017 och 2018. För många biodrivmedel utgör odlingen en mycket stor del av klimatpåverkan, och för biodiesel baserad på raps – som idag har mycket små marginaler till utsläppsgränsen – kan det finnas intresse hos tillverkarna att köpa råvaror med lägre klimatavtryck.

9.2 Aktörer

Det finns ett antal aktörer inom grönt kvävegödsel. I detta kapitel gör vi en övergripande kartläggning av tidigare initiativ och aktiva företag (state-of-the-art). Om grönt kväve ska bli en affärsmöjlighet är det bra att ha god överblick över samarbetspartner och eventuella konkurrenter.

Tillverkning av ammoniak baserad på elektrolys pågick i Norge mellan 1948 och 1990. Anläggningen drevs av Norsk Hydro, elektricitet till den 150 MW stora elektrolysapparaten togs från det närliggande vattenkraftverket (Grundt & Christiansen, 1982). Företaget som numera heter Yara är en av de världsledande aktörerna inom gödselproduktion och har engagerat sig mycket i klimatpåverkan av jordbruk och av deras produkter. Så vitt vi kunnat utröna finns idag inga planer på att återuppta produktion av kväve baserad på förnybar energi.

Också på Island har ammoniak producerats, för vätgasproduktionen användes elektrolys driven av el genererad av geotermisk energi. Anläggningen lades ner för något årtionde sedan, men diskussioner om att starta upp den igen pågår för tillfället (Egill Skulasson, pers. komm.).

I Finland byggde företaget Kemira en ammoniakanläggning baserad på förgasning av torv, som invigdes år 1988 och lades ner 1990 då produktionspriset inte stod sig på den internationella ammoniakmarknaden. En del tekniska problem var säkert också en bidragande orsak till nedläggningen, framförallt uppstod problem med höga halter naftalen i syntesgasen. Torven var också av skiftande kvalitet, vilket försvårade intrimningen (Koljonen et al., 1993).

Det finns flera företag som påstår att de ska börja producera grönt kväve. Vi fokuserar här på att beskriva varsamheten vid de aktiva företag vi kunnat identifiera, dock vill vi påpeka att vi inte kunnat identifiera några kommersiella anläggningar för grönt kväve. Det finns däremot en demoanläggning i Minnesota i USA, som vi kommer att beskriva. Nedan följer en kort beskrivning av de identifierade initiativen:

- Protonventures i Holland säger på sin hemsida att de utvecklat en mini-ammoniakanläggning baserad på vindkraft och elektrolys, i samarbete med företaget Casale. Anläggningen ska kunna producera 1000 ton ammoniak per år. <http://www.protonventures.com>
- The Leighty Foundation i USA är en organisation som med hjälp av donationer bedriver olika projekt och delar ut anslag för olika ändamål inom utbildning, social omsorg och miljö. Dom har bland annat förprojekterat en vind-till-ammoniak anläggning i Alaska, som dock inte blev av att bygga. Dom projekterar nu en annan liknande anläggning i Iowa. <http://leightyfoundation.org>
- ITM Power i Storbritannien är ett företag främst inriktat på produktion av vätgas. De har i april 2014 fått anslag att utveckla och bygga en

pilotanläggning för ammoniakproduktion baserad på vindkraft på gårdsnivå. Matkedjan Waitrose går in med pengar och kommer att äga anläggningen. Det är dock oklart när byggstart är planerad.

<http://www.itm-power.com/project/urea-renewable-chemistry>

- Syngest är ett företag grundat år 2009 i Iowa, USA, som satsar på att tillverka ammoniak och urea baserat på förgasning av biomassa. Man pratar också om mini-bioraffinaderier som kan producera både el, värme, biodrivmedel och kvävegödsel. Företaget var mycket aktiv i media 2009 och 2010 men det är oklart om och när en anläggning kan komma att byggas. <http://www.syngest.com>
- BioNitrogen är ett företag i Florida, USA, som satsar på att tillverka ammoniak och urea baserat på förgasning av biomassa. Produktionen ska enligt planerna uppgå till 520 ton urea per dag. Företaget har fått flera större investeringsbidrag och verkar ha kommit långt i planeringen, dock är det oklart när byggstart kommer att ske. <http://www.bionitrogen.com>
- Agrebon är ett företag i Colorado, USA, som på sin hemsida säger att dom jobbar med nästa generations mineralgödsel, men det är av informationen som finns på hemsidan oklart vilken teknologi dom tänker sig för tillverkning av kvävegödsel. Dom har dock tillsammans med ett annat företag (Progressive Nutrient Systems, LLC) i augusti 2012 lämnat in en ansökan om finansiering av en anläggning för produktion av urea baserad på biogas, i anslutning till en etanolfabrik (North Dakota Industrial Commission, 2012). Anläggningen ska enligt ansökan kunna producera ca 30 ton urea per dag <http://www.agrebon.com>

I Iowa, USA, finns också ett intressant privat initiativ på en gård där ammoniak produceras i mycket liten skala baserat på vätgas från elektrolys. Energi till anläggningen kommer delvis från solpaneler (Schmuecker, 2014).

I Minnesota i USA har en pilotanläggning där man producerar ammoniak med hjälp av vindkraft i liten skala nyligen uppförts. Anläggningen invigdes sommaren 2013, varpå en period med intrimning följde. Sedan några månader tillbaka har man dock lyckats med kontinuerlig produktion av ammoniak (Joel Tallaksen, pers. komm.). Den främsta drivkraften är att minska beroendet av utländska fossila energikällor (Lammers, 2010). En annan drivkraft är den kraftiga utbyggnaden av vindkraft som inte åtföljts av utbyggnad i överföringskapacitet, man talar här om ”stranded wind” och söker därför efter nya sätt att nyttiggöra vindkraften.



Figur 15. Installation av ammoniakanläggning i Minnesota, USA. Foto: Joel Tallaksen.

Pilotanläggningen i Minnesota producerar när den är i full drift 3,2 kg ammoniak per timme, vilket motsvarar ungefär 25 ton ammoniak per år med en driftstid på 8000 timmar. Detta räcker till kvävegödsling för 160 ha om man räknar med en giva på 130 kg N/ha.

Alla de ovan beskrivna aktörerna använder sig av traditionell Haber-Bosch syntes för ammoniaksyntesen. Det finns också en mängd forskare och företag som är aktiva inom alternativa sätt att producera ammoniak, till exempel via elektrokemisk väg, men här krävs mycket teknisk utveckling innan kommersialisering kan bli aktuellt (se t.ex. Giddey et al., 2013). Det finns också många aktörer som studerar användningen av ammoniak som drivmedel. Eftersom ammoniak lätt kan omvandlas tillbaka till vätgas och kvävgas kan ammoniak användas som vätgasbärare för att underlätta transport och lagring. Ammoniak har också föreslagits som ett sätt att kemiskt lagra förnybar energi så som vind- och solkraft (se t.ex. Dunn et al., 2012). Detta betyder att det finns fler grupper med ett intresse av att producera ammoniak från förnybar energi än de som är kopplade till lantbruk och livsmedelsproduktion.

10 Sammanfattande diskussion

10.1 Val av kvävegödselmedel och produktionsprocess

Vi har i denna rapport redovisat en rad aspekter kopplade till produktion av grönt kväve. Vi gör här en sammanvägd bedömning av fördelar och nackdelar av olika produktionskedjor.

Vad gäller produktionskostnaden pekar uppskattningarna på att förgasning är det billigaste alternativet. Det är dock ett alternativ på något längre sikt eftersom förgasningstekniken inte är helt färdigutvecklad. De andra alternativen som är möjliga att bygga inom en snar framtid blir dyrare än de fossilbaserade. Bland dessa alternativ verkar dock biogas till urea som ett lovande alternativ, men blir ändå dubbelt så dyrt som dagens kväve.

I jämförelse mellan vindkraftsbaserad elektrolys och reformering av biogas är produktionskostnaderna liknande. Biogas har dock en lägre investeringskostnad och lägre andel fasta kostnader. Biogas är också en mindre intermittent energikälla, vilket är en klar fördel eftersom ammoniaksyntesen inte är lätt att variera utan behöver en jämn och stadig process. Vindkraft behöver antingen ett stort vätgaslager för att buffra skillnaderna i elproduktion, eller blir starkt beroende av elnätet som utjämning för variationer i elproduktion. Att vara beroende av elnätet innebär större kostnadsrisk och det blir även viktigt när klimatpåverkan beräknas hur övrig el på nätet har producerats.

Vad gäller val av produktionsskala kan vi se att en liten skala kräver lägre investeringar och mindre tillstånd behövs, men blir dyrare per kilo kväve. De olika teknikerna har också tydligt olika skalfördelar. Eftersom förgasning är en så komplex process kräver den en större produktionsskala, medan elektrolystekniken är betydligt enklare att skala ner.

Vad gäller val av slutprodukt kan vi konstatera att ammoniak är billigast att producera. Vi har dock ingen infrastruktur eller vana av att hantera vattenfri ammoniak i Sverige, vilket indikerar att distribution, lagring, hantering och användning är behäftad med många extrakostnader vilket mycket väl kan äta upp skillnaden med fasta gödselmedel. Hantering av ammoniak är också kopplad till risker för läckage.

Ammoniumsulfat är en relativt enkel kemiteknisk process. Men på grund av den höga svavelhalten har den en begränsad marknad. På sortimentsidan finns hos t.ex. svavelrika produkter som riktas till odling av potatis, frilandsgroänsaker, frukt och bär. Ett gödselmedel innehåller t.ex. 8-5-19-12 (NPKS). I ammoniumsulfat är innehållet NS 21-24. Man kan därför ana att ammoniumsulfat har en begränsad marknad i Sverige. Internationellt kan finnas ett större behov av svavelgödsling på basiska jordar. Eventuellt kan ammoniumsulfat fungera bra som inblandning med

andra gödselmedel, ungefär på samma sätt som låginblandning av biodrivmedel i bensin och diesel.

I jämförelse mellan ammoniumnitrat och urea, kan vi se att de uppskattade produktionskostnaderna hamnar ganska lika, med en liten fördel för urea. Kemitekniskt är urea något enklare att producera, men fungerar bara om det finns en koldioxidkälla i närheten, vilket det gör i biogasfallet. I produktion av urea bildas heller ingen lustgas så som det gör i produktion av ammoniumnitrat. Det innebär att urea borde ge ett lägre klimatavtryck än ammoniumnitrat men tyvärr har inga livscykelanalyser gjorts som kan styrka detta. Vi kan dock konstatera att även ammoniumnitrat baserad på förnybara resurser ger en avsevärd klimatnytta jämfört med fossila alternativ.

Vår samlade bedömning är att på kort sikt verkar biogas till urea som ett mycket lovande alternativ som bör utredas i mer detalj. På längre sikt är förgasning av biomassa mer intressant, förutsatt att tekniken för förgasning lyckas slå igenom på kommersiell skala.

10.2 Hur går vi vidare?

För att grönt kväve ska bli en realitet måste det finnas ett behov och en efterfrågan för denna produkt, som kan skapas av marknadsaktörer själva eller med politiska och ekonomiska styrmedel.

Som tidigare nämnts är de nyttor som identifierats för kvävegödsel baserad på förnybar energi (till exempel minskat beroende av fossila råvaror, livsmedelstrygghet, minskade utsläpp av växthusgaser) främst på samhällsnivå. För att komma vidare måste detta hanteras, vilket kräver politiska lösningar och beslut. Riktade avgifter och skatter på fossilbaserade gödselmedel och livsmedel som producerats med dessa, eller stöd för produktion av kvävegödsel baserad på förnybar energi och livsmedel som producerats med dessa gödselmedel är möjliga förslag, men hur sådana avgifter eller stödsystem skulle kunna utformas kräver andra studier än vad som genomförts i detta projekt.

Inom projektet Fossilfritt lantbruk (Energikontoret Östra Götaland, 2014) har några affärsmodeller för hur lantbrukare kan tjäna pengar på ”fossilfria affärer” arbetats fram: antingen behöver den fossilfria råvaran generera ett högre pris, eller så behöver bonden få betalt för koldioxidbesparande åtgärder. De koldioxidbesparande åtgärderna kan kompenseras via direkta åtgärder kopplade till gården (liknande de existerande systemen för CDM och JI under Kyotoprotokollet) eller enligt en princip liknande gröna elcertifikat. För att komma vidare med grönt kväve är det av yttersta vikt att möjligheterna för olika affärsmodeller utreds närmare.

För att grönt kväve ska bli en realitet krävs också stora kapitalinvesteringar i byggnation av anläggningar. Vi har visat att det finns en mängd olika aktörer inom

området som kan agera som samarbetspartner men också som konkurrenter. Potentiellt investeringsstöd för byggande av en anläggning kan komma från företag, lantbruksorganisationer, riskkapital, fonder, svenska myndigheter, EU etc.

Ett alternativ är att börja med en mindre demoanläggning. Värdet av en demo kan diskuteras då tekniken i sig egentligen inte är ny. Innovationen med grönt kväve ligger i småskaligheten och de förnybara råvarorna, att hitta de lämpliga tekniska komponenterna till rätt pris i rätt kombination, samt att paketera och marknadsföra affärskonceptet. Utöver det tillkommer allt som har med kemiteknisk industri att göra så som lämpliga lokaler, säkerhet och tillstånd. En demoanläggning kan ur denna synpunkt vara ett mycket viktigt första steg mot en mer storskalig implementering.

Innan några investeringar kan göras behöver dock en så kallad Front-End Engineering and Design (FEED) att göras. En sådan studie ger underlag för en slutlig investering i en anläggning och inkluderar både hårda, finansiella aspekter och mjuka miljö-/nyttoaspekter. Denna FEED bör kunna genomföras på 2 års tid. Baserat på FEED:en kommer följdinvesteringen att resultera i en slutlig anläggning vilken kan byggas under 2-3 år. Således bör den bästa tekniken kunna väljas ut i initialfasen, en grundlig FEED genomföras under det påföljande samverkansprojektet och en anläggning finnas på plats efter 5 år från igångsättning, förutsatt att den nödvändiga finansieringen kommer på plats.

Referenser

- Ahlgren, S. 2009. *Crop Production without Fossil Fuel. Production Systems for Tractor Fuel and Mineral Nitrogen Based on Biomass*.
Doktorsavhandling, No 2009:78. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Ahlgren, S., Baky, A., Bernesson, S., Nordberg, A., Norén, O., Hansson, P.-A. 2008. Ammonium nitrate fertiliser production based on biomass - Environmental effects from a life cycle perspective. *Bioresource Technology*, 99(17), 8034-8041.
- Ahlgren, S., Baky, A., Bernesson, S., Nordberg, Å., Norén, O., Hansson, P.A. 2012. Consequential Life Cycle Assessment of Nitrogen Fertilisers Based on Biomass - a Swedish perspective. *Insciences Journal*, 2(4), 80-101.
- Ahlgren, S., Bernesson, S., Baky, A., Nordberg, Å., Hansson, P.A. 2011. *Green nitrogen - Possibilities for production of mineral nitrogen fertilisers based on renewable resources in Sweden*. Rapport 030. Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Ahlgren, S., Bernesson, S., Nordberg, A., Hansson, P.-A. 2010. Nitrogen fertiliser production based on biogas - Energy input, environmental impact and land use. *Bioresource Technology*, 101(18), 7192-7195.
- Amixo. 2014. *Ammoniaklösning*. <http://www.amixo.se/ammoniaklosning/>
Besökt 2014-12-12
- Ammenberg, J., B. Svensson, M. Karlsson, N. Svensson, A. Björn, M. Karlsson, K. Tonderski and M. Eklund. 2014. *Biogas Research Center (BRC) - Slutrapport för etapp 1*. Rapport 2014:1. Linköpings universitet, Linköping.
- Appl, M. 2011. Ammonia, 1. Introduction. I: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley.
- ATL. 2014. *Marknadsnoteringar*.
<http://www.atl.nu/noteringar?typ=71&datum=2014-12-15%2000:00:00>
Besökt 2014-12-15.
- Baky, A. Inget datum. *Grönt kväve. Mineralgödselkväve tillverkad av förnybara råvaror till det svenska jordbruket*. <http://www.gafe.se/FoU-rapporter/>
Besökt 2014-12-16
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D. 2013. *Biogas upgrading – Review of commercial technologies*. SGC Rapport 2013:270. Svenskt Gastekniskt Center, Malmö.
- Bičáková, O., Straka, P. 2012. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(16), 11563-11578.
- Boerrigter, H., Zwart, R.W.R. 2004. *High efficient co-production of Fischer-Tropsch (FT) transportation fuels and Substitute Natural Gas (SNG) from biomass*. Energy Research Centre of the Netherlands, Petten.
- Brandin, J., Liliedahl, T. 2011. Unit operations for production of clean hydrogen-rich synthesis gas from gasified biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35, Supplement 1, S8-S15.

- Dunn, R., Lovegrove, K., Burgess, G. 2012. A review of ammonia-based thermochemical energy storage for concentrating solar power. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 391-400.
- EFMA. 2000. *Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry*. Booklets 1, 2, 5 & 6. European Fertilizer Manufacturers' Association, Bryssel.
- Egill Skulasson, pers. komm., forskare, Science Institute and Faculty of Physical Sciences, University of Iceland. Personlig kommunikation 2015-01-23.
- Energikontoret Östra Götaland. 2014. *Fossilfritt lantbruk NU! Handbok i minskat fossilberoende med Östgötamodellen*.
<http://energiost.se/images/fossilfria/Fossilfritt.pdf> Besökt 2014-12-17
- Energimyndigheten. 2012. *Globala energifrågor och svensk säkerhetspolitik*. ER 2012:16. Energimyndigheten, Eskilstuna.
- Europeiska kommissionen. 2009. *Europaparlamentets och Rådets direktiv 2009/28/EG av den 23 april 2009 om främjande av användningen av energi från förnybara energikällor och om ändring och ett senare upphävande av direktiven 2001/77/EG och 2003/30/EG*.
- Fertilizers Europe. 2014. *EU fertilizer market key graphs*.
<http://www.fertilizerseurope.com>. Besökt 2014-12-08
- Giddey, S., Badwal, S.P.S., Kulkarni, A. 2013. Review of electrochemical ammonia production technologies and materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14576-14594.
- Gilbert, P., Alexander, S., Thornley, P., Brammer, J. 2014. Assessing economically viable carbon reductions for the production of ammonia from biomass gasification. *Journal of Cleaner Production*, 64, 581-589.
- Grundt T, Christiansen K. 1982. Hydrogen by water electrolysis as basis for small scale ammonia production. A comparison with hydrocarbon based technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* 7(3), 247-257.
- Hulteberg, P.C., Karlsson, H.T. 2009. A study of combined biomass gasification and electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 772-782.
- IFA. 2009. *Fertilizers, Climate Change and Enhancing Agricultural Productivity Sustainably*. International Fertilizer Industry Association, Paris.
- Isherwood, K.F. 2009. Fertilizer Use in Western Europe: Types and Amounts. I: *Agricultural sciences – Vol. II. Encyclopedia of Life Support Systems*. R. Lal (Red.). EOLSS Publishers, Paris.
- Kamphus, M. 2014. Emission monitoring in nitric acid plants. *Nitrogen+Syngas*, 328, 48-53.
- Kasimir-Klemedtsson, Å. 2001. *Metodik för skattning av jordbrukets emissioner av lustgas: Underlag för Sveriges nationalrapport till Klimatkonventionen*. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Koljonen, J., Kurkela, E., Wilén, C. 1993. Peat-based HTW-plant at Oulu. *Bioresource Technology*, 46(1-2), 95-101.

- Kool, A., Marinussen, M., Blonk, H. 2012. *LCI data for the calculation tool - Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization GHG Emissions of N, P and K fertilizer production*. Blonk Consultants, Gouda.
- Lantz, M., Svensson, M., Björnsson, L., Börjesson, P. 2007. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden – Incentives, barriers and potentials. *Energy Policy*, 35(3), 1830-1843.
- Larsson, L.-E. 1976. *Hantering av klara gödsellösningar*. Meddelande nr 363. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
- Lööv, H., Sköld, O. 2010. *Svenska matvanor och matpriser. Prisutvecklingen under de senaste åren*. Rapport 2010:20. Jordbruksverket, Jönköping.
- Maharjan, B., Venterea, R.T. 2014. Anhydrous Ammonia Injection Depth Does Not Affect Nitrous Oxide Emissions in a Silt Loam over Two Growing Seasons. *Journal of Environmental Quality*, 43(5), 1527-1535.
- Moulijn, J.A., Makkee, M., van Diepen A. 2013. *Chemical Process Technology*. 2:a upplagan. John Wiley & Sons, Chichester.
- North Dakota Industrial Commission. 2012. *Distributed Nitrogen Fertilizer Plant – Engineering and Development*.
<http://www.nd.gov/ndic/renew/meeting1211/r017-b-proposal.pdf> Besökt 2015-01-22
- Regeringen. 2014. *Budgetpropositionen för 2015. Förslag till statens budget för 2015, finansplan och skattefrågor*. Proposition 2014/15:1.
- Röös, E., Sundberg, C., Hansson, P.-A. 2011. Uncertainties in the carbon footprint of refined wheat products: a case study on Swedish pasta. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 338-350.
- SCB. 2011. *Försäljning av mineralgödsel för jord- och trädgårdsbruk under 2009/10. Slutlig statistik*. Statistiska meddelanden MI 30 SM 1101. Statistiska centralbyrån, Örebro.
- Schmuecker, J. 2014. *My Solar Powered Ammonia Generation System*. 11th Annual NH₃ Fuel Conference. 21-24 September, Des Moines, Iowa.
- Shutske. 2005. Using Anhydrous Ammonia Safely on the Farm.
<http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/dc2326.html>
- SJV. 2013. *Riktlinjer för gödsling och kalkning 2014*. Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV. 2014. *Försäljning av mineralgödsel 2012/13*. Statistikrapport 2014:05. Jordbruksverket, Jönköping.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O. 2007. Agriculture. I: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Red.). Cambridge University Press, Cambridge och New York.
- SOU 2007:36. *Bioenergi från jordbruket – en växande resurs*. Fritze, Stockholm.

- Statskontoret. 2011. *Priset på handelsgödsel efter kväveskatten – en utvärdering*. Rapport nr 2011:31. Statskontoret, Stockholm.
- Tallaksen, J., Bauer, F., Hulteberg, C., Reese, M., Ahlgren, S. 2015. *Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: Greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production*. Opublicerat manuskript.
- Tallaksen, J., forskare, University of Minnesota, West Central Research and Outreach Center, Morris. Personlig kommunikation 2015-01-12.
- Tock, L., Maréchal, F., Perrenoud, M. 2015. Thermo-environomic evaluation of the ammonia production. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(2), 356-362.
- Tunå, P., Hulteberg, C., Ahlgren, S. 2014. Techno-economic assessment of nonfossil ammonia production. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(4), 1290-1297.
- UNIDO/IFDC. 1998. *Fertilizer Manual*. 3:e upplagan. Kluwer Academic, Dordrecht.
- UNIDO. 1983. *Mini-fertilizer plant projects*. Sectoral Studies Series. No. 7, Vol. 1. UNIDO/IS.416. United Nations Industrial Development Organization, Wien.
- Yara. 2014. *Kväveformer och kvävegödselmedel*. <http://www.yara.se/crop-nutrition/crops/se-crop-programmes/Nitrogen-and-nitrogen-fertilizers/nitrogen-and-nitrogen-fertilizers.aspx> Besökt 2014-12-11.
- Yara. 2015. *Jordbruk, ordinarie sortiment*. http://www.yara.se/images/Jordbruk_tcm422-103514.pdf Besökt 2015-03-26.
- Zamagni, A., Guinée, J., Heijungs, R., Masoni, P., Raggi, A. 2012. Lights and shadows in consequential LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(7), 904-918.